



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

STEPHANIE DOS SANTOS LOCATELLI

**ATRIBUTOS DE QUALIDADE DO SOLO RELACIONADOS
AO CARBONO EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS**

Londrina
2023

STEPHANIE DOS SANTOS LOCATELLI

**ATRIBUTOS DE QUALIDADE DO SOLO RELACIONADOS
AO CARBONO EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Londrina - UEL, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. João Tavares Filho

Londrina
2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

L811a Locatelli, Stephanie dos Santos.

Atributos de qualidade do solo relacionados ao carbono em sistemas agroflorestais / Stephanie dos Santos Locatelli. - Londrina, 2023.
49 f. : il.

Orientador: João Tavares Filho.

Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, 2023.
Inclui bibliografia.

1. Estoque de carbono no solo - Tese. 2. Microrganismos do solo - Tese. 3. Agrofloresta - Tese. 4. Enzima - Tese. I. Tavares Filho, João. II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Ciências Agrárias. Programa de Pós-Graduação em Agronomia. III. Título.

CDU 63

STEPHANIE DOS SANTOS LOCATELLI

**ATRIBUTOS DE QUALIDADE DO SOLO RELACIONADOS
AO CARBONO EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Londrina - UEL, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Agronomia.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. João Tavares Filho
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Prof. Dr. André Luiz Martinez de Oliveira
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Prof. Dra. Gabriela Machineski
Universidade Norte do Paraná – UNOPAR

Londrina, 28 de fevereiro de 2023.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, por me fazer crescer sempre e ser um belo exemplo de professor e pesquisador;

Aos técnicos do laboratório de Solo da UEL, João e Márcio, por me auxiliar nas análises e darem todo o suporte necessário;

Ao CNPq pela concessão da bolsa e apoio financeiro;

À Tamires, por ter realizado comigo a coleta das amostras que, de longe, foi um desafio e tanto;

Às estagiárias Millena, Thaís e Stefanie, por terem ajudado nas várias análises laboratoriais;

À Nádia, por ter disposto horas e horas do seu tempo e sido um braço direito nas análises microbiológicas;

Aos meus pais e minha irmã, por me darem a base e apoio do jeitinho deles;

À Juliana, minha querida amiga de longa data, que sempre esteve presente nos momentos mais delicados (e felizes, também) e que compartilha da vida acadêmica comigo;

À minha prima Brenda, minha melhor amiga, por sempre estar presente em todos os momentos, principalmente nessa fase que foi tão importante pra mim;

À Fernanda, uma das pessoas mais inspiradoras da pós-graduação e que hoje é uma das minhas pessoas favoritas, por ser tão dedicada e me influenciar de forma tão boa na pesquisa e enxergar o mundo de maneira mais leve e positiva.

RESUMO

LOCATELLI, Stephanie dos Santos. **Atributos de qualidade do solo relacionados ao carbono em sistemas agroflorestais**. 2023. 49 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2023.

Os sistemas de uso e manejo se correlacionam com o ciclo biogeoquímico do carbono e podem influenciar no estoque deste elemento nos solos, uma vez que existe uma forte correlação entre o conteúdo de carbono e as propriedades físicas, químicas e microbiológicas do solo, presença da matéria orgânica entre outros, sendo portanto um dos indicadores-chave na identificação de áreas degradadas. Assim sendo, o presente trabalho teve como objetivo avaliar os atributos de qualidade do solo relacionados ao carbono em sistemas agroflorestais: sistema agroflorestal de sete anos, sistema agroflorestal de três anos, sistema convencional e mata nativa (referência). Foram coletadas amostras nas camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm de profundidade e, assim, avaliamos: densidade, carbono orgânico total e estoque de carbono do solo, carbono e nitrogênio da biomassa microbiana e atividade da enzima beta-glicosidase. Os dados foram submetidos à análise de variância (Bartlett) e as médias foram comparadas pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade. Os sistemas agroflorestais apresentaram os maiores estoques de carbono, superando os teores da mata e, por sua vez, o sistema convencional obteve os menores valores. A distribuição desses valores ocorreu de forma crescente com o aumento da profundidade. O carbono da biomassa microbiana foi maior nos sistemas agroflorestais e o nitrogênio, maior no sistema convencional enquanto os demais tratamentos se apresentaram iguais. A beta-glicosidase foi superior na mata, se sobressaindo de forma considerável, seguido do sistema agroflorestal de sete anos, apresentando segundo maior valor, e os demais, que se apresentaram iguais e menores. A densidade do solo teve sua influência nos estoques de carbono, mas não foi o principal fator determinante para o aumento ou diminuição deste elemento no solo, uma vez que ora o estoque de carbono foi maior em amostras com alta densidade, ora o estoque de carbono foi maior em amostras com menor densidade. Os resultados evidenciam o potencial dos sistemas agroflorestais em conservar o carbono no solo em comparação com os sistemas convencionais, proporcionaram maiores concentrações de carbono orgânico total em profundidade (0 – 20 cm), maiores concentrações de carbono da biomassa microbiana e maiores atividades enzimáticas, indicando que o manejo empregado influencia positivamente a atividade microbiana no solo, independentemente da Ds do mesmo.

Palavras-chave: carbono orgânico; manejo conservacionista; agrofloresta; microrganismos; sistema convencional.

ABSTRACT

LOCATELLI, Stephanie dos Santos. **Soil quality attributes related to carbon in agroforestry systems**. 2023. 49 p. Dissertation (Master in Agronomy) – State University of Londrina, Londrina, 2023.

The use and management systems correlate with the biogeochemical carbon cycle and can influence the stock of this element in the soil, since there is a strong correlation between the carbon content and the physical, chemical and microbiological properties of the soil, presence of matter among others, thus being one of the key indicators in identifying degraded areas. Therefore, the present study aimed to evaluate soil quality attributes related to carbon in agroforestry systems: seven-year agroforestry system, three-year agroforestry system, conventional system and native forest (reference). Samples were collected in layers of 0-5, 5-10 and 10-20 cm depth and, thus, we evaluated: density, total organic carbon and soil carbon stock, carbon and nitrogen of the microbial biomass and beta- glycosidase enzyme activity. Data were subjected to analysis of variance (Bartlett) and means were compared using the Tukey test, at 5% probability. The agroforestry systems had the highest carbon stocks, surpassing the levels of the forest and, in turn, the conventional system had the lowest values. The distribution of these values increased with increasing depth. Microbial biomass carbon was higher in agroforestry systems and nitrogen was higher in the conventional system, while the other treatments were the same. Beta-glucosidase was higher in the forest, standing out considerably, followed by the seven-year agroforestry system, with the second highest value, and the others, which were equal and smaller. Soil density had an influence on carbon stocks, but it was not the main determining factor for the increase or decrease of this element in the soil, since sometimes the carbon stock was greater in samples with high density, sometimes the carbon stock was higher in samples with lower density. The results show the potential of agroforestry systems to conserve carbon in the soil compared to conventional systems, providing greater concentrations of total organic carbon in depth (0 - 20 cm), greater concentrations of carbon in the microbial biomass and greater enzymatic activities, indicating that the management employed positively influences the microbial activity in the soil, regardless of its Ds.

Keywords: organic carbon; conservationist management; agroforestry; microorganisms; conventional system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização das áreas estudadas no município de Sabáudia, PR.	23
Figura 2 – Sistema convencional em Sabáudia, PR.	25
Figura 3 – Sistema agroflorestal de três anos implantado no município de Sabáudia, PR.	26
Figura 4 – Sistema agroflorestal de sete anos implantado no município de Sabáudia, PR.	27
Figura 5 – Pontos de coleta nas áreas amostradas, sendo a: SAF7, b: SAF3, c: SC e d: MATA.....	28

LISTA DE GRÁFICOS

- Gráfico 1** – Teores de carbono orgânico do solo nos sistemas avaliados na profundidade de 0 a 20 cm.....31
- Gráfico 2** – Teor de nitrogênio total do solo nos sistemas avaliados na profundidade de 0 a 20 cm.....32
- Gráfico 3** – Densidade do solo sob os diferentes sistemas agrícolas e em um fragmento de mata, nas camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm de profundidade.33
- Gráfico 4** – Estoque de carbono sob os diferentes sistemas agrícolas e em um fragmento de mata, nas camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm de profundidade.35
- Gráfico 5** – Análise enzimática beta-glicosidase, em mg de p-nitrofenol kg⁻¹ de solo h⁻¹ na profundidade 0 – 10 cm.36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização física e química do solo de 0-20 cm, sob sistema convencional, sistema agroflorestal de sete anos, sistema agroflorestal de três anos e fragmento de mata nativa, no município de Sabáudia, PR.	24
Tabela 2 – Análise estatística do carbono orgânico do solo em relação à profundidade e ao tratamento.	32
Tabela 3 – Análise estatística da densidade do solo em relação à profundidade e ao tratamento.	34
Tabela 4 – Análise estatística do estoque de carbono do solo em relação à profundidade e ao tratamento.	35
Tabela 5 – C e N da biomassa microbiana na profundidade de 0-10 cm, em g kg^{-1}	36

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1	CULTIVO CONVENCIONAL.....	15
2.2	CULTIVO CONSERVACIONISTA	16
2.3	AGROFLORESTA.....	16
2.4	FORMAS DO CARBONO NO SOLO	18
2.5	ATIVIDADE ENZIMÁTICA DO SOLO.....	19
2.6	RELAÇÃO ENTRE MANEJO, CARBONO E A ATIVIDADE ENZIMÁTICA DO SOLO	20
3	MATERIAL E MÉTODOS	23
3.1	LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO	23
3.2	AMOSTRAGEM DO SOLO.....	27
3.3	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DO SOLO	29
3.4	DENSIDADE DO SOLO	29
3.5	CARBONO ORGÂNICO E NITROGÊNIO DO SOLO	29
3.6	ESTOQUE DE CARBONO DO SOLO.....	30
3.7	ANÁLISES MICROBIOLÓGICAS DO SOLO.....	30
3.8	ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....	30
4	RESULTADOS	31
4.1	CARBONO ORGÂNICO E NITROGÊNIO TOTAL.....	31
4.2	DENSIDADE DO SOLO	33
4.3	ESTOQUE DE CARBONO DO SOLO.....	34
4.4	CARBONO E NITROGÊNIO DA BIOMASSA E ANÁLISE ENZIMÁTICA BETA-GLICOSIDASE	36
5	DISCUSSÃO	37
5.1	CARBONO E NITROGÊNIO DO SOLO.....	37
5.2	ESTOQUE DE CARBONO E DENSIDADE DO SOLO	38
5.3	ANÁLISES MICROBIOLÓGICAS	40
6	CONCLUSÃO	42
	REFERÊNCIAS	43

1 INTRODUÇÃO

O maior compartimento de carbono (C) nos ecossistemas terrestres é o compartimento do solo (LEHMANN et al., 2020), o qual representa cerca de quatro vezes o compartimento da vegetação e quase três vezes e meia o da atmosfera, e é constituído pelo carbono orgânico e mineral.

