

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MATO GROSSO
CÂMPUS UNIVERSITÁRIO DE SINOP
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E AMBIENTAIS

**ESTUDO COMPARATIVO DE PARÂMETROS
MICROBIOLÓGICOS DO SOLO RELACIONADOS AO CICLO DO
CARBONO EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO NA AMAZÔNIA
MATO-GROSSENSE**

Daniel Dias de Lima

Engenheiro Agrônomo

2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MATO GROSSO
CÂMPUS UNIVERSITÁRIO DE SINOP
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E AMBIENTAIS

**ESTUDO COMPARATIVO DE PARÂMETROS
MICROBIOLÓGICOS DO SOLO RELACIONADOS AO CICLO DO
CARBONO EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO NA AMAZÔNIA
MATO-GROSSENSE**

Daniel Dias de Lima

Orientador: Anderson Ferreira

Coorientador: Alexandre Nascimento

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Agronomia, como parte das
exigências para obtenção do título de
Mestre em Agronomia. Área de
Concentração: Solos

Maio de 2023

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

L732e Lima, Daniel Dias de.

Estudo comparativo de parâmetros microbiológicos do solo relacionados ao ciclo do carbono em sistemas de produção na Amazônia mato-grossense [recurso eletrônico] / Daniel Dias de Lima. -- Dados eletrônicos (1 arquivo : 45 f., il. color., pdf). -- 2023.

Orientador: Anderson Ferreira.

Coorientador: Alexandre Nascimento.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Sinop, 2023.

Modo de acesso: World Wide Web: <https://ri.ufmt.br>.

Inclui bibliografia.

1. Sistema Agrossilvipastoril. 2. Qualidade do Solo. 3. Quociente Microbiano. 4. Carbono da Biomassa Microbiana. 5. Carbono Orgânico Total. I. Ferreira, Anderson, *orientador*. II. Nascimento, Alexandre, *coorientador*. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
FOLHA DE APROVAÇÃO

TÍTULO: "Estudo comparativo de parâmetros microbiológicos do solo relacionados ao ciclo do carbono em sistemas de produção na Amazônia mato-grossense"

AUTOR (A): MESTRANDO (A) Daniel Dias de Lima

Dissertação defendida e aprovada em 12/07/2023.

COMPOSIÇÃO DA BANCA EXAMINADORA

1. Doutor(a) Anderson Ferreira (Presidente Banca / Orientador)
INSTITUIÇÃO: Embrapa
2. Doutor(a) MARTHA VIVIANA TORRES CELY (Examinador Interno)
INSTITUIÇÃO: Universidade Federal de Mato Grosso
3. Doutor(a) Luis Augusto Di Loreto Di Raimo (Examinador Externo)
INSTITUIÇÃO: Santos Lab.
4. Doutor(a) Cassiano Spaziani Pereira (Examinador Suplente)
INSTITUIÇÃO: Universidade Federal de Mato Grosso
5. Doutor(a) Alexandre Ferreira do Nascimento (Examinador Suplente)
INSTITUIÇÃO: Embrapa

SINOP, 31/05/2023.



Documento assinado eletronicamente por **LUIS AUGUSTO DI LORETO DI RAIMO**, Usuário Externo, em 13/07/2023, às 08:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **MARTHA VIVIANA TORRES CELY**, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso, em 13/07/2023, às 09:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **anderson ferreira**, Usuário Externo, em 13/07/2023, às 17:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufmt.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5835285** e o código CRC **94EE7420**.

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

Daniel Dias de Lima, nascido no Rio de Janeiro – RJ, em 05 de março de 1991, filho de Oziel Pereira de Lima Junior e Solange Dias de Lima. Em 2008, ingressou no curso de Agronomia pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), campus universitário de Seropédica – RJ, onde obteve o título de Engenheiro Agrônomo em 2016. No mesmo ano, ingressou no curso de MBA em Agronegócios pela Escola Superior de Agronomia Luiz de Queiroz, obtendo o título de Especialista em Agronegócios em 2019. Em março de 2021 ingressou no curso de Mestrado em Agronomia pelo Programa de Pós-Graduação em Agronomia pela Universidade Federal do Mato Grosso (UFMT).

Durante o mestrado, conduziu o experimento na Embrapa Agrossilvipastoril, submetendo-se à defesa em 31 de maio de 2023, com o trabalho intitulado “Estudo comparativo de parâmetros microbiológicos do solo relacionados ao ciclo do carbono em sistemas de produção na Amazonia Mato-Grossense”.

SUMÁRIO

RESUMO.....	vii
ABSTRACT.....	viii
LISTA DE TABELAS.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	x
CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	1
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	2
2.1 Sistema de Produção Agropecuária.....	2
2.2 Integração Lavoura Pecuária Floresta (ILPF).....	4
2.3 Carbono do Solo	5
2.4. Microbiota do solo	6
2.5 Carbono da Biomassa Microbiana	9
3 REFERÊNCIAS	11
CAPÍTULO 2 – ESTUDO COMPARATIVO DE PARÂMETROS MICROBIOLÓGICOS DO SOLO RELACIONADOS AO CICLO DO CARBONO EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO NA AMAZÔNIA MATOGROSSENSE.....	14
1 INTRODUÇÃO.....	14
2 MATERIAL E MÉTODOS	15
2.1 Caracterização do experimento.....	15
2.2 Histórico da área experimental.....	17
2.3 Amostragem de solo	17
2.4 Determinação do Carbono da Biomassa Microbiana do solo (CBM)	18
2.5 Determinação do Carbono Orgânico Total do solo (COT).....	19
2.6 Determinação do Quociente Microbiano (Qmic).....	20
2.7 Análise Estatística	20

3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	20
3.1	Carbono da Biomassa Microbiana (CBM) do solo.....	20
3.2	Carbono Orgânico Total (COT) do solo.....	24
3.3	Quociente Microbiano (Qmic) do solo	26
4	CONCLUSÃO	28
5	REFERÊNCIAS	29

ESTUDO COMPARATIVO DE PARÂMETROS MICROBIOLÓGICOS DO SOLO RELACIONADOS AO CICLO DO CARBONO EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO NA AMAZÔNIA MATO-GROSSENSE

Resumo: A organização da produção agropecuária sob diferentes sistemas produtivos pode garantir a produção sustentável de alimentos, influenciar no sequestro de carbono no solo e mitigar consequências do efeito-estufa. O objetivo com o presente trabalho foi avaliar a influência de sistemas de produção sobre os teores de Carbono da Biomassa Microbiana (CBM), Carbono Orgânico Total (COT) e Quociente Microbiano (Qmic) e comparar o potencial de sequestro de carbono atmosférico entre sistemas de produção integrados e exclusivos. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, em experimento conduzido na Embrapa Agrossilvipastoril em Sinop, MT. Os sistemas de produção foram: Floresta (F); Lavoura (L), Pecuária (P), Integração Pecuária-Lavoura (IPL); Integração Lavoura-Pecuária (ILP); e Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF). As culturas representantes de cada sistema foram a sucessão *Glycine max*, *Zea mays*, *Urochloa brizantha* cv. Marandu, e *Eucalyptus urograndis*. Os sistemas de produção influenciaram os teores de CBM e COT no solo. O sistema Lavoura apresentou maiores valores de Carbono da Biomassa Microbiana e Quociente Microbiano, enquanto o sistema Pecuária apresentou maiores valores de Carbono Orgânico Total. Não foi possível observar diferença estatística dos valores de Carbono Orgânico Total entre os sistemas de produção integrados e exclusivos.

Palavras-chave: Sistema Agrossilvipastoril, Qualidade do Solo, Quociente Microbiano, Carbono da Biomassa Microbiana, Carbono Orgânico Total.

COMPARATIVE STUDY OF SOIL MICROBIOLOGICAL PARAMETERS RELATED TO THE CARBON CYCLE IN PRODUCTION SYSTEMS IN THE MATO GROSSO AMAZON

Abstract: The organization of agricultural production across different production systems plays a crucial role in ensuring sustainable food production, influencing soil carbon sequestration, and mitigating the effects of the greenhouse effect. This study aimed to assess the impact of production systems on Microbial Biomass Carbon (MBC), Total Organic Carbon (TOC), and Microbial Quotient (Q_{mic}) levels, as well as to compare the potential for atmospheric carbon sequestration between integrated and exclusive production systems. The experimental design was in randomized blocks in an experiment conducted at Embrapa Agrossilvipastoril in Sinop, MT. The representative crops for each system were: Forest (F); Crop (L), Livestock (P), Livestock-Crop Integration (IPL); Crop-Livestock Integration (ILP); and Crop-Livestock-Forestry Integration (ILPF). The crops representing each system were the succession *Glycine max* and *Zea mays*, *Urochloa brizantha* cv. Marandu, and *Eucalyptus urograndis*. The results revealed that the production system had an impact on the levels of MBC and TOC in the soil. The Crop (L) system exhibited higher values of Carbon from Microbial Biomass and Microbial Quotient, while Livestock (P) system showed higher values of Total Organic Carbon. No significant statistical difference was observed in the Total Organic Carbon values between the integrated and exclusive production systems.

Key words: Crop-Livestock-Forestry Systems, Soil Quality, Microbial Quotient, Microbial Biomass Carbon, Total Organic Carbon.

LISTA DE TABELA

Tabela 1. Composição agrícola dos sete tratamentos avaliados e suas respectivas culturas de referência no mês de maio de 2022	16
---	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Imagem de satélite da área experimental, demonstrando todos os sistemas de produção estudados	16
Figura 2. Imagem de Satélite indicando os 6 tratamentos no bloco 4.....	17
Figura 3. Sistema de coleta de amostras de solo no tratamento ILFP.....	18
Figura 4. Carbono da Biomassa Microbiana dos diferentes sistemas de produção.....	21
Figura 5. Carbono da Orgânico Total dos diferentes sistemas de produção.....	25
Figura 6. Quociente microbiano dos diferentes sistemas de produção.....	26

CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS

1 INTRODUÇÃO

A população mundial crescente pressiona o mundo por aumentar a produção de alimentos de forma sustentável, porém, devido às dificuldades na concepção de modelos e suposição de cenários, existem incertezas sobre as projeções de segurança alimentar mundial (VAN DIJK et al., 2021).

Um dos fatores que dificultam a produção de alimentos são alterações climáticas, que são intensificadas pelo aquecimento global. Esse fenômeno é impulsionado pelas atividades humanas, que emitem Gases do Efeito Estufa (GEE) (GULZAR et al., 2018). Entre os principais GEE, o dióxido de carbono (CO₂) é considerado um fator de controle do aquecimento global. Ou seja, se a concentração desse gás não aumentar, o aquecimento global pode ser minimizado, reduzindo assim a probabilidade de eventos climáticos extremos (AL-GHUSSAIN, 2019).

A elevação constante de gases carbônicos na atmosfera tem gerado discussões sobre alternativas que poderiam minimizar seus impactos no meio ambiente. Uma destas seria o sequestro e armazenamento do carbono atmosférico no solo, o que pode ser realizado pela vegetação (ROSA et al., 2014) e microrganismos (MOREIRA e SIQUEIRA, 2006).

Os microrganismos são grandes responsáveis por transformações da matéria orgânica e inorgânica do solo, e estão diretamente envolvidos ciclagem de nutrientes, relação simbióticas com plantas e produção de substâncias que alteram crescimento vegetal (ANDREOLA e FERNANDES, 2007). Apesar da sua reconhecida importância, as relações entre comunidades microbianas e cultivos agrícolas ainda carecem de mais estudos (DUBEY et al., 2019).

Desta forma, os sistemas produtivos que melhorem as condições biológicas, assim como físicas e químicas do solo, são a chave para alcançar o objetivo de aumentar a produção de alimentos (COULTER, 2020), sob condições climáticas eventualmente adversas e recursos limitados (PACHAPUR et al., 2020).

Perante tais circunstâncias, a intensificação ecológica em sistemas de produção convencionais são uma alternativa para a maior produção de alimentos aliados à menor degradação ambiental (JHARIYA; MEENA; BANERJEE, 2021).