Esse reservatório do solo responde às mudanças ambientais e de manejo, é considerado vital para a mitigação das mudanças climáticas e o manejo sustentável do solo, pois cerca de 10,2 Gt¹ de C são emitidos para a atmosfera a cada ano de fontes antropogênicas em escala global (FRIEDLINGSTEIN et al., 2022).

Vários mecanismos foram propostos para explicar a dinâmica do carbono orgânico do solo (COS) no espaço e no tempo, onde três principais grupos de fatores estão envolvidos, incluindo variáveis climáticas, condições do solo, e propriedades bióticas, que consistem principalmente na quantidade e qualidade dos insumos de C no solo. Esses fatores trabalham juntos para regular a dinâmica do COS, portanto, quaisquer estudos focados em efeitos únicos desses fatores para prever sua mudança levariam a grandes incertezas (LUO et al., 2017).

A baixa fertilidade do solo e práticas inadequadas de manejo agrícola causam baixo rendimento das safras, quebra de safra e/ou deficiências de nutrientes em grandes partes do mundo em desenvolvimento. Além disso, a alta dependência de insumos externos ou o uso de maquinários pesados na agricultura mais intensiva resultam no esgotamento dos recursos naturais e na insegurança alimentar. O impacto acontece diretamente nos efeitos da produtividade e na biodiversidade do solo (KIHARA et al., 2017) compromete de forma significativa suas funções, com a perda da qualidade física, química e biológica, além de influenciar na dinâmica de entrada e saída de matéria orgânica do solo (MOS). Ela é facilmente alterada e é um importante indicador de qualidade e, perdas dessa qualidade indicam o surgimento de processos erosivos, levando a uma sequência de estágios de degradação (TROIAN et al., 2020).

O manejo orgânico do solo baseado no uso de culturas de cobertura, o distúrbio mecânico mínimo e correções nutricionais com base em fontes orgânicas a partir de leguminosas ou esterco, geralmente apresenta resultados mais estáveis de

¹ 1 gigaton = 1 bilhão de toneladas

estrutura do solo, melhor fertilidade e maior teor de MO em comparação a sistemas que dependem de aplicações de agrotóxicos, nutrientes químicos e perturbação mecânica (GHABBOUR et al., 2017).

Há evidências crescentes de que a biodiversidade do solo contribui para o controle de pragas e doenças de plantas, animais e humanos e, também, a biodiversidade acima do solo, assim como o equilíbrio da dinâmica evolutiva e sucessional dos ecossistemas e sua capacidade de adaptação a mudanças climáticas globais (ALFAHAM et al., 2021). Neste sentido, as mudanças climáticas e a degradação do solo resultantes de práticas inadequadas de manejo estão entre as ameaças mais relevantes quanto a disponibilidade e estabilidade na provisão de alimentos (GOURDJI et al., 2015).

A diminuição da qualidade química implica redução nos teores de fósforo e nitrogênio, na MO, na CTC e no pH, enquanto a perda da qualidade biológica produz efeitos negativos na atividade de enzimas no solo e na biomassa microbiana, por exemplo, com implicações diretas no desenvolvimento das plantas, além das demais funções do solo. Traz como perda da qualidade física o espaço poroso, limitando o desenvolvimento das plantas e a atividade de organismos no solo, o que implica em condições desfavoráveis de estruturação, formando agregados pouco estáveis e elevada densidade (GOURDJI et al., 2015).

Os sistemas agroflorestais (SAFs) têm sido considerados sistemas de manejo que conservam as condições do solo aproximando às condições naturais e, assim, há um maior equilíbrio do ecossistema manejado, pois aumenta-se a diversidade de espécies cultivadas, possuindo sistemas radiculares com arquitetura diversificada que propiciam contínuo aporte de MO e condicionam o meio físico do solo de forma favorável (MARTINS; RANIERI, 2014), ou seja, proporcionam melhor infiltração da água, porosidade, aumento da micro e macrofauna, maior cobertura do solo, entre outros.

O manejo agrícola sustentável com foco na biodiversidade do solo pode ser a chave para o alcance de sistemas de produção mais eficientes em relação ao uso dos recursos naturais e resiliência das funções ecossistêmicas. A restauração e conservação da biodiversidade do solo (BDS) favorecem o controle biológico de pragas e doenças, restauração e remediação de solos degradados, mitigação de estresses e adaptação às mudanças climáticas (EL MUJTAR et al., 2019).

Assim, considerando a importância de práticas conservacionistas que

contribuem na conservação do C no solo, o objetivo deste trabalho é avaliar os atributos de qualidade do solo relacionados ao carbono em sistemas agroflorestais: sistema agroflorestal de sete anos, sistema agroflorestal de três anos, sistema convencional e mata, como referência.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 CULTIVO CONVENCIONAL

A intensificação da produção de alimentos e rações é muitas vezes acompanhada pelo aumento da entrada de nutrientes sintéticos, aplicações intensas de pesticidas, lavoura frequente e manejo da irrigação. As implicações ambientais negativas dessas práticas incluem eutrofização, aumento da salinização, erosão do solo e perda de biodiversidade (HARKES et al., 2019).

O sistema convencional de cultivo consiste no revolvimento de camadas superficiais para incorporar corretivos e fertilizantes, aumentar os espaços porosos e, assim, aumentar a infiltração da água. Como consequência, acelera a decomposição da matéria orgânica, rompe os agregados do solo e reduz sua estabilidade nas camadas manejadas (SALES et al., 2016). Esses processos alteram a agregação, principalmente das argilas, que retém a maior parte dos nutrientes necessários às plantas, facilitando seu arraste através da ação da chuva e vento, resultando em erosão (GABRIEL FILHO et al., 2000).

O preparo convencional do solo é, basicamente, realizado em duas etapas. A primeira (preparo primário) tem o objetivo de descompactar o solo com a utilização de arados ou grades pesadas, visando também a incorporação de corretivo, fertilizantes, plantas daninhas ou resíduos vegetais ou a descompactação do solo. A segunda (preparo secundário) objetiva o destorroamento e nivelamento da camada arada de solo por gradagens (SALES et al., 2016).

A compactação se torna facilitada através desses processos, principalmente do preparo primário, que traz uma possível compactação subsuperficial ainda maior, e provoca diversos malefícios à qualidade do solo e, conseqüentemente, à cultura (ALBUQUERQUE FILHO et al., 2021).

Em áreas que empregam esse tipo de manejo, há a quebra dos agregados e a exposição da MOS, o que acelera sua oxidação e, conseqüentemente, redução nos teores de carbono orgânico total (COT). Além disso, alguns fatores são limitantes para que se obtenha o potencial máximo de produtividade em áreas como essas, pois as alterações nos atributos do solo, como a compactação, acabam prejudicando a qualidade do sistema (TROIAN et al., 2020).

2.2 CULTIVO CONSERVACIONISTA

A produção intensiva esgotou o solo em muitos países comprometendo a produção nessas áreas. Por isso, a transformação da produção em sistemas agrícolas mais sustentáveis, que tenham retorno produtivo positivo e que reduzam os impactos ambientais, tem sido visto como essencial (EMBRAPA, 2018).

Essa mudança pode contribuir para a redução da erosão do solo e da perda de nutrientes, para o aumento da resiliência dos agricultores em face às alterações climáticas, para a estabilização e proteção dos agregados do solo e redução do consumo de energia em consequência a um menor consumo de combustível em máquinas agrícolas, por exemplo (FAO, 2018).

A agricultura conservacionista é baseada em três princípios: na perturbação mecânica mínima do solo aplicando o plantio direto, o que preserva os organismos do solo e reduz a erosão; na cobertura vegetal do solo, onde os restos vegetais permanecem na superfície do solo contribuindo na retenção de água, proteção contra impactos da água da chuva e na compactação do solo; e na diversificação de espécies, que envolve pelo menos três espécies diferentes numa rotação de cultura, promovendo uma boa estrutura do solo, ampla gama de flora e fauna que contribuem para o ciclo de nutrientes e, conseqüentemente, a nutrição de plantas, prevenindo doenças fitossanitárias (FAO, 2016).

A motivação para a implementação do sistema de plantio direto (SPD) surgiu a partir da década de 70, quando a erosão potencial causada pelas chuvas na região Sul do Brasil tomou grandes proporções juntamente com o desmatamento e início da mecanização intensiva no preparo do solo. O novo sistema (PD) foi ganhando mais espaço e sendo adotado em várias regiões do Brasil através de organizações criadas para estender os benefícios do PD e da Agricultura da Conservação pelos pioneiros Herbert Bartz, Nonô Pereira e Franke Dijkstra (HISTÓRICO, 2021).

2.3 AGROFLORESTA

Recentemente, a Organização das Nações Unidas para Alimentos e Agricultura (FAO) deu ênfase às práticas agroecológicas como forma de mudar os sistemas agroalimentares para caminhos mais saudáveis e sustentáveis, ou seja, o

emprego de formas de manejos conservacionistas (ANDRADE; PASINI; SCARANO, 2020).

Sistemas como a agricultura natural, agricultura ecológica, agricultura orgânica, agrossilvicultura, permacultura e sistemas agroflorestais, fazem parte da agroecologia. Estes sistemas de produção trazem como base a não utilização de elementos químicos, tecnologias de baixo ou sem impacto e a sucessão ecológica. O manejo agroecológico visa a sustentabilidade com uso de técnicas de rotação de culturas, compostagem e manejo orgânico do solo e a associação de cultivos (FAO, 2018).

O cultivo de florestas manejadas, principalmente nas regiões tropicais, tem sido apontado como meio eficiente no sequestro de C. Nesse sentido, o Brasil tem mostrado grande potencial de contribuição para o aumento de estoques de carbono (EstC) do solo e diminuições nas emissões do mesmo na atmosfera, pois tem 58% do seu território coberto por florestas naturais e plantadas, o que representa a segunda maior área de florestas do mundo, atrás apenas da Rússia (TROIAN et al., 2020).

Os sistemas agroflorestais (SAFs) são implantados seguindo os princípios da agroecologia e podem recuperar áreas degradadas, pois melhoram as condições do solo e potencializam a regeneração natural e da sucessão de espécies. (FÁVERO; LOVO; MENDONÇA, 2008). Os SAFs têm como característica o uso da área para cultivo e/ou criação de animais juntamente com árvores e arbustos, procurando se espelhar no equilíbrio que existe numa mata ou floresta nativa.

Esse tipo de sistema promove consideráveis benefícios, uma vez que, quando o mesmo está em equilíbrio, dispensa-se interferências externas, ou seja, conserva o solo, a água, a biodiversidade, a adubação natural do solo por meio das plantas e permanência da cobertura vegetal do solo, sem o uso de produtos químicos, promovendo a segurança aos agricultores, consumidores e ao meio ambiente, oferecendo alimentos de boa qualidade (MACEDO, 2013).

Esses sistemas se baseiam na combinação da biologia, ou seja, dos microrganismos do solo, com os elementos físicos e, dessa forma, substituem fertilizantes e agrotóxicos uma vez que estimulam a microfauna benéfica do solo. Além disso, o SAF traz benefícios como a cobertura permanente do solo, otimização da fotossíntese geral, a produção de biomassa, previne a erosão e aumenta o sequestro de C, promove a sucessão natural, a implantação de uma diversidade de plantas no

sistema de cultivo e a estratificação, que nada mais é o resultado da sucessão natural onde camadas com diferentes densidades de vegetação são criadas. Tudo isso traz resultados benéficos tanto para os agricultores, que ficam isentos de exposições a produtos tóxicos e reduzem os gastos produtivos, quanto para o meio ambiente (ANDRADE; PASINI; SCARANO, 2020).

Em relação ao clima, além dos sistemas agroflorestais serem reconhecidos como uma abordagem integrada para o manejo sustentável do solo, são também reconhecidos em contribuir para a adaptação e mitigação das mudanças climáticas. O cultivo de biomassa agroflorestal para bioenergia e biocombustíveis, substituindo o combustível fóssil, também tem o potencial de reduzir o aumento de CO₂ atmosférico.

A falta de maquinários adequados, aqueles que promovam baixo impacto e que não interfiram negativamente o meio ambiente, para o manejo de plantações mais complexas e de grande escala é uma limitação a esse tipo de prática. Outro fator que dificulta a implantação de SAFs é a falta de conhecimento para o manejo de diversas espécies simultaneamente ao invés de uma ou poucas (ANDRADE; PASINI; SCARANO, 2020; OLIVEIRA et al., 2018).

2.4 FORMAS DO CARBONO NO SOLO

O conceito de fixação de C normalmente se relaciona com a ideia de armazenar reservas de C em solos, florestas e outros tipos de vegetação. Também se promove o incremento nas reservas de C pelo estabelecimento de novas plantações florestais, sistemas agroflorestais e pela recuperação de áreas degradadas (BALBINOT et al., 2008).

O ciclo do C pode ser dividido em três fases: a fase de fixação do CO₂ em cadeias orgânicas, a fase de liberação dos produtos fotossintetizados e seu acúmulo e estabilização no solo, e a fase de mineralização de substratos orgânicos e de transferência do CO₂ à atmosfera (BALBINOT et al., 2008).

A primeira fase é realizada principalmente pelos vegetais, através da fotossíntese, e a segunda e terceira fase ocorrem no solo, constituindo o ciclo interno do C, sendo a maior parte das suas reações controladas pela biomassa microbiana, equilibrando a entrada e saída de carbono no solo. Assim, a quantidade final de CO₂ liberada, sendo o resultado final do metabolismo energético dos microrganismos, é

utilizada como indicadora da atividade dos mesmos e do estágio de decomposição dos resíduos e da matéria orgânica do solo (PULROLNIK, 2009).

O manejo inadequado e o preparo excessivo dos solos provocam alterações nas propriedades químicas, físicas e biológicas, o que induz perdas de produtividade e degradação de recursos naturais. Também, a transformação de sistemas naturais em áreas agrícolas pode levar ao declínio dos EstC rapidamente, o que contribui para o aumento da emissão de CO₂ à atmosfera (SALTON, 2005; PULROLNIK, 2009).

Dentre os vários componentes da matéria orgânica do solo, a biomassa microbiana é considerada um indicador altamente sensível às mudanças provocadas pelo uso do solo, utilizada como indicadora da qualidade do solo. Além disso, é considerada como compartimento central do ciclo do carbono, uma vez que é a parte viva da matéria orgânica, constituída por bactérias, fungos e microfauna (animais menores que $5 \times 10^3 \mu\text{m}^3$) (PULROLNIK, 2009; OLIVEIRA; REATTO; ROIG, 2015).

A adoção de sistemas de manejo conservacionistas têm sido apontadas como alternativas ao monocultivo com preparo convencional, como o sistema de plantio direto e integração lavoura-pecuária. O plantio direto somado à rotação de culturas e pastagens é apontado como a forma de manejo do solo mais adequada para conciliar produtividade com sustentabilidade, uma vez que as mudanças de uso e de práticas de manejo do solo que objetivam o aumento do EstC representam estratégias importantes para a redução dos níveis de CO₂ atmosférico (SALTON, 2005; OLIVEIRA; REATTO; ROIG, 2015).

2.5 ATIVIDADE ENZIMÁTICA DO SOLO

Os processos biológicos são a base da saúde do solo e podem reverter os processos de degradação, que ocorrem em escala mundial, se bem manejados. Tem sido cada vez mais percebida pelos produtores a importância do fator biológico do solo para a manutenção de lavouras saudáveis, e sustentáveis, ofertando alimentos de qualidade e em quantidade para a população mundialmente crescente (MENDES et al., 2020).

Um solo biologicamente ativo é um solo saudável, capaz de armazenar água, sequestrar carbono e promover a degradação de agrotóxicos. No

Brasil, a expansão e implantação de sistemas de manejo conservacionistas, sistemas de plantio direto (SPD) e integração lavoura pecuária (ILP), foi um marco fundamental para a construção de um ambiente edáfico biologicamente mais ativo e saudável.

A consciência de que a biota do solo é indispensável para sustentar a vida vegetal, animal e humana está crescendo dia após dia pois desempenha papel importante em várias funções essenciais do solo, como a ciclagem de carbono e dos nutrientes, a retenção de água, a formação de matéria orgânica, a estruturação do solo e a interação com a comunidade vegetal, principalmente na rizosfera, onde ocorre as interações mais intensas entre a microbiologia do solo e as plantas, o que contribui para a absorção de nutrientes por plantas (HARKES et al., 2019).

A constatação de que solos quimicamente semelhantes podem apresentar desempenhos diferenciados, demonstrou a necessidade da inclusão de parâmetros relacionados ao funcionamento biológico do solo nas análises de rotina, os chamados bioindicadores (MENDES et al., 2020).

Através da determinação da atividade de algumas enzimas-chave consideradas como bioindicadoras da qualidade biológica do solo, pode-se acessar a memória do solo, ou seja, o grau de revolvimento mecânico, o tipo de manejo ao qual é submetido, além da saúde do solo que está relacionada com a parte viva do mesmo. Isso é possível pelo fato de que a atividade enzimática é o somatório da atividade de enzimas dos organismos vivos, seja microrganismos, plantas ou animais, além dos organismos que estiveram presentes anteriormente (MENDES et al., 2019).

Assim, solo armazena e estabiliza a MO e isso está intimamente relacionado com a capacidade do solo de estabilizar e proteger enzimas, além de outras propriedades estruturais associadas, como a agregação e porosidade (HARKES et al., 2019).

2.6 RELAÇÃO ENTRE MANEJO, CARBONO E A ATIVIDADE ENZIMÁTICA DO SOLO

As comunidades do solo podem variar muito dependendo do manejo agrícola. Os principais impulsionadores da perda da BDS incluem a degradação do solo, a mudança no uso da terra, as práticas intensivas de manejo do solo e as mudanças climáticas.

Estudos demonstram que práticas agrícolas intensivas, como

conversão de pastagens em terras aráveis, preparo intensivo do solo, uso de agrotóxicos ou fertilizantes químicos afetam negativamente a BDS. Em áreas que tiveram essa conversão recente de manejo, avaliações sobre a BDS mostram que tanto a diversidade quanto os processos mediados pela mesma diminuem acentuadamente em comparação às terras próximas que permanecem sob vegetação natural (EL MUJTAR et al., 2019).

Os organismos do solo geralmente respondem de forma positiva à agricultura conservacionista, como relatado em uma recente metanálise publicada por Lori et al. (2017), onde confirmou que sistemas de agricultura orgânica apresentaram 32% a 84% mais biomassa microbiana e atividades enzimáticas em relação a sistemas convencionais em escala global, onde a quantidade e a atividade dos microrganismos do solo foram ampliados pela rotação de culturas, pelo uso de leguminosas e insumos orgânicos.