Os sistemas de produção agrícolas devem ser adaptáveis, fornecendo além de alimentos, benefícios ambientais como conservação de água e solo, ciclagem de nutrientes, controle de pragas e sequestro de carbono (MALÉZIEUX et al., 2012), desta forma, o agricultor pode minimizar custos e maximizar a produtividade de forma sustentável (PRETTY, 2018; MASSRUHÁ et al., 2020).

Dentre os possíveis sistemas de produção, a combinação de componentes florestais, agricultura e pecuária apresentam rentabilidade positiva, além de reduzir as emissões de GEE, e podem aumentar os teores de carbono no solo e biomassa, oferecendo um gerenciamento do uso da terra que oferece benefícios ambientais e econômicos (SHARMA et al., 2021).

Em vista disso, com intuito de compreender as relações entre sistemas de produção mais complexos e suas influências nos compartimentos de carbono do solo, objetiva-se com o presente trabalho avaliar os teores de carbono orgânico do solo e carbono da biomassa microbiana sob sistemas integrados de produção agropecuária e exclusivos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Sistema de Produção Agropecuária

A produção agrícola, pecuária e florestal acontece através de uma série de práticas comuns ao cultivo de espécies vegetais e animais, visando sua produção através de um conjunto de recursos, atividades e operações, interligados por um processo de gestão. Para tal organização de atividades, dá-se o nome de sistema de produção (HIRAKURI et al., 2012).

Os sistemas de produção podem ser classificados em função da sua complexidade como: Monocultura, quando uma cultura é cultivada em local por período específico; Sucessão de culturas, quando se tem a repetição sazonal de uma sequência de duas espécies no mesmo espaço produtivo por vários anos; Rotação de culturas, quando ocorre a alternância ordenada, cíclica e sazonal de

diferentes culturas; consórcio ou policultivo, quando duas ou mais culturas ocupam o mesmo local ao mesmo tempo; e sistemas integrados, quando sistemas de cultivo/criação são integrados no mesmo espaço (HIRAKURI et al., 2012).

Os Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPAs) são compostos por diferentes modelos produtivos, nomeados em função da presença dos componentes: Lavoura; Pecuária e/ou Florestal, sendo chamados também de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF). Carvalho et al. (2014), sugeriram que o acrônimo SIPA seja utilizado em literatura científica e ILPF em literatura técnica.

Os SIPAs têm se expandido no Brasil devido à benefícios de ordem econômica, ambiental e social (STANTON, 2022). A integração destes componentes de produção possuem sinergia, e agregam na diversificação da produção e aumento da produtividade (LOPES et al., 2021).

A maior otimização da área, traz consigo benefícios diretos como o aumento da renda do produtor aliado à menor utilização de recursos naturais, além de possibilitarem a redução no custo de produção e consumo de água, diminuição na emissão de gases do efeito estufa e melhorias na qualidade do solo e sua biodiversidade (SOUSA JÚNIOR et al., 2021).

A qualidade do solo por sua vez é mensurada através de indicadores de ordem física, química e biológica, que medem ou refletem o status ambiental ou a condição de sustentabilidade do sistema (DE ARAÚJO e MONTEIRO, 2007).

Os SIPAs são capazes de proporcionar inúmeras melhorias ambientais comparativamente ao monocultivo, porém, demandam um manejo mais especializado (MARTINS et al., 2018), assim como assistência técnica e atuação conjunta da comunidade agropecuarista, de forma a assegurar sua correta implementação (SILVA e SILVA, 2020).

O estado do Mato Grosso possui maior produção de soja, milho, algodão e gado de corte do país (CONAB, 2022), além de apresentar potencial de expansão do mercado florestal, que é atrelado ao setor agrícola para a secagem de grãos e geração de energia (FOREST2MARKET, 2019), portanto há muita

expectativa sobre o potencial do sistema ILPF como alternativa que permita alcançar produtividade com conservação (WRUCK et al., 2015).

2.2 Integração Lavoura Pecuária Floresta (ILPF)

O sistema ILPF é uma estratégia que visa a produção sustentável, integrando atividades agrícolas, pecuárias e florestais realizadas na mesma área, em cultivo consorciado, em sucessão ou rotacionado, e busca efeitos sinérgicos entre os componentes do agroecossistema, contemplando a adequação ambiental, a valorização do homem e a viabilidade econômica (BALBINO et al., 2011).

O autor ressalta que esta estratégia contempla quatro modalidades: Integração Lavoura Pecuária (ILP) ou agropastoril; Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) ou Agrossilvipastoril; Integração Pecuária-Floresta (IPF) ou Silvipastoril; Integração Lavoura-Floresta (ILF) ou Silviagrícola, sendo esta classificada pela ausência ou presença dos determinados componentes.

De acordo com Anjos et al. (2021) os animais manejados sob sistema ILPF, por meio do pastejo, deposição de excreta e pisoteio, promovem benefícios diretos e indiretos aos componentes agrícolas e florestais, reciclando e aumentando a eficiência dos recursos.

A integração lavoura pecuária apresenta lucratividade superior se comparada à produção convencional devido à diluição dos custos fixos e compartilhamento dos insumos (MENDONÇA et al., 2020).

A construção da fertilidade do solo em ILPF garante a maior resiliência do sistema em estresse hídrico, uma vez que melhora as condições de estabelecimento das culturas, contribuindo com maior produção de forragem e longevidade dos cultivos em função do maior aprofundamento radicular (RESENDE et al., 2020).

Regiões que apresentam déficit hídrico, o cultivo simultâneo de culturas e capim sob sistemas integrados de produção retém mais água, aumenta a ciclagem de nutrientes, mantém elevada produção de palhada sem afetar os componentes de produção de soja (YANO et al., 2020).

2.3 Carbono do Solo

Pesquisas envolvendo o carbono do solo estão sendo mais estimuladas, uma vez que seu sequestro e redução em emissões apresentam potencial para mitigar as mudanças climáticas, além de ser um importante indicador da qualidade do solo (MCBRATNEY et al., 2014).

De forma geral, o carbono pode estar presente na forma inorgânica, como em minerais carbonados (GUO et al., 2016), ou na forma orgânica, sendo esta mais genericamente dividida em matéria orgânica viva ou morta.

A matéria orgânica do solo é a maior reserva global de carbono orgânico, contendo de 3 a 4 vezes mais C estocado se comparado à atmosfera ou biomassa vegetal. A complexidade da matéria orgânica inclui resíduos vegetais em decomposição, associada à microrganismos e frações bioquimicamente transformadas chamadas de ácidos húmicos (PAUL et al., 2015).

A matéria orgânica é um importante indicador da capacidade produtiva dos solos, uma vez que relaciona propriedades físicas, biológicas e químicas do solo, além de ser uma das principais componentes da Capacidade de Troca de Cátions (CTC) nos solos tropicais e subtropicais (SOUZA et al., 2018).

O manejo dos solos altera a dinâmica de carbono do solo, e sua disponibilidade juntamente de nutrientes, especialmente na região da rizosfera, afeta principalmente a atividade, biomassa e composição das comunidades microbianas, estas que contribuem diretamente para a ciclagem do C no solo, uma vez que são os principais agentes de decomposição do carbono orgânico do solo (MASCIANDRO et al. 2018).

Por se tratar de um atributo de solo influenciado pelo manejo à ser adotado, estudos de longo prazo relativos à matéria orgânica se fazem necessários em sistemas de produção integrados, de forma a diferenciar e categorizar sua dinâmica, uma vez que a mesma possui elevada importância na modulação de inúmeros processos que ocorrem no solo (SOUZA et al., 2018).

O Carbono Orgânico (CO) é a quantidade de carbono no solo relacionada aos organismos vivos ou derivados deles, e o aumento dos seus teores

beneficiam aspectos físicos, químicos e biológicos do solo. Porém, sem um fornecimento constante CO, a quantidade armazenada no solo diminuirá com o tempo devido à decomposição do mesmo por microrganismos (MAHAJAN et al., 2019).

Algumas estratégias de manejo agrícola podem aumentar teores de carbono no solo, dentre as principais estão: (i) Melhorar a proteção física do carbono do solo em agregados, diminuindo a quantidade de distúrbios do solo ou preparo do solo; (ii) Aumentar a qualidade e a massa de insumos animais e vegetais para o solo; (iii) Manter a cobertura vegetal viva nos solos durante todo o ano; e (iv) Melhorar a diversidade e abundância microbiana do solo (KANE, 2015).

O desenvolvimento de práticas de manejo que favoreçam o sequestro de carbono ou prevenção das suas perdas, auxiliam a reduzir provável queda dos teores de carbono orgânico do solo devido ao aquecimento global. Melhorando teores de carbono orgânico do solo melhora-se também a resiliência dos agroecossistemas, assim como sua eficiência e adaptação às mudanças climáticas (SINGH et al., 2019).

O carbono do solo pode ser quantificado por diversas metodologias, sendo as mais tradicionais por combustão úmida (Walkley Black, Colorímetro, Mebius) ou combustão seca (Gravimétrico e análise elementar CHNS), onde cada método apresenta diferentes características e especificidades, (RHEIRHEMER et al., 2008).

Apesar do alto custo dos equipamentos para análise elementar de carbono automatizada por combustão seca, este método apresenta vantagens como o rápido processamento das amostras, destruição de todas as formas de carbono da amostra, rapidez na obtenção de resultados e elevada precisão (SCHUMACHER, 2002).

2.4. Microbiota do solo

Os microrganismos que compõem a biota do solo são diversificados em função de espécies, funções, habitats, fisiologia, nutrição entre outros, sendo sua diversificação ainda mais notável sob condições tropicais, mantendo a contínua

interação entre espécies na forma de sinergismo, antagonismo, parasitismo ou saprofitismo, desta forma, a microbiota do solo apresenta elevado grau de complexidade e diversidade (STAMFORD et al., 2005).

De acordo com Arias et al. (2005), solos de elevada qualidade mantêm uma comunidade diversificada de organismos que influenciam em: (i) controlar doenças de plantas, bem como pragas de insetos e ervas daninhas; (ii) formar associações simbióticas benéficas com raízes de plantas (por exemplo, bactérias fixadoras de nitrogênio e fungos micorrízicos; (iii) reciclar nutrientes de plantas e; (iv) melhorar a estrutura do solo com repercussões positivas para sua capacidade de retenção de água e nutrientes.

Microrganismos têm papel central na ciclagem de carbono e nutrientes, saúde animal (incluindo humana) e vegetal, agricultura e cadeia alimentar global, e particularmente as mudanças climáticas antropogênicas e outras atividades humanas (CAVICCHIOLI et al., 2019). De acordo com Dubey et al. (2019), contribuição potencial das comunidades microbianas pode ser aproveitada para monitorar e mitigar as mudanças climáticas.

Os microrganismos fixadores de carbono são capazes de fixar carbono no solo a partir de compostos simples, como CO_2 ou CH_4 (ZHAO et al., 2018). Organismos podem sequestrar carbono pelos ciclos de Calvin Benson, 3-hidroxipropionato, Wood-Ljungdahl e ciclo reverso do ácido tricarbóxico. (MISTRY et al., 2019).

Em ecossistemas clímax, a microbiota encontra-se em equilíbrio com o solo, configurando a manutenção da sua biodiversidade, porém, a interferência humana sobre este ecossistema resulta na quebra deste equilíbrio. Portanto, práticas agrícolas que permitam a cobertura vegetal do solo, rotação de culturas, plantio direto entre outras, pode resultar na melhoria da produtividade associada com qualidade e sustentabilidade (VILA et al., 2021).

Simbioses com fungos micorrízicos e rizóbios contribuem para práticas de cultivo mais sustentáveis, para o aumento da produção e redução da incidência de fitopatógenos, uma vez que atuam como bioprotetores contra estresses bióticos e abióticos, ativam mecanismos de resistência induzida vegetal, e

proteção das raízes através de antibiose e liberação de exsudatos (VILLA et al., 2021)

Microrganismos do solo são um componente importante na restauração de solos degradados, influenciando positivamente na manutenção da sua umidade e outros aspectos físicos (COBAN et al., 2022).