Além disso, Hartmann et al. (2015), mostraram que solos agrícolas sob agricultura orgânica e convencional de longo prazo abrigam biodiversidades distintas. Nesse trabalho, a agricultura orgânica apresentou maior riqueza, redução da dispersão e alteração da estrutura da microbiota do solo quando comparada com solos manejados convencionalmente. Excluindo outros fatores de manejo agrícola que podem afetar a BDS, como a monocultura ou o preparo do solo, foi demonstrado que a quantidade e a qualidade dos fertilizantes orgânicos são os principais determinantes da biodiversidade microbiana.

Nem sempre o aumento da atividade enzimática está relacionado a aumentos efetivos nos teores de MO nos estágios iniciais. Um experimento de rotação de culturas na soja, realizado pela Fundação MT conduzido desde 2008, mostra que a semelhança entre as características químicas do solo nos diferentes tratamentos de manejo foi insuficiente para obter conclusões e explicar os resultados obtidos, onde a produtividade apresentou diferenças de 30 sc ha⁻¹, sendo a MO o único fator divergente, cujo teor no tratamento com braquiária foi 50% maior que no tratamento soja/pousio, além da atividade beta-glicosidase, que apresentou 4 a 8 vezes mais atividade, respectivamente, tendo componente biológico completamente distinto (MENDES et al., 2020).

Não só as alterações nas propriedades químicas, em particular nos teores de MO, são capazes de expressar as modificações que ocorrem no solo por decorrência da adoção de sistemas de manejo conservacionista, como o sistema

plantio direto (SPD), integração lavoura-pecuária (ILP) e integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) (MENDES et al., 2018). Com a utilização dos bioindicadores, aqui dizendo beta-glicosidase, podemos ter ideia de quais práticas de manejo podem estar sendo inadequadas ou não.

A beta-glicosidase é uma enzima indicadora que apresenta maior sensibilidade para detectar alterações no solo em função do sistema de manejo empregado (MENDES et al., 2019). Além disso, a precisão, coerência, sensibilidade, determinação analítica simples e reprodutibilidade, são características que a faz sua utilização vantajosa, além de estar relacionada à ciclagem da MO e não ser influenciada pela aplicação de adubos e calcário.

Essa enzima também está correlacionada com atributos microbiológicos, como o carbono da biomassa microbiana e respiração basal, o que permite descrever o funcionamento biológico do solo através de seus valores. Não obstante, ela pode ser adsorvida em partículas de argila e na MO, funcionando como uma “impressão digital” do sistema de manejo que o solo é submetido e, dessa forma, traz a possibilidade de detectar alterações que ocorrem no solo decorrentes do seu uso e manejo com antecedência, dando suporte para tomada de decisão nas áreas agrícolas.

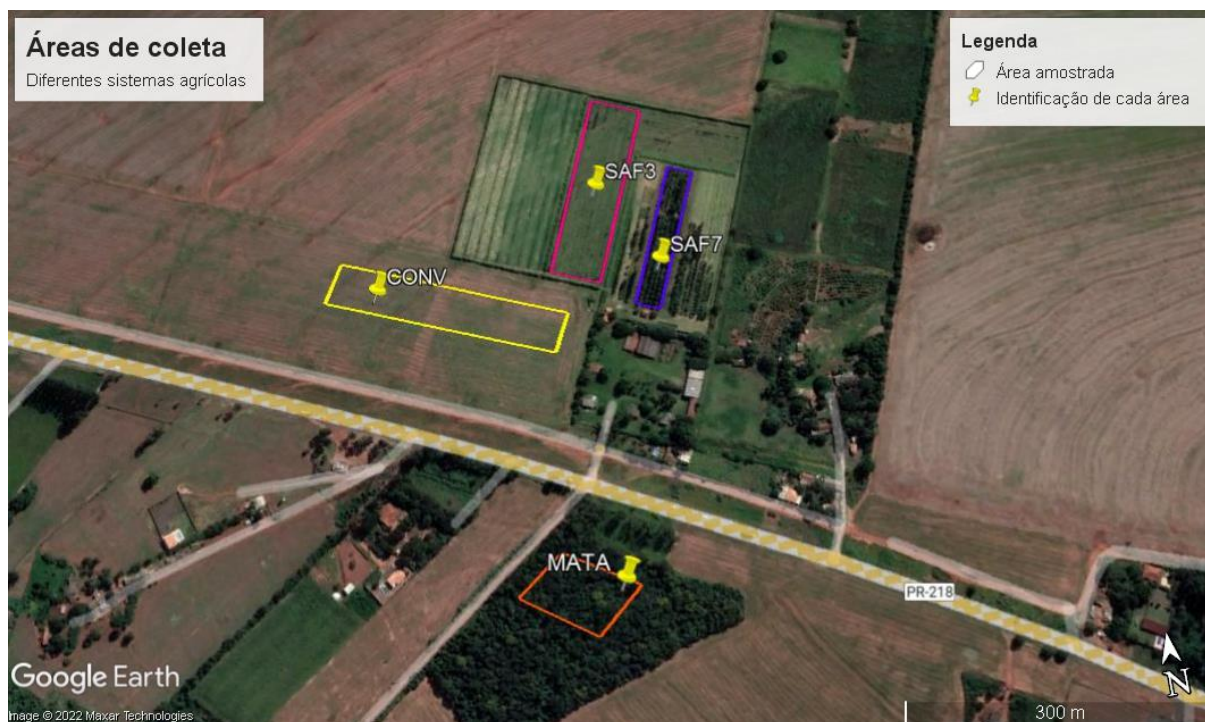
Agregados estáveis à água são um fator determinante da qualidade e estrutura do solo e também desempenham papel central no acúmulo de C e o EstC é impulsionado por interações microbianas com superfícies minerais (LIANG; SCHIMEL; JASTROW, 2017). Isso liga diretamente os processos de acumulação de C à formação de macroagregados por organismos do solo e às práticas de manejo que afetam os organismos de engenharia do ecossistema, como fungos micorrízicos e minhocas que desempenham essas funções.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO

Este trabalho foi desenvolvido no município de Sabáudia, Paraná, Brasil, cujo clima da região é caracterizado como subtropical (Cfa), segundo classificação de Köppen, em Latossolo Vermelho Escuro, e em três áreas (sistema agroflorestal de sete anos (SAF7), sistema agroflorestal de três anos (SAF3), sistema convencional (SC) e fragmento de mata (MATA), sendo este último adotado como referência (Figura 1). Ambas agroflorestas pertencem à propriedade Terra Planta e têm coordenadas $23^{\circ} 14' 58,85''$ S e $51^{\circ} 39' 26,43''$ W. As demais áreas estão localizadas ao lado da propriedade. A caracterização físico-química das áreas estudadas está na tabela 1.

Figura 1 – Localização das áreas estudadas no município de Sabáudia, PR.



Fonte: Google Earth (2022)

Tabela 1 – Caracterização física e química do solo de 0-20 cm, sob sistema convencional, sistema agroflorestal de sete anos, sistema agroflorestal de três anos e fragmento de mata nativa, no município de Sabáudia, PR.

Atributos do solo	Sistemas de uso			
	SAF7	SAF3	SC	MATA
pH (H ₂ O)	6,3	5,8	4,1	4,0
P (Mg dm ⁻³)	0,40	0,04	0,03	0,01
K ⁺ (Cmol _c dm ⁻³)	7,85	9,95	9,25	6,50
Ca ²⁺ (Cmol _c dm ⁻³)	4,06	2,94	1,11	0,60
Mg ²⁺ (Cmol _c dm ⁻³)	1,11	0,85	0,39	0,23
Al ³⁺ (Cmol _c dm ⁻³)	0,05	0,06	0,47	0,90
Areia (%)	67,89	69,89	78,57	79,78
Silte (%)	2,06	13,33	3,35	1,1
Argila (%)	30,06	16,78	18,8	19,11

Anterior ao implemento do sistema agroflorestal era realizada a criação de gado e, a partir de 1992, houve a mudança para o cultivo de grãos. A área sob SC manteve o manejo do produto com aplicação de produtos comuns do manejo convencional com a utilização de inseticidas, herbicidas, fungicidas e fertilizantes e, segundo o produtor responsável, é realizado o plantio direto na palhada com sucessão de soja e milho segunda safra (Figura 2).

Ao iniciar o SAF, os proprietários prepararam a área realizando gradeamento e subsolador, análises de solo e correção uma única vez. Após, fazem o plantio do capim Mombaça na área total por um ano para produzir cobertura e aumentar a quantidade de MOS. Consequente, preparam linhas de plantio com adubo orgânico e fazem a aplicação de probióticos naturais (leveduras e bactérias ácido-láticas; produto biológico comercializado) uma a duas vezes por ano para aumentar os microrganismos do solo.

Figura 2 – Sistema convencional em Sabáudia, PR.



Fonte: a própria autora (2022)

No SAF3 (Figura 3), área considerada de transição, é cultivado capim Mombaça no primeiro ano de agrofloresta e depois iniciam as linhas de árvores e cafés em um ano e um ano e meio, respectivamente, assim como a inserção de bananeiras. Conforme os anos vão passando, vão adicionando novas espécies.

As linhas de plantio no SAF3 possuem 10,5m de distância entre as linhas de árvores. Entre elas há duas linhas de cafés, com distância de 3,5m.

Figura 3 – Sistema agroflorestal de três anos implantado no município de Sabáudia, PR.



Fonte: a própria autora (2022)

No SAF7, há linhas entre árvores de 4, 5, 6 e 7m, sendo cada talhão distribuído de uma forma diferente. Nesse sistema, há maior variação de espécies arbóreas, como *Hymenaea courbaril* (jatobá), *Sterculia chicha* (chicha), *Centrolobium tomentosum* (araribá), *Cariniana estrellensis* (jequitibá), *Citrus sinensis* L. (laranja pera), *Prunus pérsica* (pêssego), *Cedrela fissilis* (cedro), *Paratecoma peroba* (peroba), entre outras além da *Musa* spp. (bananeiras), *Citrus limon* (limões), *Euphorbia heterophylla* L. (amendoim-bravo) e *Mangifera indica* L. (mangueiras) (Figura 4). O *Eucalyptus globulus* Labill (eucalipto) é uma das primeiras espécies inseridas nos SAFs e permanecem entre 3 a 4 anos e, depois, são retiradas e outras espécies vão tomando seus lugares.