A aplicação de defensivos pode alterar a composição da microbiota de solos, ocasionando na redução da diversidade de microrganismos e/ou desequilíbrio ecológico (RODRIGUES et al., 2020).

A erosão do solo é um processo que leva à perda de solo, mas também influencia na dinâmica do carbono orgânico do solo. A mineralização e sequestro de carbono, assim como o transporte e locais de deposição estão associados às mudanças biogeoquímicas em propriedades do solo, como quebra de agregação do solo, e mudanças na composição das comunidades microbianas (XIAO et al., 2020).

Uma pequena variação na composição e funcionamento do microbioma do solo pode determinar diferentes resultados na interação entre plantas e patógenos sob condições naturais de campo (Wei et al., 2019).

As regiões áridas demonstraram ganhos substanciais nos teores de carbono e produtividade agrícola com o não revolvimento, ao passo que regiões mais húmidas por vezes aumentam somente os teores de carbono do solo, ao passo que áreas mais frias apresentaram perdas de produtividade com o não revolvimento, e resultados variáveis quanto aos teores de carbono armazenado no solo (SUN et al., 2020).

As comunidades microbianas modulam a ciclagem de elementos e micro e macronutrientes, portanto microrganismos podem melhorar produção agrícola, aumentando a resistência das culturas sobre doenças e insetos, aumentando os rendimentos e minimizando a aplicação de fertilizantes (ISLAM et al., 2022), promovendo a mitigação das emissões de GEE e aumentando o sequestro de carbono (JING et al., 2022).

2.5 Carbono da Biomassa Microbiana

Indicadores de qualidade do solo tem sido empregados e interpretados para inferir sobre a sustentabilidade dos sistemas de uso do solo, de forma a avaliar mudanças em propriedades na capacidade do solo em possibilitar o desenvolvimento vegetal e manter serviços ambientais (NOGUEIRA; HUNGRIA, 2013).

O conceito de qualidade do solo é definido por Doran e Parkin (1994) como “a capacidade de um tipo específico de solo funcionar, dentro dos limites do ecossistema manejado ou natural, como sustento para a produtividade de plantas e de animais, de manter ou de aumentar a qualidade da água e do ar e de promover a saúde humana”.

O monitoramento da qualidade do solo pode ser realizado através de indicadores físicos, químicos e biológicos, sendo o último por sua vez, constituintes vivos mais presentes nas camadas superiores, representados por uma grande diversidade de espécies que desempenham diversas funções no solo (SILVA et al., 2021).

Os microrganismos podem ser excelentes bioindicadores da qualidade do solo (HUNGRIA et al., 2013). Os principais indicadores microbiológicos da transformação do carbono são o carbono da biomassa microbiana, a proporção de biomassa bacteriana e fúngica, respiração do solo, atividades enzimáticas e a taxa de decomposição da matéria orgânica do solo (NIKITIN et al., 2022).

Os métodos mais realizados para obtenção do CBM foram o Clorofórmio-Fumigação-Incubação (CFI) e Clorofórmio-Fumigação-Extração (CFE) (WARDLE, 1998). No CFI, a determinação da biomassa é realizada com base no fluxo de liberação de CO₂ em amostras fumigadas e não-fumigadas, ao passo que no CFE é realizada a extração e quantificação do C orgânico das amostras (OLIVEIRA et al., 2001).

Ao comparar os métodos em solo amazônico, Pfeninning et al (1992), encontraram correlação positiva entre os dois métodos, porém maior coeficiente de variação no CFI. Rodrigues et al., (1994) encontraram maior precisão no método CFE em solo em 3 tipos de solo no Rio de Janeiro.

Devido ao menor tempo dedicado às análises laboratoriais, e a boa repetibilidade em grande partes dos ensaios, o método CFE (com amostragem de solo 0-10 cm) foi apontado como padrão, durante evento Fertbio em 2004, de forma à estimular uma maior base de nacional dados para fins comparativos (REIS JÚNIOR; MENDES, 2007).

De acordo com Hoffmann et al. (2018) e Stieven et al. (2020), os sistemas que contemplam maior diversidade vegetal podem favorecer o acúmulo de Carbono Orgânico e Biomassa Microbiana, apresentando valores mais expressivos poucos meses após a época das chuvas.

A relação entre o CBM/COT é denominada de quociente microbiano (QMic) uma medida da qualidade da matéria orgânica, demonstrando a eficiência de C orgânico em C microbiano, perdas e estabilização do C do solo (TÓTOLA; CHAER, 2002). O Qmic é utilizado para mensurar a qualidade do solo, uma vez que é sensível aos efeitos ambientais e antropogênicos das perturbações dos ecossistemas.

Em situações em que exista algum fator de estresse, o valor de Qmic diminui, indicando baixa capacidade de utilização do CO pelos microrganismos (WARDLE, 1994). De acordo com Powlson et al. (1987), o aumento no Qmic pode indicar o acréscimo de matéria orgânica ao solo facilmente metabolizável por microrganismos, ocasionando no rápido aumento da biomassa microbiana, sem alterar os valores de carbono orgânico do solo.

3 REFERÊNCIAS

- AL-GHUSSAIN, L. Global warming: review on driving forces and mitigation: Global Warming: Review on Driving Forces and Mitigation. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, v. 38, n. 1, p. 13–21, jan. 2019.
- ANDREOLA, F.; FERNANDES, S. A. P. A microbiota do solo na agricultura orgânica e no manejo das culturas. **Microbiota do solo e qualidade ambiental. Campinas: Instituto Agrônômico**, p. 21-37, 2007.
- ARIAS, M. E.; GONZÁLEZ-PÉREZ, J. A.; GONZÁLEZ-VILA, F. J.; & BALL, A. S. Soil health: A new challenge for microbiologists and chemists. **International microbiology**, v. 8, n. 1, p. 13-21, 2005.
- CARVALHO, P. C. D. F.; MORAES, A. D., PONTES, L. D. S.; ANGHINONI, I., SULC, R. M.; & BATELLO, C. Definições e terminologias para Sistema Integrado de Produção Agropecuária. **Revista Ciência Agronômica**, v. 45, n. 5spe, p. 1040–1046, 2014.
- DE ARAÚJO, A. S. F.; MONTEIRO, Regina Teresa Rosim. Indicadores biológicos de qualidade do solo. **Bioscience Journal**, v. 23, n. 3, 2007.
- VAN DIJK, M.; MORLEY, T.; RAU, M. L.; & SAGHAI, Y. **Systematic review and meta-analysis of global food security projections to 2050**. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-530565/v1>>. Acesso em: 3 jul. 2022
- DUBEY, A.; MALLA, M. A.; KHAN, F.; CHOWDHARY, K.; YADAV, S.; KUMAR, A.; KHAN, M. L. Soil microbiome: a key player for conservation of soil health under changing climate. **Biodiversity and Conservation**, v. 28, n. 8, p. 2405-2429, 2019.
- GULZAR, A.; MEHMOOD, M.; GANIE, S.; & SHOWQI, I. A Brief Review on Global Warming and Climate Change: Consequences and Mitigation Strategies. **Int J Adv Res Sci Eng**, v. 7, p. 2146-2156, 2018.
- HIRAKURI, M. H.; DEBIASI, H.; PROCÓPIO, S. D. O.; FRANCHINI, J. C.; CASTRO, C. D. Sistemas de produção: conceitos e definições no contexto agrícola. Londrina: Embrapa Soja, 2012. 24 p. (**Embrapa Soja. Documentos, 335**). Disponível em: http://www.cnpso.embrapa.br/download/Doc_335-OL.pdf. Accessed 26 Mar 2023
- JHARIYA, M. K.; MEENA, R. S.; BANERJEE, A. Ecological Intensification of Natural Resources Towards Sustainable Productive System. Em: JHARIYA, M. K.; MEENA, R. S.; BANERJEE, A. (Eds.). **Ecological Intensification of Natural Resources for Sustainable Agriculture**. Singapore: Springer, 2021. p. 1–28.
- SOUSA JÚNIOR, J. C. de; DA ROCHA, L. L.; OLIVEIRA, O. A. M.; PEIXOTO, R. M.; DA SILVA, R. M.; ROCHA, F. R. T.; KLEIN, J. L.; JÚNIOR, J. C. Sistemas Integrados de Produção Agropecuária: Análise descritiva das ações desenvolvidas por instituições governamentais no Estado de Goiás. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 11, p. e228101119414–e228101119414, 29 ago. 2021.

KIM, N.; ZABALOY, M. C.; GUAN, K.; VILLAMIL, M. B. Do cover crops benefit soil microbiome? A meta-analysis of current research. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 142, p. 107701, mar. 2020.

LOPES, L. C. A.; SANTOS, A. J. M.; BACKES, C.; DA LUZ SILVA, L.; MAGALHÃES, Â. F. Desenvolvimento florestal em sistema integrado lavoura-pecuária-floresta. **Scientific Electronic Archives**, v. 14, n. 11, 29 out. 2021.

MENDONÇA, G. G.; SIMILI, F. F.; AUGUSTO, J. G.; BONACIM, P. M.; MENEGATTO, L. S.; GAMEIRO, A. H. Economic gains from crop-livestock integration in relation to conventional systems. **R. Bras. Zootec.**, v. 49, 16 mar. 2020.

NIKITIN, D. A.; SEMENOV, M. V.; CHERNOV, T. I.; KSENOFONTOVA, N. A.; ZHELEZOVA, A. D.; IVANOVA, E. A.; STEPANOV, A. L. Microbiological Indicators of Soil Ecological Functions: A Review. **Eurasian Soil Science**, v. 55, n. 2, p. 221–234, 1 fev. 2022.

NOGUEIRA, M. A.; HUNGRIA, M. Indicadores microbiológicos da qualidade do solo. In: Embrapa Soja-Artigo em anais de congresso (ALICE). In: Reunião Paranaense de Ciência do Solo. **Sistemas conservacionistas de produção e sua interação com a Ciência do Solo**: resumos. Londrina: IAPAR. 2013. p. 539-544.

PACHAPUR, P. K; PACHAPUR, V. L.; BRAR, S. K.; GALVEZ, R.; BIHAN, Y. L.; SURAMPALLI R. Y.; Food Security and Sustainability. In: **Sustainability: Fundamentals and Applications**. John Wiley & Sons, Ltd, 2020. p. 357–374.

PRETTY, Jules. Intensification for redesigned and sustainable agricultural systems. **Science**, v. 362, n. 6417, p. eaav0294, 2018.

REIS JÚNIOR, F. B. DOS; MENDES, I. DE C. **Biomassa microbiana do solo**. Embrapa Cerrados. Documentos, p. 205. 2007.

DOS SANTOS RODRIGUES, M.; BARROS, A. L.; DOS SANTOS MELO, G. K.; SANGIORGIO, V. M.; ALBINO, U. B.; & GARCIA, M. G. Efeito de agrotóxicos sobre a microbiota do solo. **Revista Multidisciplinar de Educação e Meio Ambiente**, v. 1, n. 2, p. 38–38, 1 dez. 2020.

ROSA, R.; SANO, E. E.; ROSENDO, J. DOS S. Estoque de carbono em solos sob pastagens cultivadas na bacia hidrográfica do Rio Paranaíba / Carbon storage in soils of cultivated pastures in the Parnaíba River basin. **Sociedade & Natureza**, v. 26, n. 2, 26 ago. 2014.

SCHIMID, M. Perspectivas do setor florestal no Mato Grosso. **Forest2Market**. 08 de abril de 2019. Disponível em: <https://www.forest2market.com/blog/br/perspectivas-do-setor-florestal-no-mato-grosso>. Acesso em 01 de abril de 2022.