Esse sistema está implantado há sete anos e, para a transição do mesmo, seguiu a mesma organização do SAF3.

Para a manutenção dos SAFs, são utilizadas ferramentas manuais, como tesoura de poda e facão, roçadeira central, trincha, forrageira e triturador.

Figura 4 – Sistema agroflorestal de sete anos implantado no município de Sabáudia, PR.



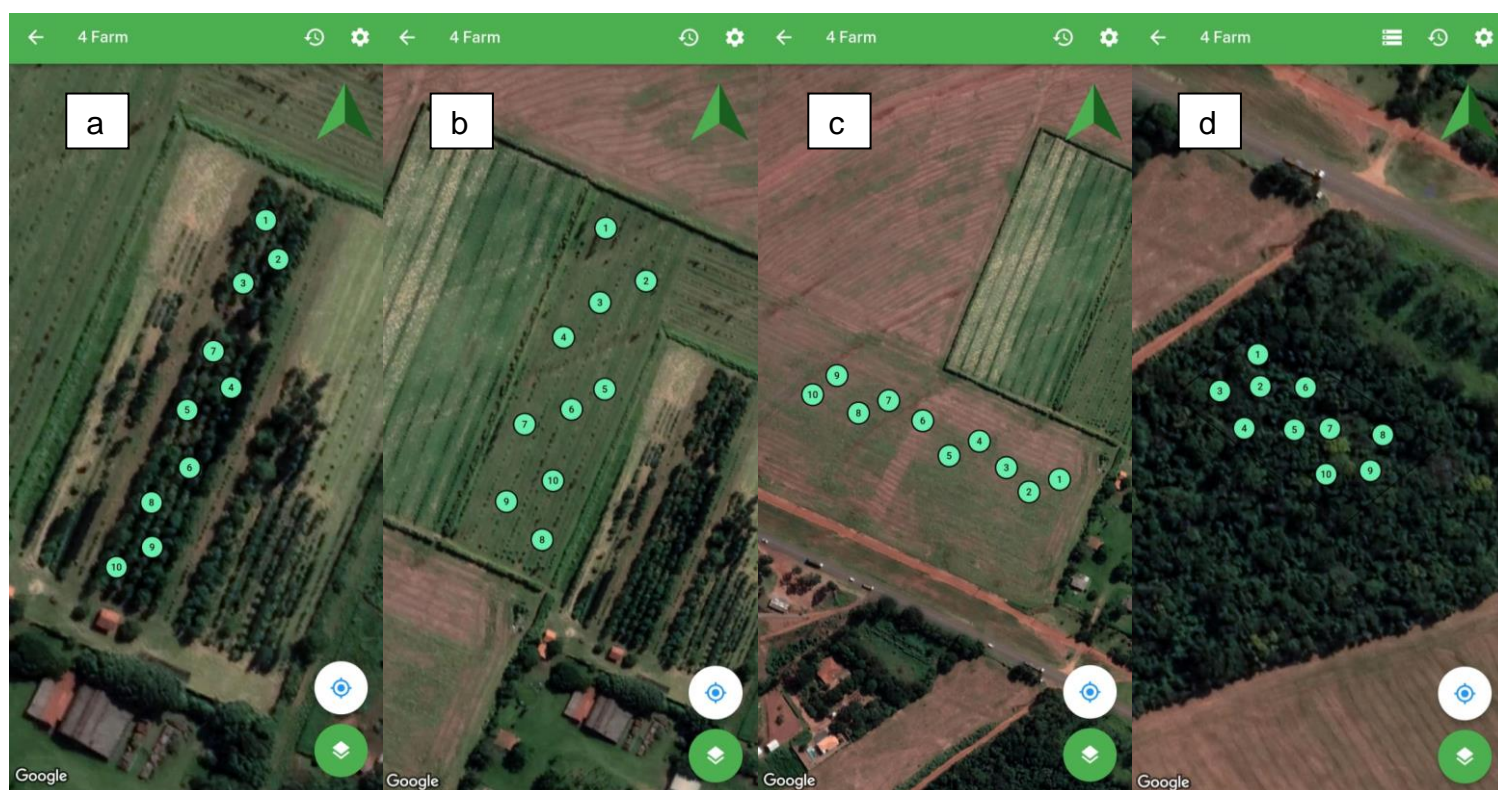
Fonte: a própria autora (2022)

Nos sistemas agroflorestais citados não há a aplicação de nenhum tipo de produto químico. Com a implantação de espécies e diversificação das mesmas, as raízes ocupam espaços diferentes, a MO adicionada resulta das podas, roçagem e da manutenção natural de cada uma, a qualidade do solo se desenvolve naturalmente, sem a interferência antrópica excessiva.

3.2 AMOSTRAGEM DO SOLO

Para a caracterização e a avaliação da qualidade química, física e biológica do solo, foram coletadas amostras em cada uso. Em cada área foi demarcada uma gleba de, no mínimo, 1 hectare, correspondendo aos tratamentos. Foram amostrados dez pontos aleatórios nas camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm, referentes às repetições (Figura 5).

Figura 5 – Pontos de coleta nas áreas amostradas, sendo a: SAF7, b: SAF3, c: SC e d: MATA.



Fonte: Imagens obtidas através do aplicativo móvel 4farm (GPS). A própria autora (2022)

As coletas de solo foram realizadas conforme o Manual de Procedimentos de Coleta de Amostras em Áreas Agrícolas para Análise da Qualidade Ambiental: Solo, Água e Sedimentos (EMBRAPA, 2006). Os anéis volumétricos, amostras de solo deformadas e indeformadas, foram acomodados em sacos plásticos e identificados para posterior análise em laboratório.

Todas as análises foram realizadas no Laboratório de Solos da Universidade Estadual de Londrina, conforme o Manual de Métodos de Análise de Solo (EMBRAPA, 2017) para as análises físicas, Manual de Análise Química de Solo e controle de Qualidade (IAPAR, 1992) para as análises químicas e o Manual de Métodos Empregados em Estudos de Microbiologia Agrícola (EMBRAPA, 1994) para as análises microbiológicas.

3.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DO SOLO

As análises físicas e químicas do solo consistiram em determinar: densidade do solo (D_s), carbono orgânico do solo (C_{org}), e o EstC.

3.4 DENSIDADE DO SOLO

A D_s foi obtida através do método do anel volumétrico a partir das amostras indeformadas coletadas. Os anéis foram colocados em estufa a 105°C onde permaneceram por 24 horas. Em seguida, resfriaram em dessecador e foram pesados novamente, determinando, assim, a massa seca da amostra (MS).

Logo, o cálculo da densidade do solo se deu pela fórmula (1):

$$D_s = \frac{MS}{V_a} (Mg.M^{-3}) \quad (1)$$

Onde:

MS = Massa seca da amostra (g);

V_a = Volume do anel (cm^3).

3.5 CARBONO ORGÂNICO E NITROGÊNIO DO SOLO

O C_{org} foi quantificado por oxidação da matéria orgânica via úmida pela oxidação com o dicromato de potássio, sendo pesados 0,5g de terra fina seca ao ar (TFSA) em Erlenmeyer de 250 ml. Foram adicionados 10 ml de dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$ 1N) e 10 ml de ácido sulfúrico e permaneceram em capela por 30 minutos. Foram adicionados mais 50 ml de água destilada, 3 ml de ácido fosfórico (H_3PO_4) e 0,5 ml do indicador (difinilamina 1%). Ao final, procedeu-se a titulação com sulfato ferroso ($FeSO_4$ 1N).

O cálculo do carbono orgânico foi realizado através da fórmula (2):

$$C_{org} = \frac{(V_2 - V_1)}{g} \times f \times 0,3896 \times 10 (g.kg^{-1}) \quad (2)$$

Onde:

V_1 = Volume de sulfato ferroso gasto na amostra (ml);

V_2 = volume de sulfato ferroso gasto na prova em branco;

f = fator de correção da solução de sulfato ferroso;

0,3896 = valor obtido da relação 0,30/0,77. (0,30 é o equivalente grama de C em 100g e 0,77 indica a eficiência do método, de 77%).

Para o nitrogênio, foram realizadas pré-digestão e destilação, conforme o método Kjeldahl, sendo o destilado titulado com H_2SO_4 .

3.6 ESTOQUE DE CARBONO DO SOLO

Calculados os valores de D_s e C_{org} , calculamos o EstC (3):

$$EstC = \frac{(C_{org} \times D_s \times e)}{10} (Mg. ha^{-1}) \quad (3)$$

Sendo que:

C_{org} = Carbono orgânico do solo na profundidade amostrada ($g.kg^{-1}$);

D_s = densidade do solo da profundidade ($kg.dm^{-3}$)

E = espessura da camada considerada (cm)

3.7 ANÁLISES MICROBIOLÓGICAS DO SOLO

As análises microbiológicas realizadas foram: a quantificação do carbono da biomassa microbiana do solo, respiração basal e a análise da atividade da enzima beta-glicosidase. Todas seguiram a metodologia citada no item 3.2 e, a última, seguiu a metodologia de Tabatabai (1994).