SOUZA, E. D.; SILVA, F. D.; PACHECO, L. P.; LAROCA, J. S. V.; SOUZA, J. M. A.; BONETTI, J. A. Matéria orgânica do solo em sistemas integrados de produção agropecuária no Brasil. In: SOUZA E. D.; SILVA F. D.; ASSMANN, T. S.; CARNEIRO, M. C. C.; CARVALHO, P. C. F.; PAULINO, H. P. **Sistemas**

integrados de produção agropecuária no Brasil. Tubarão: Copiart, 2018. p. 107-122

STAMFORD, N. P.; STAMFORD, T. L.; ANDRADE, D. E. G. T.; MICHEREFF, S. J. Microbiota dos solos tropicais. **Ecologia e manejo de patógenos radiculares em solos tropicais.** Recife: Universidade Federal de Pernambuco, p. 61-93, 2005.

STANTON, M. S. Contratos em Sistemas Integrados de Produção Agropecuária. **Revista Direito GV**, v. 18, 25 maio 2022.

TÓTOLA, M. R.; CHAER, G. M. Microrganismos e processos microbiológicos como indicadores da qualidade dos solos. **Tópicos em ciência do solo**, v. 2, n. 3, p. 195-276, 2002.

VILA, V. V.; REZENDE, R.; MALDONADO-SILVA, L. H.; DE FARIA NOCCHI, R. C.; ANDREAN, A. F. B.; WENNECK, G. S.; MATUMOTO-PINTRO, P. T. Microbiota do solo na tolerância de doenças em plantas: Uma revisão. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 8, p., 11 jul. 2021.

WARDLE, David A. Controls of temporal variability of the soil microbial biomass: a global-scale synthesis. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 30, n. 13, p. 1627-1637, 1998.

WARDLE, D. A.; NICHOLSON, K. S.; RAHMAN, A. Influence of herbicide applications on the decomposition, microbial biomass, and microbial activity of pasture shoot and root litter. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, v. 37, n. 1, p. 29-39, 1994.

WRUCK, F. J., BEHLING, M.; ANTONIO, D. B. A. (2015). Sistemas Integrados em Mato Grosso e Goiás. In **Sistemas agroflorestais: a agropecuária sustentável** (p. 169–194).

YANO, É.H.; MAGALHÃES A. R.; ROSABONI, V. M.; MAIOLI, B. M.; PARO, J. V.; MOREIRA, A. A. **Produção de soja em sistema de integração lavoura-pecuária por diferentes manejos do solo.** In: XLIX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola – CONBEA, 2020.

ZHAO, F. Z.; REN, C. J.; ZHANG, L.; HAN, X. H.; YANG, G. H.; & WANG, J. Changes in soil microbial community are linked to soil carbon fractions after afforestation. **European Journal of Soil Science**, v. 69, n. 2, p. 370-379, 2018.

CAPÍTULO 2 – ESTUDO COMPARATIVO DE PARÂMETROS MICROBIOLÓGICOS DO SOLO RELACIONADOS AO CICLO DO CARBONO EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO NA AMAZÔNIA MATO-GROSSENSE

1 INTRODUÇÃO

Em função dos efeitos das mudanças do clima, se faz necessário o uso de sistemas de produção mais complexos, considerando o aumento das produtividades agrícolas juntamente da redução de impactos ambientais, melhorias nas condições do solo, assim como aumento da sua biodiversidade (SEKARAN et al., 2021; COULTER, 2020). Dentre os sistemas de produção, a Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) têm excelente aptidão para utilização para o estado do Mato Grosso, uma vez que todos os componentes do sistema já são cultivados na região (BEHLING et al., 2013).

A intensificação de práticas ecológicas previstos nesta estratégia de produção, como melhor exploração da área produtiva, consórcio e rotação de culturas entre outras, contribui trazendo benefício econômico, assim como ambiental (PEZZOPANE et al., 2018), uma vez que propicia o armazenamento do carbono da atmosfera no solo (SARTO et al., 2020), reduzindo seus impactos para o aquecimento global (KREMEN, 2020; DOS REIS et al., 2021; BAI et al., 2019). Neste contexto, são atividades que reduzem os efeitos das mudanças climáticas, uma vez que contribuem com melhor balanço de carbono global (SANAULLAH et al., 2020; MALHI et al., 2021; JIAN et al., 2020).

A previsibilidade climática tem sido dificultada em função do agravamento do aquecimento global, o que tem aumentado os riscos aos cultivos devido à maior probabilidade de ocorrência de eventos adversos (HASEGAWA et al., 2021; JÄGERMEYR et al., 2021; DIAS, 2014; ALIMONTI et al., 2022; MYHRE et al., 2019). Além disso, práticas agrícolas convencionais contribuem para aumentar a perda de carbono do solo, o que à longo prazo, traz malefícios para a rentabilidade do negócio (ABBAS et al., 2020).

Todavia, sequestrar o carbono no solo pode trazer diversos benefícios, especialmente para regiões tropicais, como o aumento da capacidade de troca

de cátions, melhor agregação e ciclagem de nutrientes (CIOTTA et al., 2003; LEHMANN et al., 2020).

Com maiores teores de carbono orgânico no solo, espera-se que também haja o aumento do mesmo em sua fração microbiana (CUNHA et al., 2011; PROMMER et al., 2020; COONAN et al., 2020; WANG et al., 2021). Portanto, quantificar os teores de carbono do solo, assim como atributos microbiológicos, podem direcionar a adoção de diferentes sistemas de produção. Devido à complexidade de variáveis atuando no sistema, os modelos matemáticos de previsão do comportamento do carbono no solo apresentam baixa acurácia e trabalhos de longa duração são necessários.

Desta forma, o objetivo com o presente trabalho foi quantificar os teores de Carbono da Biomassa Microbiana e Carbono Orgânico Total sob sistemas exclusivos e integrados de produção, analisando a hipótese de que os sistemas integrados aumentam o sequestro de carbono no solo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização do experimento

O experimento foi conduzido na área experimental da Embrapa Agrossilvipastoril, sediada no município de Sinop no estado de Mato Grosso. O mesmo encontra-se nas coordenadas do 11°51' 37" Sul, 55° 37' 25" Oeste, com cerca de 373 metros de altitude.

A região do experimento está situada em área de transição entre os biomas Cerrado e Amazônia. O clima segundo Köppen é tropical (Aw) com inverno seco, com temperatura média anual de 25,4°C e pluviosidade média anual de 1801 mm, com maior intensidade nos meses de dezembro, janeiro, fevereiro e março (CLIMATE-DATA, 2022).

O delineamento experimental é em blocos ao acaso com quatro repetições, totalizando de 78 hectares (ha). O solo é classificado como Latossolo Vermelho Amarelo distrófico típico, com textura argilosa, o horizonte e do tipo A moderado, em um relevo plano (VIANA et al., 2015), conforme disposto na figura 1.

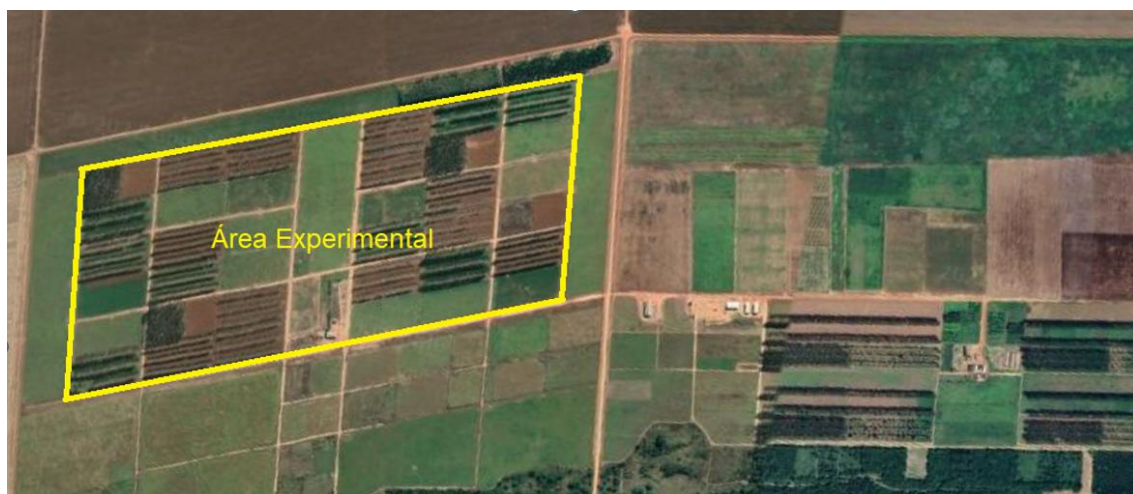


Figura 1. Imagem de satélite da área experimental, demonstrando todos os sistemas de produção estudados (GOOGLE, 2022).

O experimento é parte de um grande projeto que foi implantado em 2010, composto por dez tratamentos, sendo três sistemas de monocultivo e sete sistemas integrados. Para este trabalho, foram considerados 6 tratamentos. A composição agrícola dos mesmos está descrita na tabela 1, e a demonstração dos tratamentos na figura 2.

Tabela 1. Composição agrícola dos sete tratamentos avaliados e suas respectivas culturas de referência no mês de maio de 2022.

Tratamentos	Espécies presentes em 05/2022
1- Floresta (F)	Floresta de eucalipto (<i>Eucalyptus urograndis</i> clone H13), com 952 plantas/ha (espaçamento 3,5 m entre linhas x 3,0 m entre árvores).
2- Lavoura (L)	Lavoura de soja no verão seguida de milho safrinha consorciado com <i>Urochloa brizantha</i> (para formação de palhada). Área com milho 2ª safra no momento da coleta.
3- Pecuária (P)	Pecuária, com estabelecimento de <i>Urochloa brizantha</i> , cultivar Marandu com sistema de recria e engorda de bovinos da raça Nelore. Área com <i>B. brizantha</i> cv. Marandu no momento da coleta.
4- Integração Pecuária-Lavoura (IP-L)	Integração lavoura-pecuária (2 anos com lavoura, conforme sistema L, seguido de 2 anos de pecuária, conforme sistema P, retornando para lavoura por mais 2 anos e assim por diante. Área com milho 2ª safra no momento da coleta.
5- Integração Lavoura-Pecuária (IL-P)	Integração lavoura-pecuária (2 anos com pecuária, conforme sistema P, seguido de 2 anos de lavoura, conforme sistema L, retornando para pecuária por mais 2 anos e assim sucessivamente). Área com <i>B. brizantha</i> cv. Marandu no momento da coleta

6- Integração Lavoura- Pecuária- Floresta (ILPF)	Integração lavoura-pecuária-floresta anual, com renques triplos de eucalipto conforme sistema ILF; anualmente cultivada com lavoura conforme sistema L; após a colheita do milho há produção pecuária, conforme sistema P, no período de entressafra (60 dias). Cultivo de eucalipto, milho 2ºsafra consorciado com <i>B. brizantha</i> no momento da coleta.
---	---



Figura 2. Imagem de Satélite indicando os 6 tratamentos no bloco 4, assim como os demais blocos da estação experimental (GOOGLE, 2022)

2.2 Histórico da área experimental

No ano de 1984 houve a retirada da mata nativa da área experimental, que passou a ser utilizada para o cultivo de mandioca (*Manihot esculenta* Crantz). Na década de 90 passou a ser utilizada para o cultivo do arroz (*Oryza sativa* L.) e, posteriormente, soja (*Glycine max* (L.) Merr.). Entre os anos de 2002 e 2007, soja e milho safrinha (*Zea mays* L.) sob sistema convencional de produção. Nas safras de 2007/2008 e 2008/2009, foi implantado com o sistema de sucessão com soja e algodão (*Gossypium hirsutum* L.), seguido de pousio nas safras 2010/2011 (NETO et al., 2019).

2.3 Amostragem de solo

As amostras de solo foram coletadas, após período chuvoso, em maio de 2022, com auxílio do trado holandês esterilizado com álcool 70%. Todas as amostras foram coletas na profundidade de 0-10 cm.

Em áreas cujos tratamentos foram no sistema de produção exclusivo, as coletas de solo foram realizadas em sentido “V”, com 20 subamostras para formar uma amostra composta.

Nos tratamentos cujos sistemas de produção foram integrados com o componente florestal, as amostragens ocorreram na linha de plantio de eucalipto, à 7,5 e 15 metros de distância, assim como no sentido oposto, totalizando 20 subamostras, conforme Figura 3.

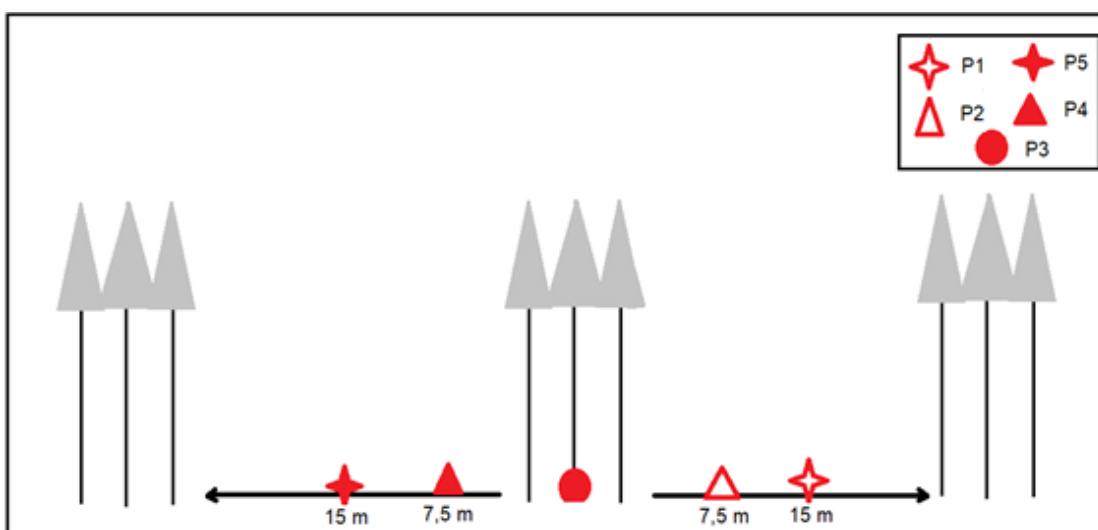


Figura 3. Sistema de coleta de amostras de solo no tratamento ILFP; **P1** - à 15 m de distância das árvores de eucalipto; **P2** - à 7,5 m de distância das árvores de eucalipto; **P3** - Embaixo das árvores de eucalipto; **P4** - à 7,5 m de distância das árvores de eucalipto no sentido oposto ao P1 e P2; e **P5** - à 15 m de distância das árvores de eucalipto no sentido oposto ao P1 e P2.

2.4 Determinação do Carbono da Biomassa Microbiana do solo (CBM)

O Carbono na Biomassa Microbiana do Solo foi obtido pelo método de fumigação e extração, proposto por (VANCE et al., 1987).

As amostras extraídas para determinação do CBM foram analisadas em um analisador de carbono orgânico total (TOC cube, da Elementar Analysensysteme GmbH). O volume de injeção ajustado a 0,2 mL da amostra diluída (1:1) com água destilada. A coluna de combustão foi mantida a 690 °C durante a análise, e os compostos foram medidos por detector de infravermelho

próximo (NDIR). Foi realizada uma curva de calibração (20 a 100 ppm de C) com biftalato de potássio.

Para calcular o valor da concentração de carbono na amostra de solo, foram utilizadas as seguintes fórmulas:

$$C(\text{mg.Kg}^{-1}) = \frac{50 - Fd.C}{m.(100-U)} \cdot 100$$

Fd = Fator de diluição da amostra analisada no TOC

C = Concentração da amostra analisada no TOC (ppm)

m = Massa da amostra (gramas)

U = Umidade da amostra em (%)

$$C \text{ biomassa (mg de C.kg}^{-1} \text{ de solo seco)} = \frac{C_f - C_{nf}}{k_{ec}}$$

C_f = Concentração de carbono na amostra fumigada ou irradiada (ppm)

C_{nf} = Concentração de carbono na amostra não fumigada (ppm)

k_{ec} = Constante CFE 0,35

2.5 Determinação do Carbono Orgânico Total do solo (COT)

A quantificação do carbono foi realizada em analisador CHNS Elementar (modelo vario MACRO cube CHNS, Elementar, Hanau/Alemanha). As amostras de solo foram secas ao ar, destorroadas, maceradas em almofariz de ágata e passadas em peneira de 2 mm de malha.

Em seguida, em folhas de estanho, foram pesados aproximadamente 50 mg de solo para cada sub-amostra. As folhas foram então dobradas de forma a circundar todo o material e em seguida transferidas para a plataforma de recebimento.

No aparelho, as amostras foram aquecidas a 1000°C, provocando a volatilização (queima total) dos compostos carbônicos e nitrogenados presentes nos solos. Uma vez na forma gasosa, a separação foi realizada pelo sistema

TPD (dessorção programada por temperatura) e a detecção dos gases foi realizada pelo sensor TCD (detector de condutividade térmica).

2.6 Determinação do Quociente Microbiano (Qmic)

Para calcular o valor do Quociente Microbiano (Qmic), foi utilizado a seguinte fórmula:

$$Qmic = \frac{CBM}{COT} \cdot 100$$

Qmic = Quociente Microbiano em %

CBM = Carbono da Biomassa Microbiana (em mg/kg de solo seco)

COT = Carbono Orgânico Total (em mg/kg de solo seco)

2.7 Análise Estatística

O delineamento experimental utilizado no experimento foi em blocos ao acaso (DBC). A normalidade foi verificada através do teste de Shapiro-Wilk e homogeneidade pelo teste de Oneill e Mathews, para então serem submetidas ao teste (ANOVA), com médias comparadas pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade de erro.

Foi utilizado o teste de Tukey ao nível de 5% de significância para comparar as médias dos tratamentos. Além disso, foram conduzidas Correlação de Pearson para demonstrar as relações matemáticas entre variáveis. Os dados foram analisados no software SISVAR 5.8 (FERREIRA, 2018).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Carbono da Biomassa Microbiana (CBM) do solo

Foram observados maiores valores de CBM no tratamento Lavoura (459 mg C. kg⁻¹), enquanto os menores valores foram encontrados no tratamento Floresta (170 mg C.kg⁻¹) (Figura 4). Os tratamentos Pecuária e Integração Lavoura-Pecuária apresentaram valores intermediários de CBM (p= 0,0001) (Figura 4).

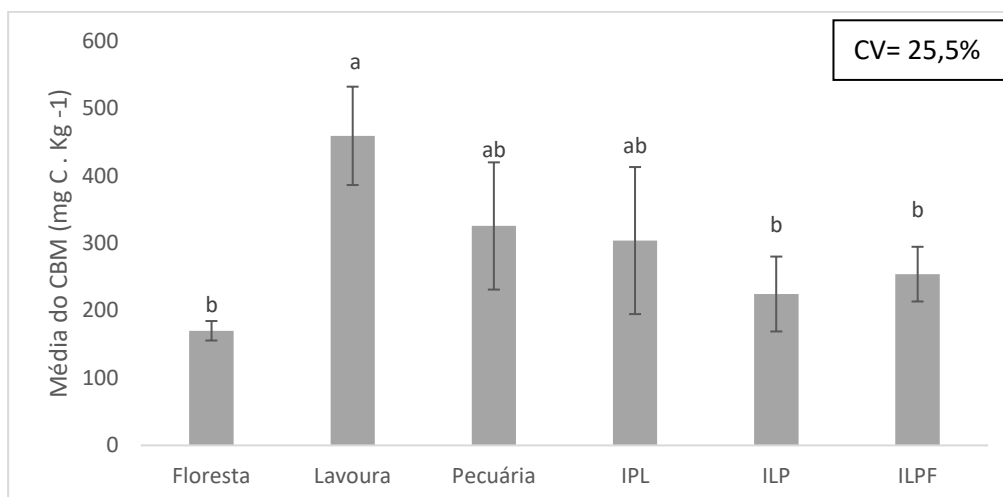


Figura 4. Carbono da Biomassa Microbiana dos diferentes sistemas de produção. Tratamentos: **Floresta** (F); **Lavoura** (L); **Pecuária** (P); **Integração Pecuária-Lavoura** (IPL); **Integração Lavoura-Pecuária** (ILP); **Integração Lavoura-Pecuária-Floresta** (ILPF). Letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey 5%.

Uma das razões para o elevado valor de CBM no tratamento lavoura, é que a soja cultivada anteriormente promoveu a incorporação de resíduos de baixa relação C/N no solo, resultando em um crescimento acelerado na atividade microbiana e consequente liberação de nutrientes, satisfazendo a cultura subsequente no esquema de rotação (RAO et al., 2019).

Outro aspecto a ser considerado são os produtos da exsudação radicular, que podem variar em função da qualidade, intensidade e estágio fenológico das plantas (GRANSEE e WITTENMAYER, 2000), e modular a estrutura das comunidades microbianas (BAUDOIN et al., 2003). As coletas de solo na cultura do milho foram realizadas no estágio fenológico R2, momento este cuja exsudação radicular encontra-se elevada (GAO et al., 2020) (LEI et al., 2022) (MO et al., 2021) (MA et al., 2022), contribuindo para os altos valores de CBM encontrados.

A relação C/N mais elevada das gramíneas implica em maior permanência dos seus resíduos no solo (MENEZES; LEANDRO, 2004). As gramíneas suplementadas com nitrogênio em cobertura tendem a proporcionar valores mais elevados de CBM (WENDLAND et al., 2010).

De acordo com Marchão et al. (2020), em áreas de Integração Lavoura-Pecuária, ocorre uma maior imobilização de nitrogênio pelas pastagens na

entressafra de grãos, o que vem a reduzir a disponibilidade deste nutriente para a biomassa microbiana, responsável por processos de nitrificação e desnitrificação. Singh et al. (1989) concluíram que sistemas de produção nutricionalmente pobres atuam como drenos e fontes de nutrientes, o que pode justificar os valores menores de CBM nos sistemas integrados com pastagens.

Doses mais elevadas de fertilizantes nitrogenados foram aplicadas nos tratamentos contendo a cultura do milho se comparadas às pastagens e eucalipto. Gao et al. (2014) observaram que a adubação nitrogenada estimulou a atividade de algumas comunidades microbianas do solo de forma não linear. Zhao et al. (2015), concluíram que a biomassa microbiana do solo aumenta com o plantio de leguminosas, e que a resposta à adubação mineral nitrogenada foi maximizada em doses moderadas, enquanto Zhu et al. (2016) concluiu que o fornecimento de fertilizantes nitrogenados à cultura do milho contribui para a maior exsudação radicular além de alterar a estrutura da comunidade microbiana, assim como sua abundância.

Em meta análise sobre aplicação de nitrogênio e seus efeitos sob microrganismos do solo, Treseder (2008), concluiu que a aplicação do elemento reduz a biomassa microbiana à longo prazo, porém, um aumento da biomassa microbiana pode ocorrer caso o elemento fornecido esteja em quantidade inferior ao exigido pela comunidade microbiana.

Com a sucessão de cultura soja-milho, a decomposição da cultura antecessora disponibiliza N para a cultura subsequente, e para a biomassa microbiana (FERREIRA et al., 2007). O sistema de plantio direto com sucessão leguminosa/milho é o que melhor propicia condições favoráveis ao desenvolvimento de microrganismos no solo, possivelmente devido à fixação biológica de nitrogênio (BARBOSA, 2015).

A biomassa microbiana pode variar em função de fontes nutricionais do elemento (LI et al., 2013b). Petter et al. (2019) concluíram que a adição de insumos ricos em carbono, como o biocarvão, reduziu o teor de nitrogênio da biomassa microbiana e elevou o carbono da biomassa microbiana. O elevado teor de carbono presente no insumo leva à imobilização temporária do N pela comunidade microbiana (LEHMANN et al., 2003).