3.8 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

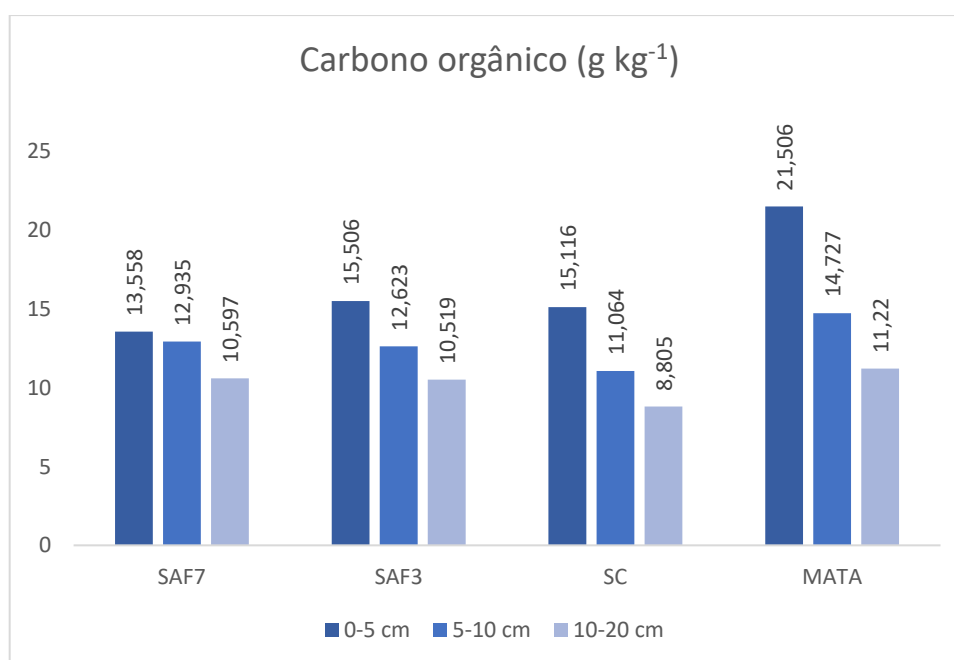
Os resultados obtidos foram analisados estatisticamente a partir do delineamento inteiramente casualizado, submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk, à análise de variância de Bartlett e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade no programa estatístico RStudio, com pacote ExpDes.pt.

4 RESULTADOS

4.1 CARBONO ORGÂNICO E NITROGÊNIO TOTAL

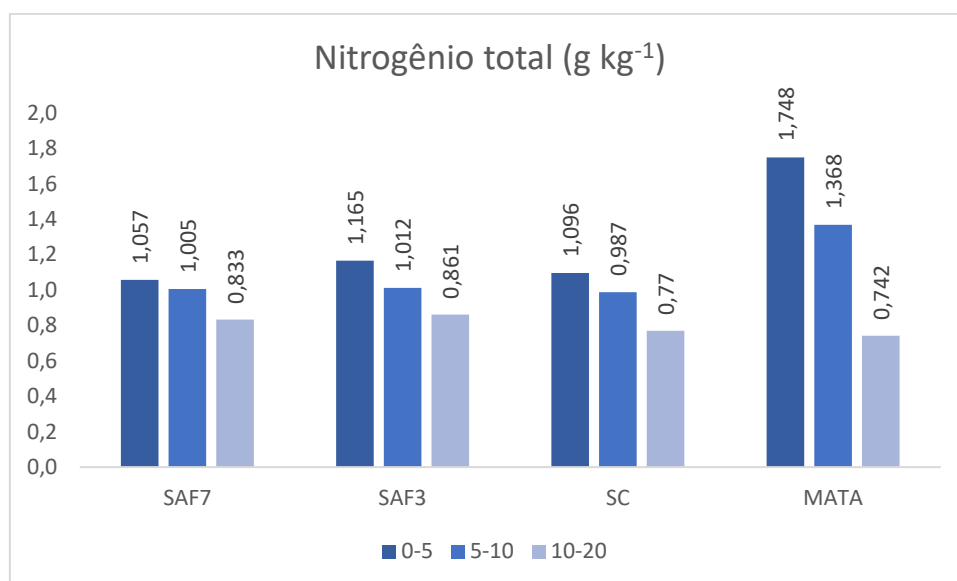
Em todos os ambientes estudados, nota-se a diminuição nos teores de C_{org} e nitrogênio com o aumento da profundidade do solo. Tal comportamento é considerado comum, pois ocorre pela maior acumulação de material orgânico na superfície do solo (Gráfico 1, 2 e Tabela 2).

Gráfico 1 – Teores de carbono orgânico do solo nos sistemas avaliados na profundidade de 0 a 20 cm.



Fonte: a própria autora

Gráfico 2 – Teor de nitrogênio total do solo nos sistemas avaliados na profundidade de 0 a 20 cm.



Fonte: a própria autora

Tabela 2 – Análise estatística do carbono orgânico do solo em relação à profundidade e ao tratamento.

Carbono Orgânico				
Profundidade (cm)	SAF7	SAF3	SC	MATA
0 – 5	bA	bA	bA	aA
5 – 10	aA	aA	aB	aAB
10 – 20	aA	aB	bB	aB
Nitrogênio				
0 – 5	bA	abA	bA	aA
5 – 10	bA	bAB	bA	aAB
10 – 20	aB	aB	aB	aB

Tukey, a 5% de significância. Letras minúsculas=linhas; Letras maiúsculas=colunas.

Os resultados de C_{org} na MATA se apresentaram maiores do que os observados para as demais áreas em todas as camadas. Estatisticamente, houve diferença entre a MATA e as demais áreas na primeira camada (0-5 cm), na segunda (5-10 cm) todas as áreas se apresentaram iguais e, na terceira (10-20 cm), os tratamentos SAF3, SAF7 e

MATA não tiveram diferença entre eles, porém diferiram do SC.

No SAF7, a variação em profundidade se apresentou mais contínua, não apresentando variação estatística. Na MATA, a quantidade de material vegetal na superfície (primeira camada) era abundante, na chamada serapilheira, o que explica um maior teor de C_{org} na superfície, o que o diferencia das demais camadas.

O SAF3, apresentou valor superior de C_{org} na primeira camada em relação ao SAF7, mas estatisticamente igual à ele e ao SC; as demais camadas também são estatisticamente iguais. Em profundidade, apenas a última camada se diferenciou.

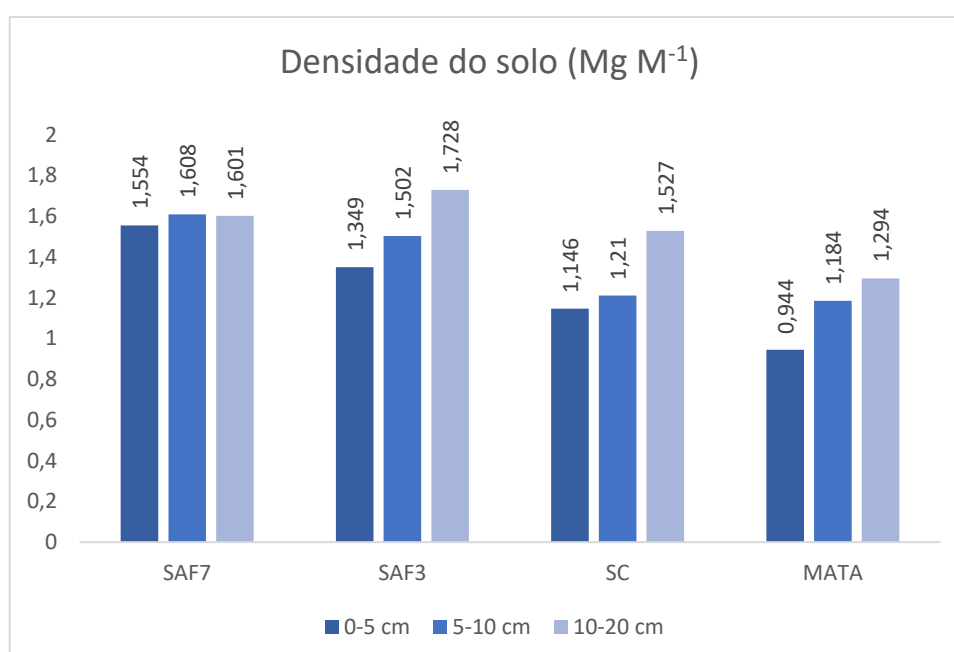
O SC, de 5-10 cm e 10-20 cm os valores foram mais diferenciados quanto à sua redução em profundidade dentre todos os tratamentos.

Em relação aos teores de N, os sistemas apresentaram maior diferença em relação à mata, com apenas na última camada, não havendo diferenciação entre elas.

4.2 DENSIDADE DO SOLO

Os resultados obtidos de densidade do solo podem ser observados a partir do Gráfico 3 (Tabela 3), abaixo.

Gráfico 3 – Densidade do solo sob os diferentes sistemas agrícolas e em um fragmento de mata, nas camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm de profundidade.



Fonte: a própria autora

Tabela 3 – Análise estatística da densidade do solo em relação à profundidade e ao tratamento.

Profundidade	SAF7	SAF3	SC	MATA
0-5 cm	aA	aB	bB	bB
5-10 cm	aA	aB	bAB	bAB
10-20 cm	aA	aA	abA	bA

Tukey, a 5% de significância. Letras minúsculas=linhas; Letras maiúsculas=colunas.

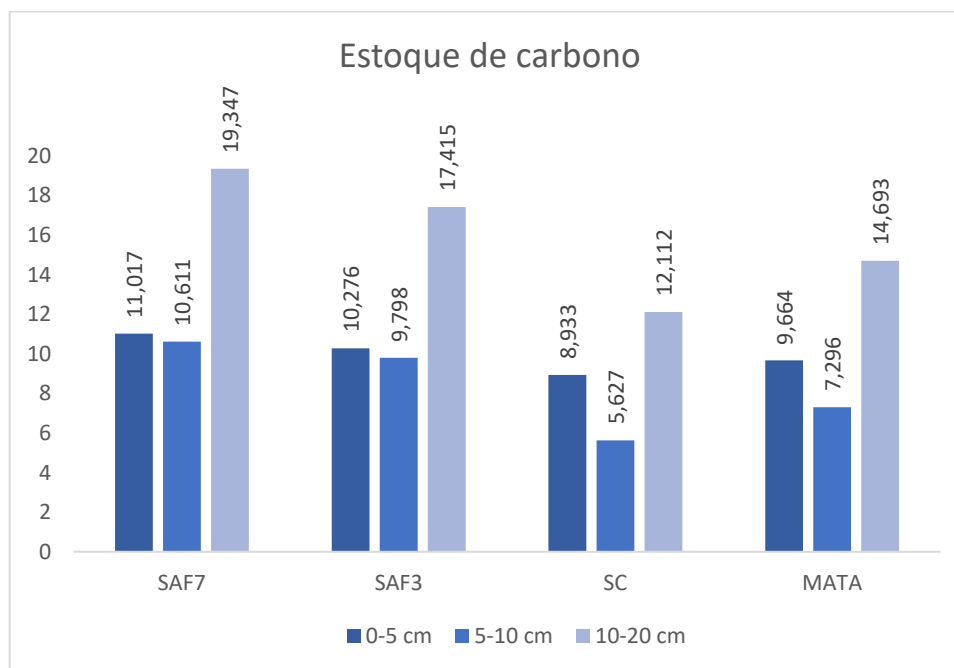
A densidade do solo nas três áreas cultivadas apresentou valores maiores em relação à MATA ao longo da profundidade amostrada.

A Ds no SAF7, se destaca ao apresentar valor constante em profundidade, e as demais áreas, valores mais elevados na última camada. Nas camadas que correspondem à profundidade entre 0-10 cm, o SAF3 e SAF7 se assemelham, assim como o SC e a MATA.

4.3 ESTOQUE DE CARBONO DO SOLO

Os resultados de EstC estão apresentados a seguir (Gráfico 4, Tabela 4).

Gráfico 4 – Estoque de carbono sob os diferentes sistemas agrícolas e em um fragmento de mata, nas camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm de profundidade.



Fonte: a própria autora

Tabela 4 – Análise estatística do estoque de carbono do solo em relação à profundidade e ao tratamento.

Profundidade	SAF7	SAF3	SC	MATA
0-5 cm	aB	aB	bAB	abAB
5-10 cm	aB	abB	cB	bcB
10-20 cm	aA	abA	cA	bA

Tukey, a 5% de significância. Letras minúsculas=linhas; Letras maiúsculas=colunas.

O EstC se apresentou maior nas camadas mais profundas dos sistemas (10-20 cm), seguida da camada de 0-5 cm e, com menor valor encontrado em 5-10 cm, com exceção da mata, onde a diminuição foi crescente ao longo da profundidade.

Os menores teores observados foram no SC em todas as camadas. No SAF3, o EstC se destacou na camada de 10-20 cm, com maior valor observado, superando todos os outros tratamentos, incluindo a MATA, porém, o SAF7 foi o tratamento que obteve valor mais uniformes por toda profundidade.

4.4 CARBONO E NITROGÊNIO DA BIOMASSA E ANÁLISE ENZIMÁTICA BETA-GLICOSIDASE

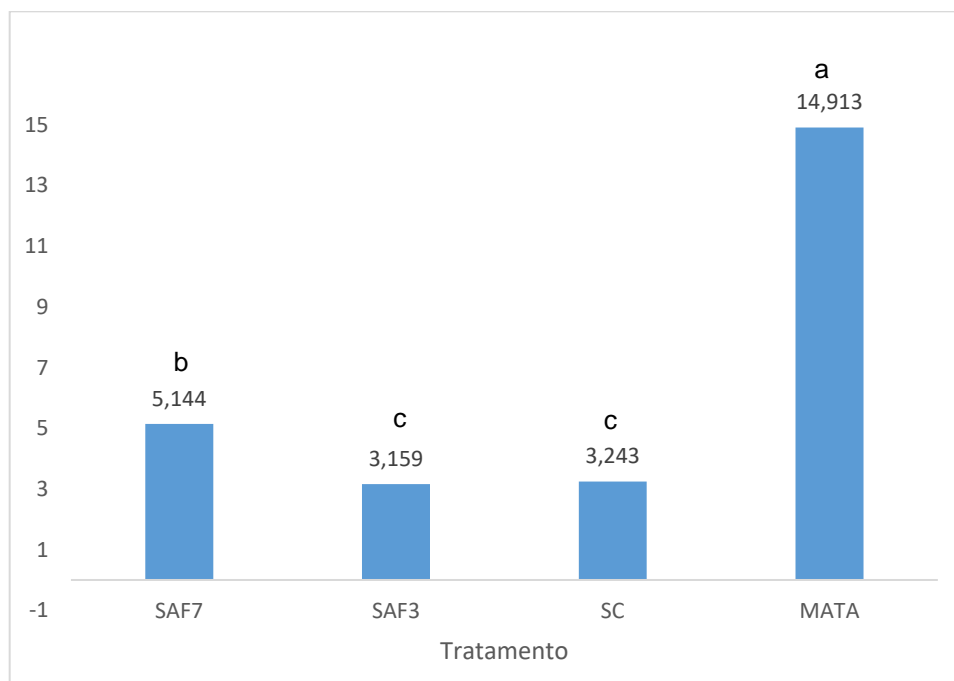
Os teores de carbono e nitrogênio da biomassa microbiana (CBM e NBM, respetivamente) é apresentada na Tabela 5 que se segue.

Tabela 5 – C e N da biomassa microbiana na profundidade de 0-10 cm, em g kg⁻¹.

Tratamento	CBM	NBM
SAF7	80,61	1,30
SAF3	79,03	1,73
SC	53,53	2,57
MATA	31,43	1,30

Em relação à beta-glicosidase, o tratamento que apresentou maior valor de atividade enzimática foi a MATA, seguida pelo SAF7, SC e SAF3 (Gráfico 5).

Gráfico 5 – Análise enzimática beta-glicosidase, em mg de p-nitrofenol kg⁻¹ de solo h⁻¹ na profundidade 0 – 10 cm.



Fonte: a própria autora

5 DISCUSSÃO

5.1 CARBONO E NITROGÊNIO DO SOLO

Os teores mais aproximados de C_{org} no SAF7 ao longo da profundidade podem estar relacionados com a maior presença de raízes, microrganismos engenheiros do solo, como as minhocas, e maior material orgânico.

Por se tratar de áreas com mesma classificação de solo, entendemos que a diferença nos resultados obtidos pode ter sido influenciado pela maior adição de material orgânico provenientes das árvores e demais espécies de cultivo, o que promove maior acúmulo de C_{org} no solo quando comparados com o SC. A proximidade dos valores dos SAFs em relação à MATA pode indicar que em ambientes onde o sistemas de cultivo são bem manejados, podem promover condições semelhantes ao natural (ZHANG et al., 2020).

O elevado acúmulo de C, seguindo Luizão (2007), pode estar ligado às práticas conservacionistas que promovem uma nova cobertura vegetal mais diversificada e de qualidade nutricional que proporciona a cobertura e proteção do solo, mantendo maior umidade, ativando a biota, fornecendo C e nutrientes liberados ao passo em que ocorre a decomposição, que contribui para a formação de uma nova MO do solo.

O teor de MO do solo de cada ecossistema resulta do balanço entre as taxas de adição, que ocorrem via resíduos de plantas e de animais, e as taxas de perda, pela oxidação do carbono a CO_2 na respiração microbiana, por erosão e por percolação (CHÁVEZ et al., 2011).

Freitas et al. (2016) observaram que o SAF apresentou teores de carbono no solo superiores aos demais sistemas estudados (pastagem cultivada, roça de toco e mata nativa) na camada 0-5 cm no período seco, o que também foi verdade para os teores de MO, apresentando valores significativamente superior, e, conseqüentemente, resultou em EstC no solo mais elevado em relação às demais formas de uso. Por esses sistemas de produção manterem cobertura vegetal semelhante às florestas, permitem manutenção da fertilidade do solo fundamentada no aporte e ciclagem dos resíduos orgânicos e possibilita grande acúmulo de C nos compartimentos da biomassa e solo através dos benefícios da MO nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo.

BUTZKE et al. (2020) apresentaram resultados sobre a fertilidade e COS em SAFs avaliados em SAF A, aos 4 e 19 anos, SAF B, aos 7 e 22 anos e SAF C,

aos 6 e 21 anos, onde o C_{org} esteve mais concentrado na camada superficial do solo, avaliada em 0-20 cm. Além disso, segundo os mesmos autores, os maiores teores de nutrientes na classe de Latossolo vermelho encontram-se nessa camada superficial e recomendam o não revolvimento, justamente por ter maior conteúdo de MO que é, por sua vez, essencial ao desenvolvimento das culturas nos SAFs.

Em relação ao N, todas as etapas desse ciclo são dependentes dos microrganismos do solo, pois a fixação biológica do N ocorre através da ação dos microrganismos por processos enzimáticos quando há a transformação do nitrogênio atmosférico (N₂) em amônia (NH₃), por exemplo. As bactérias são as principais responsáveis pela mineralização do N orgânico do solo e o conteúdo de MO se apresenta como um bom indicativo do N total, uma vez que quase a totalidade do N do solo se encontra na forma orgânica e é a fonte de energia para os microrganismos fixadores de N (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

Além disso, outro fator que pode ter influência significativa nos teores de C_{org} e N do solo é a agregação do solo, pois a conversão do uso da terra não afeta apenas a quantidade desses fatores, mas também influencia a distribuição entre as classes de tamanho dos agregados, pois a estabilidade dos agregados varia com as características inerentes ao solo e com os sistemas de manejo. Puerta et al. (2018) demonstram que há preferencialmente forte acúmulo de C em macroagregados grandes (>2000 µm) no solo de 0 a 6 cm de profundidade numa área de conversão de manejo convencional para orgânico.

Solos que sofrem intenso revolvimento provocam a quebra dos agregados e pode reduzir drasticamente a estabilidade dos mesmos. Isso influencia diretamente na desproteção da MO que fica presente no seu interior, o que acelera o processo de decomposição e, conseqüentemente, diminui cada vez mais a resistência dos agregados (GUEST et al., 2022).