Vargas et al. (2004) verificou que a segunda aplicação de ureia favoreceu a população bacteriana em relação à fúngica, demonstrando que a adubação nitrogenada altera a estrutura da comunidade microbiana, diminuindo a relação C/N e aumentando a imobilização pela biomassa microbiana (VARGAS et al., 2004; MERCANTE et al., 2004).

Apesar dos valores elevados no tratamento exclusivo lavoura, a microbiota associada à rizosfera em monoculturas sucessivas tende à declínio na diversidade de funções, com possíveis consequências negativas à performance da cultura (LI et al., 2019a).

O consórcio de leguminosas e gramíneas em regiões semiáridas resultou em melhorias nos valores de CBM e respiração do solo. Neste sistema o sombreamento promove incremento no aporte do carbono microbiano, sendo recomendada a introdução desta prática de manejo (MENEZES, 2015).

Os tratamentos contendo componentes florestais apresentaram menores valores de CBM. A cultura do eucalipto influencia o sistema negativamente aumentando o sombreamento e liberação de substâncias alelopáticas através de exsudatos radiculares e lixiviados de folhas, diminuindo a diversidade de espécies vegetais (RAJ et al., 2016), e quando comparados com mata nativa ou outros sistemas de produção, seus valores de CBM costumam ser menores (XU et al., 2022; ZHU et al., 2019), especialmente com o passar dos anos de cultivo (MALLEN-COOPER et al., 2022).

Além disso, a cultura fornece material de alta relação C/N, contribuindo para um menor fornecimento de N, conseqüentemente menor crescimento da biomassa microbiana, (NOGUEIRA et al. 2006).

Apesar do tratamento Lavoura apresentar maior valor absoluto de CBM se comparado aos Integrados, a maior diversidade de espécies em cobertura vegetal pode contribuir com um microbioma de solo mais robusto quando bem implantadas (KIM et al., 2020)

3.2 Carbono Orgânico Total (COT) do solo

Foram observados maiores valores de COT no tratamento Pecuária (3,05%), enquanto os menores valores foram encontrados no tratamento Floresta (2,34%) (Figura 5). Os tratamentos Lavoura, IPL, ILP e ILPF e Integração Lavoura-Pecuária apresentaram valores intermediários de COT ($p=0,0020$) (Figura 5).

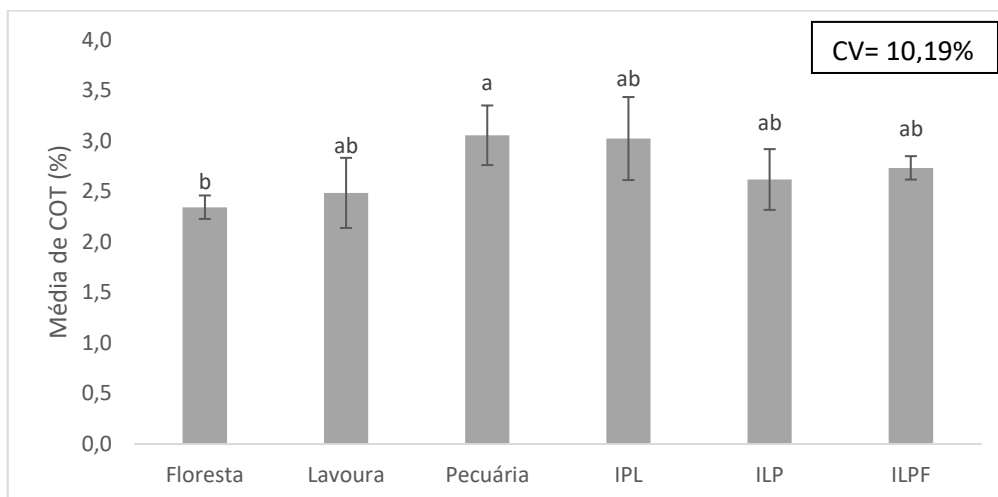


Figura 5. Carbono da Orgânico Total dos diferentes sistemas de produção. Tratamentos: **Floresta (F)**; **Lavoura (L)**; **Pecuária (P)**; **Integração Pecuária-Lavoura (IPL)**; **Integração Lavoura-Pecuária (ILP)**; **Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF)**. Letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey 5%.

A adição de nutrientes no solo pode ser favorável ao aumento dos teores de carbono orgânico total, mantendo os níveis de matéria orgânica através do fornecimento de carbono via plantas para crescimento da microbiota. (CHOWDHURY et al., 2020). Neste sentido, a incorporação de resíduos vegetais com elevada relação C:N, como no caso da *Urochloa brizantha*, pode estimular uma rápida imobilização do nitrogênio pela atividade microbiana, e consequentemente à um maior sequestro de carbono (RAO et al., 2019).

Em relação às pastagens, alguns estudos atribuíram melhoria gradual nos atributos biológicos do solo nas pastagens bem manejadas devido ao denso sistema radicular, à deposição de matéria orgânica no solo e de nutrientes via fezes e urina e ao aumento no aporte de C da fotossíntese de plantas C4 (NICODEMO, 2009).

Valores semelhantes de COT na profundidade de 0-10 cm foram encontrados por Sales et al. (2018), ao comparar sistemas de produção ILPF com monocultura de pastagens e plantio convencional de milho, onde a pastagem apresentava valores maiores, seguidos de monocultura de grãos não diferindo estatisticamente do sistema ILPF completo.

Silva et al. (2018) ao comparar valores de carbono na profundidade de 0-10 cm em sistemas de produção ILPF, monocultivo de eucalipto e sistema Santa Fé também não encontrou diferenças significativas nos teores de COT, porém esta diferença se pronunciou ao analisar camadas mais profundas.

Para Wardle (1998), os efeitos estabilizadores do aumento do carbono orgânico no solo e pH contribuem para mitigarem estresse à comunidade microbiana. Mais espécies de microrganismos podem eventualmente desempenhar a mesma função metabólica, reduzindo eventuais perturbações no agroecossistema. (LOUCA et al., 2018)

As florestas concentram grande parte do carbono acima do solo, enquanto as pastagens apresentam elevado aporte deste elemento nas raízes (LAL et al., 2002), que podem aproveitar adubações destinadas à mesma ou à cultura anual, especialmente em sistemas de produção integrados (DE SOUZA et al., 2018).

Dentre todos os sistemas de produção, o monocultivo de eucalipto apresentou o menor acúmulo de carbono orgânico no solo aos dois anos de cultivo apresentou o menor acúmulo de carbono orgânico no solo (SILVA et al., 2016).

Deve-se ressaltar que os componentes florestais contribuem com o sequestro de carbono em maiores profundidades se comparados às pastagens (OLIVEIRA et al., 2021), além de possuir elevado acúmulo de carbono imobilizado em sua biomassa acima e abaixo do solo (MÜLLER et al., 2010), porém estas não foram levadas em consideração neste trabalho.

É possível aumentar a eficiência do sequestro de carbono utilizando espécies fixadoras de nitrogênio juntamente com o eucalipto, aumentando teores de CBM, COT, diversidade e abundância microbiana. (HUANG et al., 2014).

Devido à dinâmica entre CBM e COT em função do manejo, seus valores podem variar entre si, o que pode eventualmente reduzir esta correlação. Arndt

(2016) encontrou resultados que não apresentaram correlação entre o COT e a CBM, demonstrando que existem outros fatores envolvidos no incremento da Biomassa Microbiana do Solo (BMS) além da quantidade de carbono no sistema.

Para Cunha et al (2011), maior quantidade de CBM reflete a presença de maior quantidade de matéria orgânica ativa no solo, sendo esta capaz de manter elevada a taxa de decomposição de restos vegetais e aumentar a reciclagem de nutrientes. Os autores encontraram alto índice de correlação entre CBM e COT, indicando que a BMS acompanhou as mudanças na concentração de matéria orgânica.

3.3 Quociente Microbiano (Qmic) do solo

Foram observados maiores valores de Qmic no tratamento Lavoura (1,86%), enquanto os menores valores foram encontrados no tratamento Floresta (0,73%) (Figura 6). Os tratamentos Pecuária, IPL, ILP e ILPF apresentaram valores intermediários de Qmic ($p = 0,0001$) (Figura 6).

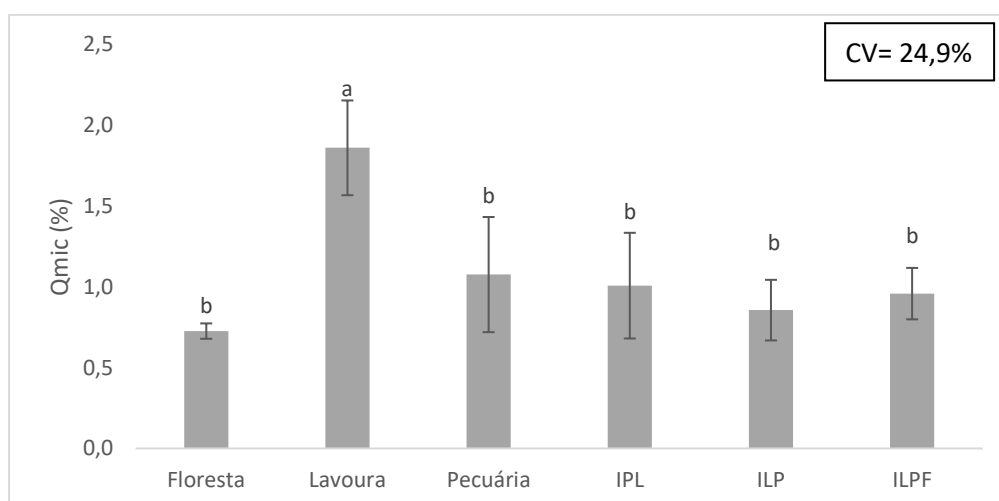


Figura 6. Quociente microbiano dos sistemas de produção. Tratamentos: **Floresta (F); Lavoura (L); Pecuária (P); Integração Pecuária-Lavoura (IPL); Integração Lavoura-Pecuária (ILP); Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF).** Letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey 5%.

O Qmic indica o padrão de aporte da matéria orgânica, isto é, se o carbono se mantém estável, ou sofre variação em função de condições impostas ao sistema (TÓTOLA e CHAER, 2002). Elevados valores de Qmic indicam uma alta

atividade metabólica dos microrganismos ou que estes estiveram sobre estresse ambiental (WARDLE, 1992).

O cultivo de culturas anuais se dá em ambientes com melhores níveis nutricionais e controle de acidez se comparados a áreas com pastagem ou floresta. Jakelaitis et al. (2008) também encontrou maiores valores de Qmic em lavouras com cultivo de soja se comparado à pastagem e mata em Argisolo Vermelho-Amarelo.

O sistema sucessão soja/milho apresentou, os maiores valores de CBM e Qmic, indicando que sistemas de plantio direto intensivos e bem conduzidos podem contribuir para a manutenção da biota do solo (Arndt, 2016)

Os menores valores de Qmic encontrados foram no tratamento Floresta. Estes valores podem estar associados à acidez do solo, limitação nutricional, ou a qualidade da matéria orgânica comparando-se ao tratamento Lavoura.

Em estudo avaliando parâmetros microbiológicos em florestas naturais, regeneradas ou plantadas em solo tropical, Behera e Sahani (2001) concluíram que a monocultura do eucalipto demonstrou os menores valores de CBM e Qmic

O mesmo autor afirmou que baixos valores de CBM e Qmic podem indicar que está havendo alguma degradação do solo, podendo esta ser decorrente de interferências antrópicas anteriores a instalação ou a manejos inadequados dos mesmos.

Os valores de Qmic encontrados são ligeiramente superiores do que os obtidos por Perez et al (2004) e coser (2007), situados entre 0,73 e 1,85%. De acordo com Jenkinson e Ladd (1981), o Qmic deve variar entre 1 e 4%, onde valores inferiores a 1% podem indicar algum fator limitante à atividade microbiana.

Apesar dos elevados índices de CBM e Qmic no tratamento lavoura, Stone et al. (2013) verificaram que o Qmic apresentou correlação negativa com a produtividade em leguminosa, uma vez que estes valores podem ser indicativos de ecossistemas submetidos às situações de estresse ou eventuais distúrbios à comunidade microbiana (ANDERSON e DOMSCH, 1993).

4 CONCLUSÃO

1. O sistema de produção utilizado influencia os teores de CBM, COT e Qmic, demonstrando diferentes potenciais de sequestro de carbono atmosférico.

2. O sistema Lavoura demonstrou maiores valores absolutos de CBM e Qmic se comparado aos sistemas integrados ILP, ILPF e ao exclusivo F.

3. O sistema Pecuária demonstrou maiores valores absolutos de COT se comparado ao ILP, IPL, Floresta e Lavoura.

4. Não foi possível observar diferença estatística dos valores de COT entre os sistemas de produção integrados e exclusivos.

5 REFERÊNCIAS

- ABBAS, F.; HAMMAD, H. M.; ISHAQ, W.; FAROOQUE, A. A.; BAKHAT, H. F.; ZIA, Z.; CERDÀ, A. A review of soil carbon dynamics resulting from agricultural practices. **Journal of environmental management**, v. 268, p. 110319, 2020.
- ALIMONTI, G.; MARIANI, L.; PRODI, F.; RICCI, R. A. A critical assessment of extreme events trends in times of global warming. **The European Physical Journal Plus**, v. 137, n. 1, p. 1-20, 2022.
- ANDERSON, T. H.; DOMSCH, K. H. The metabolic quotient for CO₂ (qCO₂) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. **Soil biology and biochemistry**, v. 25, n. 3, p. 393-395, 1993.
- ARNDT, Jorge Rodrigo. Bioindicadores da qualidade do solo em diferentes sistemas produtivos, 2016.
- BAI, X.; HUANG, Y.; REN, W.; COYNE, M.; JACINTHE, P. A.; TAO, B.; MATOCHA, C. Responses of soil carbon sequestration to climate-smart agriculture practices: A meta-analysis. **Global change biology**, v. 25, n. 8, p. 2591-2606, 2019.
- BAUDOIN, E; BENIZRI, E; GUCKERT, A. Impact of artificial root exudates on the bacterial community structure in bulk soil and maize rhizosphere. **Soil biology and biochemistry**, v. 35, n. 9, p. 1183-1192, 2003.
- BARBOSA, Marcelo de Andrade. Atributos microbiológicos do solo em sistemas de manejo de longa duração. 2015.
- BARETTA, D.; SANTOS, J. C. P.; FIGUEIREDO, S. R.; KLAUBERG-FILHO, O. Efeito do monocultivo de Pinus e da queima do campo nativo em atributos biológicos do solo no Planalto Sul Catarinense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo [online]**. 2005, v. 29, n. 5.
- BEHLING, M.; CARVALHO, G. D.; FELIPE, R. T. A.; FARIAS, J. B.; CAMARGO, D. Produtividade e características fisiológicas da soja na ILPF. **Embrapa Agrossilvipastoril-Capítulo em livro científico (ALICE)**, 2019.
- BEHLING, M et al. Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF). In **Embrapa Agrossilvipastoril-Capítulo em livro Científico (ALICE)**; Sede da Embrapa: Rondonópolis, Mato Grosso, Brazil, 2013.
- COSER, T. R.; RAMOS, M. L. G.; AMABILE, R. F.; RIBEIRO JÚNIOR, W. Q. Nitrogênio da biomassa microbiana em solo de Cerrado com aplicação de fertilizante nitrogenado. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 42, p. 399-406, 2007.
- CATTELAN, A. J.; VIDOR, C. Flutuações na biomassa, atividade e população microbiana do solo, em função de variações ambientais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 14, n. 2, p. 133-142, 1990.
- CHOWDHURY, S.; BOLAN, N.; FARRELL, M.; SARKAR, B.; SARKER, J. R.; KIRKHAM, M. B.; KIM, G. H Role of cultural and nutrient management practices

in carbon sequestration in agricultural soil. **Advances in agronomy**, v. 166, p. 131-196, 2021.

CIOTTA, M. N.; BAYER, C.; FONTOURA, S. M. V.; ERNANI, P. R.; ALBUQUERQUE, J. A. Matéria orgânica e aumento da capacidade de troca de cátions em solo com argila de atividade baixa sob plantio direto. **Ciência Rural**, v. 33, n. 6, p. 1161-1164, 2003.

COONAN, E. C.; KIRKBY, C. A.; KIRKEGAARD, J. A.; AMIDY, M. R.; STRONG, C. L.; RICHARDSON, A. E. Microorganisms and nutrient stoichiometry as mediators of soil organic matter dynamics. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 117, n. 3, p. 273-298, 2020.

CUNHA, E. D. Q.; STONE, L. F.; FERREIRA, E. P. D. B.; DIDONET, A. D.; MOREIRA, J. A. A.; LEANDRO, W. M. Sistemas de preparo do solo e culturas de cobertura na produção orgânica de feijão e milho: I-Atributos físicos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 589-602, 2011.

DE SOUZA, E. D.; DA SILVA, F. D.; PACHECO, L. P.; LAROCA, J. D. S. V.; DE SOUZA, J. M. A.; DE ANDRADE BONETTI, J. **Matéria orgânica do solo em sistemas integrados de produção agropecuária no Brasil**. 2018.

DIAS, M. A. F. da S. Eventos Climáticos Extremos. **Revista USP**, (103), 33-40, 2014.

DOS REIS, J. C.; RODRIGUES, G. S.; DE BARROS, I.; RODRIGUES, R. D. A. R.; GARRETT, R. D.; VALENTIM, J. F.; SMUKLER, S. Integrated crop-livestock systems: A sustainable land-use alternative for food production in the Brazilian Cerrado and Amazon. **Journal of Cleaner Production**, v. 283, p. 124580, 2021.

FARIAS NETO, A. L.; MAGALHÃES, C. D. S.; BEHLING, M.; ANTONIO, D.; TONINI, H.; MENEGUCI, J.; DIEHL, D. Sombreamento de soja e milho em sistemas de produção ILPF no norte de Mato Grosso. **Embrapa Agrossilvipastoril-Capítulo em livro científico (ALICE)**, 2019

FERREIRA, D. F. **Sisvar: a computer statistical analysis system**. Versão 5.8, 2018.

FERREIRA, E. A. B.; RESCK, D. V. S.; GOMES, A. C.; RAMOS, M. L. G. Dinâmica do carbono da biomassa microbiana em cinco épocas do ano em diferentes sistemas de manejo do solo no cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 1625-1635, 2007.

FIERER, N.; SCHIMEL, J. P.; HOLDEN, P. A. Variations in microbial community composition through two soil depth profiles. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 35, n. 1, p. 167-176, 2003.

GAMA-RODRIGUES, E. F. D.; BARROS, N. F. D.; GAMA-RODRIGUES, A. C. D.; SANTOS, G. D. A. Nitrogênio, carbono e atividade da biomassa microbiana do solo em plantações de eucalipto. **Revista brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 893-901, 2005.

GAO, F.; HU, J.; REN, B.; LIU, P.; ZHAO, B.; ZHANG, J. Improving soil properties and grains yield of winter wheat and summer corn under residue management strategies. **Agronomy Journal**, v. 112, n. 5, p. 4287-4302, 2020.

GAO, F.; HU, J.; REN, B.; LIU, P.; ZHAO, B.; ZHANG, J. Short-term response of soil respiration to nitrogen fertilization in a subtropical evergreen forest. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 76, p. 297-300, 2014.

GRANSEE, A; WITTENMAYER, L. Qualitative and quantitative analysis of water-soluble root exudates in relation to plant species and development. **Journal of plant nutrition and soil science**, v. 163, n. 4, p. 381-385, 2000.

GUTMANIS, Daina. **Estoque de carbono e dinâmica ecofisiológica em sistemas silvipastoris**. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas). Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Rio Claro, 2005.

HASEGAWA, T.; SAKURAI, G.; FUJIMORI, S.; TAKAHASHI, K.; HIJIOKA, Y.; MASUI, T. Extreme climate events increase risk of global food insecurity and adaptation needs. **Nat Food** 2, p. 587–595 2021.

HOFFMANN, R. B.; MOREIRA, E. E. A.; HOFFMANN, G. S. S.; ARAUJO, N. S. F. Efeito do manejo do solo no carbono da biomassa microbiana. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 1, p. 168-178, 2018.

HUANG, X., LIU, S., WANG, H., HU, Z., LI, Z., & YOU, Y. Changes of soil microbial biomass carbon and community composition through mixing nitrogen-fixing species with Eucalyptus urophylla in subtropical China. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 73, p. 42-48, 2014.

JÄGERMEYR, J.; MÜLLER, C.; RUANE, A. C.; ELLIOTT, J.; BALKOVIC, J.; CASTILLO, O.; ROSENZWEIG, C. Climate impacts on global agriculture emerge earlier in new generation of climate and crop models. **Nat Food** 2, 873–885, 2021.

JAKELAITIS, A.; DA SILVA, A. A.; DOS SANTOS, J. B.; & VIVIAN, R. Qualidade da camada superficial de solo sob mata, pastagens e áreas cultivadas. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 38, n. 2, p. 118-127, 2008.

JENKINSON, D. S.; LADD, J. N. Microbial biomass in soil: measurement and turnover. In: PAUL, E. A.; LADD, J. N. (Ed.). **Soil Biochemistry**. New York: Marcel Dekker, 1981.p. 415-471.

JIAN, J.; DU, X.; REITER, M. S.; STEWART, R. D. A meta-analysis of global cropland soil carbon changes due to cover cropping. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 143, p. 107735, 2020.

KAISER, E. A.; HEINEMEYER, O. Seasonal variations of soil microbial biomass carbon within the plough layer. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 25, n. 12, p. 1649-1655, 1993.

KANE, D.; SOLUTIONS, L. L. C. Carbon sequestration potential on agricultural lands: a review of current science and available practices. **National Sustainable Agriculture Coalition Breakthrough Strategies and Solutions**, LLC, p. 1-35, 2015.

KREMEN, C. Ecological intensification and diversification approaches to maintain biodiversity, ecosystem services and food production in a changing world. **Emerging Topics in Life Sciences**, v. 4, n. 2, p. 229-240, 2020.

LAL, R. Soil carbon dynamics in cropland and rangeland. **Environmental pollution**, v. 116, n. 3, p. 353-362, 2002.

LEHMANN, J.; HANSEL, C. M.; KAISER, C.; KLEBER, M.; MAHER, K.; MANZONI, S.; KÖGEL-KNABNER, I. Persistence of soil organic carbon caused by functional complexity. **Nat. Geosci.** **13**, p. 529–534, 2020.

LEHMANN, J.; PEREIRA, J. S.; STEINER, C.; NEHLS, T.; ZECH, W.; GLASER, B. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. **Plant and soil**, v. 249, n. 2, p. 343-357, 2003.

LEI, Z. H. O. U.; XU, S. T.; MONREAL, C. M.; MCLAUGHLIN, N. B.; ZHAO, B. P.; LIU, J. H.; HAO, G. C. Bentonite-humic acid improves soil organic carbon, microbial biomass, enzyme activities and grain quality in a sandy soil cropped to maize (*Zea mays* L.) in a semi-arid region. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 21, n. 1, p. 208-221, 2022.

LEPCHA, N. T.; DEVI, N. B. Effect of land use, season, and soil depth on soil microbial biomass carbon of Eastern Himalayas. **Ecological processes**, v. 9, n. 1, p. 1-14, 2020.

LI, F.; LIU, M.; LI, Z.; JIANG, C.; HAN, F.; & CHE, Y. Changes in soil microbial biomass and functional diversity with a nitrogen gradient in soil columns. **Applied Soil Ecology**, v. 64, p. 1-6, 2013.

LI, X.; JOUSSET, A.; DE BOER, W.; CARRIÓN, V. J.; ZHANG, T.; WANG, X.; KURAMAE, E. E. Legacy of land use history determines reprogramming of plant physiology by soil microbiome. **The ISME journal**, v. 13, n. 3, p. 738-751, 2019.

LOUCA, S.; POLZ, M. F.; MAZEL, F.; ALBRIGHT, M. B.; HUBER, J. A.; O'CONNOR, M. I.; PARFREY, L. W. Function and functional redundancy in microbial systems. **Nature ecology & evolution**, v. 2, n. 6, p. 936-943, 2018.

MA, J.; WANG, W.; YANG, J. Mycorrhizal symbiosis promotes the nutrient content accumulation and affects the root exudates in maize. **BMC Plant Biol** **22**, 64 (2022).

MALLEN-COOPER, M.; ATKINSON, J.; XIROCOSTAS, Z. A.; WIJAS, B.; CHIARENZA, G. M.; DADZIE, F. A.; ELDRIDGE, D. J. Global synthesis reveals strong multifaceted effects of eucalypts on soils. **Global Ecology and Biogeography**, v. 31, n. 8, p. 1667-1678, 2022.

MALHI, Y.; GIRARDIN, C.; METCALFE, D. B.; DOUGHTY, C. E.; ARAGÃO, L. E.; RIFAI, S. W.; PHILLIPS, O. L. The Global Ecosystems Monitoring network: Monitoring ecosystem productivity and carbon cycling across the tropics. **Biological Conservation**, v. 253, p. 108889, 2021.

MARCHÃO, R. L.; de CARVALHO, A. M.; de OLIVEIRA, A. D.; VILELA, L.; ALCÂNTARA, G.; SATO, M. J. H.; ALVES, B. J. R.; **Balanço de carbono e dinâmica de gases de efeito estufa em sistemas de Integração Lavoura-Pecuária no Cerrado**. 2020.

MENEZES, L. A. S.; LEANDRO, W. M. Avaliação de espécies de coberturas do solo com potencial de uso em sistema de plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 34, n. 3, p. 173-180, 2004.

MENEZES, K. M. S. **Impacto do sombreamento e do consórcio de gramínea e leguminosa sobre os atributos bioquímicos e a comunidade microbiana do solo**. Tese (Mestrado em Ciência Animal) – Universidade Federal do Vale do São Francisco. Petrolina, 2015.

MO, Chaoyang et al. Microbial metabolic efficiency functions as a mediator to regulate rhizosphere priming effects. **Science of The Total Environment**, v. 759, p. 143488, 2021.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e Bioquímica do Solo**. Editora Ufla, 2006.

MÜLLER, M. D.; FERNANDES, E. N.; CASTRO, C. R. T.; PACIULLO, D. S. C.; ALVES, F. de F. Estimativa de Acúmulo de Biomassa e Carbono em Sistema Agrossilvipastoril na Zona da Mata Mineira. **Pesquisa Florestal Brasileira**, [S. l.], n. 60, p. 11, 2010.

MYHRE, G., ALTERSKJÆR, K., STJERN, C.W. *et al.* Frequency of extreme precipitation increases extensively with event rareness under global warming. **Sci Rep** 9, 16063 (2019).

NICODEMO, Maria Luiza Franceschi. Uso de biomassa microbiana para avaliação de qualidade do solo em sistemas silvipastoris. **Embrapa Pecuária Sudeste-Documents (INFOTECA-E)**, 2009.

NOGUEIRA, M. A. et al. Promising indicators for assessment of agroecosystems alteration among natural, reforested and agricultural land use in southern Brazil. **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 115, n. 1-4, p. 237-247, 2006.

OLIVEIRA, J. D. M., MADARI, B. E., ASSIS, P. C. R., SILVEIRA, A. L. R., & WRUCK, F. J. (2021). Soil carbon in integrated agricultural production systems in the Cerrado-Amazon transition area.

OKADA, A. S. et al. **Perfil metabólico microbiano em solos sob sistemas de produção integrados no estado de Mato Grosso**. Tese (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal do Mato Grosso, Sinop, 2019.

PETTER, Fabiano André et al. Microbial biomass and organic matter in an oxisol under application of biochar. **Bragantia** [online]. 2019, v. 78, n. 1.

PEZZOPANE, J. R. M.; OLIVEIRA, P.; BERNARDI, A. D. C.; VINHOLIS, M. D. Benefícios ambientais e agronômicos da adoção de sistemas integrados de produção pecuária. *In*: 56º CONGRESSO SOBER., 2018., Campinas **Anais Eletrônicos** [...]. Campinas, 2018.

PROMMER, J.; WALKER, T. W.; WANEK, W.; BRAUN, J.; ZEZULA, D.; HU, Y.; RICHTER, A. Increased microbial growth, biomass, and turnover drive soil organic carbon accumulation at higher plant diversity. **Global change biology**, v. 26, n. 2, p. 669-681, 2020.

RAJ, A.; JHARIYA, M. K.; BARGALI, S. S. Bund based agroforestry using eucalyptus species: a review. **Current Agriculture Research Journal**, v. 4, n. 2, p. 148, 2016.

RAO, D. L. N.; APARNA, K. & MOHANTY, S. (2019). **Microbiology and Biochemistry of Soil Organic Matter, Carbon Sequestration and Soil Health**.

SALES, A., SILVA, A. R., VELOSO, C. A. C., CARVALHO, E. J. M., & MIRANDA, B. M. Carbono orgânico e atributos físicos do solo sob manejo agropecuário sustentável na Amazônia Legal. **Colloquium Agrariae**. ISSN: 1809-8215, 14(1), 01–15, 2018.

SAHANI, U.; BEHERA, N. Impact of deforestation on soil physicochemical characteristics, microbial biomass and microbial activity of tropical soil. **Land Degradation & Development**, v. 12, n. 2, p. 93-105, 2001.

SANAULLAH, M.; USMAN, M.; WAKEEL, A.; CHEEMA, S. A.; ASHRAF, I.; FAROOQ, M. Terrestrial ecosystem functioning affected by agricultural management systems: A review. **Soil and Tillage Research**, v. 196, p. 104464, 2020.

SARTO, M. V.; BORGES, W. L.; SARTO, J. R.; RICE, C. W.; ROSOLEM, C. A. Deep soil carbon stock, origin, and root interaction in a tropical integrated crop–livestock system. **Agroforestry Systems**, v. 94, n. 5, p. 1865-1877, 2020.

SEKARAN, U.; LAI, L.; USSIRI, D. A.; KUMAR, S.; CLAY, S. Role of integrated crop-livestock systems in improving agriculture production and addressing food security—A review. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 5, p. 100190, 2021.

SILVA, A. R.; SALES, A.; VELOSO, C. A. C. **Atributos físicos e disponibilidade de carbono do solo em sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF), Homogêneo e Santa Fé, no estado do Pará, Brasil**. 2016.

SINGH, J. S. et al. Microbial biomass acts as a source of plant nutrients in dry tropical forest and savanna. **Nature**, v. 338, n. 6215, p. 499-500, 1989.

SINGH, S. P. et al. Conservation agriculture effects on aggregates carbon storage potential and soil microbial community dynamics in the face of climate change under semi-arid conditions: a review. **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**, v. 8, n. 2, p. 59-69, 2019.

SOUZA, A. G. V., SILVA, G. G., BESERRA, G. A., SOUZA, L. A., OLIVEIRA JÚNIOR, V. D., ROCHA FILHO, C. T., SERAFIM, M. N., SANTOS, L. C. S., SANTOS, T. E. B., & VALE, V. S. (2021). Atributos microbiológicos do solo sob áreas eucalipto e florestas estacionais. **Scientia Forestalis**, 49(132), e3673. <https://doi.org/10.18671/scifor.v49n132.03>

STIEVEN, A. C., MENDES, W. M., WRUCK, F., COUTO, E. G.; DA SILVA CAMPOS, D. T. (2020, May). Atributos do Solo em Sistemas Diferenciados de Uso e Manejo do Solo. In **Colloquium Agrariae**. ISSN: 1809-8215 (Vol. 16, No. 2, pp. 1-15).

STONE, Luís F. et al. Correlação entre a produtividade do feijoeiro no sistema de produção orgânica e atributos do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, p. 19-25, 2013.

SUN, W.; CANADELL, J. G.; YU, L.; YU, L.; ZHANG, W.; SMITH, P.; HUANG, Y. Climate drives global soil carbon sequestration and crop yield changes under conservation agriculture. **Global Change Biology**, v. 26, n. 6, p. 3325-3335, 2020.

TÓTOLA, M. R.; CHAER, G. M. Microrganismos e processos microbiológicos como indicadores da qualidade dos solos. **Tópicos em ciência do solo**, v. 2, n. 3, p. 195-276, 2002.

VARGAS, L. K.; SELBACH, P. A.; SÁ, E. L. S. Alterações microbianas no solo durante o ciclo do milho nos sistemas plantio direto e convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, p. 749-755, 2004.

VIDYANAGAR, V. Seasonal and temporal variation in soil microbial biomass C, N and P in different types of land uses of dry deciduous forest ecosystem of Udaipur, Rajasthan, Western India. **Applied Ecology and Environmental Research**, v. 8, n. 4, p. 377-390, 2010.

WANG, C.; QU, L.; YANG, L.; LIU, D.; MORRISSEY, E.; MIAO, R.; BAI, E. Large-scale importance of microbial carbon use efficiency and necromass to soil organic carbon. **Global Change Biology**, v. 27, n. 10, p. 2039-2048, 2021.

WARDLE, David A. Controls of temporal variability of the soil microbial biomass: a global-scale synthesis. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 30, n. 13, p. 1627-1637, 1998.

WARDLE, D. A. A comparative assessment of factors which influence microbial biomass carbon and nitrogen levels in soil. **Biological reviews**, v. 67, n. 3, p. 321-358, 1992.

WENDLAND, S. B.; PORTILHO, I. I. R.; PIEREZAN, L.; BERGAMIN, C.; MERCANTE, F. M. **Biomassa microbiana do solo em cultivo de milho precedido por diferentes espécies de cobertura vegetal, com suprimento de nitrogênio mineral**. 2010.

WEI, Z.; GU, Y.; FRIMAN, V. P.; KOWALCHUK, G. A.; XU, Y.; SHEN, Q.; JOUSSET, A. Initial soil microbiome composition and functioning predetermine future plant health. **Science advances**, v. 5, n. 9, p. eaaw0759, 2019.

XIAO, H.; LI, Z.; CHANG, X.; HUANG, B.; NIE, X.; LIU, C.; JIANG, J. The mineralization and sequestration of organic carbon in relation to agricultural soil erosion. **Geoderma**, v. 329, p. 73-81, 2018.

XU, Y.; LI, C.; ZHU, Y.; WANG, Z.; ZHU, W.; WU, L.; DU, A. The shifts in soil microbial community and association network induced by successive planting of Eucalyptus plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 505, p. 119877, 2022.

ZHAO, J.; ZENG, Z.; HE, X.; CHEN, H.; WANG, K. Effects of monoculture and mixed culture of grass and legume forage species on soil microbial community

structure under diverse levels of nitrogen fertilization. **European Journal of Soil Biology**, v. 68, p. 61-68, 2015.

ZHU, L.; WANG, X.; CHEN, F.; LI, C.; WU, L. Effects of the successive planting of *Eucalyptus urophylla* on soil bacterial and fungal community structure, diversity, microbial biomass, and enzyme activity. **Land degradation & development**, v. 30, n. 6, p. 636-646, 2019.

ZHU, S; VIVANCO, J. M.; MANTER, D. K. Nitrogen fertilizer rate affects root exudation, the rhizosphere microbiome and nitrogen-use-efficiency of maize. **Applied Soil Ecology**, v. 107, p. 324-333, 2016.