5.2 ESTOQUE DE CARBONO E DENSIDADE DO SOLO

O EstC no SAF7 se sobressaiu aos demais, seguido do SAF3, MATA e SC, onde os maiores teores são apresentados nas camadas de 10 – 20 cm de profundidade. Freitas et al. (2018) mostraram, de forma geral, valores semelhantes de EstC em latossolos em sistemas de manejo natural e alterado, decrescendo na ordem: mata nativa, reflorestamento e cultivo de cana-de-açúcar.

O aumento ou diminuição do EstC depende da quantidade e qualidade da MO que entra no solo que, junto à taxa de decomposição, são determinados pela interação entre o clima, atributos do solo e uso e manejo das terras (FIDALGO et al., 2007).

Segundo Chen et al. (2017) e Guo et al. (2020), os SAFs têm maior potencial de sequestro de C e N em relação à monocultura, onde apresenta maior EstC nas camadas do subsolo, pois o acúmulo de Corg é atribuído principalmente ao aumento da biomassa de resíduos, pelo menor distúrbio e pela proteção dos mesmos pela alta atividade e quantidade microbiana.

A densidade, por sua vez, se apresentou mais constante em profundidade no SAF7 e, nas demais, mais variável entre as camadas.

Conforme a literatura, ela varia entre 0,40 a 0,80 Mg m⁻³ para solos orgânicos, por volta de 1,00 Mg m⁻³ para solos com estrutura granular, porosa, e entre 1,50 a 1,80 Mg m⁻³ em solos com estrutura compacta ou similar. Solos que apresentam maior teor de argila e MO possuem a tendência de apresentarem menor densidade do solo, entre 1,00 e 1,20 Mg m⁻³. Por outro lado, solos arenosos podem apresentar valores médios entre 1,20 a 1,40 Mg m⁻³, ou seja, maiores do que os de solos argilosos (TAVARES FILHO, 2013).

Conforme os valores de referência, com exceção da primeira camada do SAF3, das duas camadas superficiais do SC e de todas as camadas da MATA, as demais tiveram valores acima do valor médio apresentado para solos arenosos, ou seja, superior a 1,40 Mg m⁻³. De forma geral, quanto maior o valor da Ds, pode-se interpretar que mais compacto é, onde apresentaria maior resistência à penetração de raízes e menor infiltração ocasionada pela redução dos poros, principalmente os macroporos, contudo, não é a realidade encontrada das áreas estudadas, pois os sistemas que apresentam suas áreas mais exploradas pelas raízes de 0 – 20 cm e maior macrofauna, são as áreas que apresentaram maior densidade, ou seja, SAF7 e SAF3.

Assim, no que diz respeito à interação EstC-Ds, os valores obtidos de EstC e densidade aumentaram em profundidade, apresentando valores superiores nas camadas mais profundas. Quanto ao Corg, teve efeito inverso, ou seja, se apresentou maior na superfície do que em profundidade.

Haghighi et al. (2020) mostrou que a intensificação da produção arável se concentrou em rotações curtas intensivas que esgotam o EstC e

enfraquecem a estrutura do solo, aumentando a degradação e compactação. Por mais que, teoricamente isso seja aplicável, ao observar os dados obtidos, percebemos que nem sempre a diminuição do EstC está relacionada com o aumento da Ds, esta utilizada para auxiliar na identificação de compactação do solo.

Queiroz et al. (2012) encontraram correspondências entre EstC e Ds semelhantes, onde o maior EstC também se apresentou em áreas sob maior Ds.

As interações das raízes das plantas e a estrutura do solo podem explicar parcialmente tal fato, pois são bidirecionais, ou seja, também há um efeito das raízes das plantas na estrutura do solo. Durante sua exploração da área, as raízes avançam pelo solo e alteram as propriedades físicas, químicas e biológicas em sua rizosfera e essas alterações podem persistir após a degradação das raízes. Como os diâmetros das raízes geralmente são maiores que os poros existentes, acredita-se que as raízes em crescimento compactem a rizosfera (LUCAS et al., 2019).

Outro detalhe a ser considerado é que estes resultados estão ligados ao histórico de uso da área. A recuperação do solo em áreas degradadas é um processo lento, e mesmo após dez anos, não foi possível restabelecer as propriedades físicas ideais na floresta sob restauração passiva.

5.3 ANÁLISES MICROBIOLÓGICAS

O CBM e o NBM correspondem à parte viva da MO total do solo, assim, se há o emprego de mais material orgânico, conseqüentemente há o maior crescimento dessa parte viva, e os resultados podem superar os valores da mata. Guimarães et al. (2017) notaram que quanto maior a diversidade vegetal do sistema, maior é o valor de CBM, provavelmente por favorecerem o estabelecimento dos microrganismos no solo através de distintas fontes de energia para os mesmos, assim como vimos em nossos resultados.

Possivelmente, os resultados de CBM mais altos nos tratamentos em relação à MATA podem ter sido estimulados pela soma de fatores, como os restos vegetais presentes com a constante adição diferenciada de material orgânico, promovendo o aumento da população dos microrganismos e da atividade de enzimas envolvidas na decomposição da MO no solo.

Observando o comportamento do CBM e da beta-glicosidase,

notamos que quando a análise enzimática foi alta, o CBM foi baixo e vice-versa. Paiva et al. (2013) apresentou resultados semelhantes ao estudar a microbiota e as enzimas de SAFs por três anos e concluiu que enquanto o CBM aumentou, a beta-glicosidase decresceu pelo aumento da variedade de compostos orgânicos no solo ocasionada pelas práticas conservacionistas adotadas indicando que as práticas promovem a melhoria da qualidade do solo.

As maiores atividades de beta-glicosidase na MATA e no SAF7 podem estar relacionadas com a presença e a qualidade de resíduos orgânicos de origem vegetal acumulados na superfície do solo (MENDES et al., 2003) que podem funcionar como fontes dessa enzima ou como estímulo para sua produção. O aumento da atividade enzimática pode estar ligado à estabilização do carbono no solo, sendo uma mudança qualitativa na MO do solo. Ela auxilia na ciclagem de nutriente, podendo indicar como a diversidade funcional da comunidade microbiana é impactada e atua diretamente no ciclo do carbono na etapa final do processo de decomposição da celulose (BINDE et al., 2021).

Os resultados sugerem que a MATA se destaca nos valores mais altos de atividade enzimática pela maior disponibilidade e decomposição de material orgânico rico em celulose, assim como o SAF7 também apresenta, indicando ganho qualitativo na saúde do solo.

Binde et al. (2021) considera que o estudo realizado com enzimas ainda não possui muito aporte para comparações, como tabelas e gráficos como referências, pois se trata de um estudo onde há diversos tipos de interações biológicas, físicas e químicas além do posicionamento geográfico e fatores climáticos, o que dificulta comparações com outras publicações. Contudo, é importante ressaltar que os valores levantados em cada trabalho são expressivos ao comparar dados obtidos nos solos com manejo conservacionistas e convencionais.

6 CONCLUSÃO

O EstC nos sistemas agroflorestais, tanto o estabelecido, de 7 anos, quanto o sistema com 3 anos, apresentaram valores superiores ao sistema convencional, o que evidencia o potencial dos sistemas agroflorestais em conservar mais o solo em comparação aos sistemas convencionais, ainda comumente utilizados. Além dos maiores EstC, eles proporcionaram maiores concentrações de COT em profundidade (0 – 20 cm), maiores concentrações de carbono da biomassa microbiana e maiores atividades enzimáticas. Isso mostra que o manejo empregado influencia positivamente a atividade microbiana no solo, independentemente da Ds do mesmo.

A Ds não apresentou efeitos negativos quanto ao EstC, uma vez que o EstC aumentou mesmo com o aumento da Ds; já em relação ao Corg, este se apresentou maior enquanto a Ds foi menor e menor quando a Ds foi maior. Uma análise de componentes principais (PCA) é recomendada para melhores conclusões.

Análises mais detalhadas, como a correlação da biomassa e beta glicosidase, associadas à estabilidade de agregados e condições edafoclimáticas que visam a complementar este trabalho são sugeridas para melhores conclusões de interação da MO e EstC, visto que a estabilização e interações com os microrganismos do solo a partir dos agregados e umidade do solo influenciam nessa distribuição e contribuem para o melhor entendimento de como os manejos estão influenciando a qualidade do solo, assim como o quociente microbiano, relação CBM e COT, que reflete a quantidade de COS imobilizado pela biomassa microbiana e a qualidade da matéria orgânica do solo.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE FILHO, M. R.; PEREIRA FILHO, I. A.; VIANA, J. H. M.; ALVARENGA, R. C.; CRUZ, J. C. **Preparo convencional do solo**. Embrapa Solos. 2021 Disponível em: https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/milho/arvore/CONTAG01_32_592005_23355.html.
- ALVES, T. S.; CAMPOS, L. L.; ELIAS NETO, N.; MATSUOKA, M.; LOUREIRO, M. F. Biomassa e atividade microbiana de solo sob vegetação nativa e diferentes sistemas de manejos. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 33, p. 341-347, 2011.
- ANDRADE, D.; PASINI, F.; SCARANO, F. R. Syntropy and innovation in agriculture, **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 45, p. 20-24, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2020.08.003>
- ALFAHAM, A.; AMATO, M. T.; OMONDI, E.; GIMÉNEZ, D.; PLANTE, A. F. Assessing the impact of organic versus conventional agricultural management on soil hydraulic properties in a long-term experiment. **Soil Science Society of America Journal**. v. 85, p. 2135-2148, 2021. doi:10.1002/saj2.20314
- BALBINOT, R.; V., A. F.; SANQUETTA, C. R.; CALDEIRA, M. V. W.; SILVESTRE, R. ESTOQUE DE CARBONO EM PLANTAÇÕES DE Pinus spp. EM DIFERENTES IDADES NO SUL DO ESTADO DO PARANÁ. **Floresta**, v. 38, n. 2, p. 317-324, jun. 2008. doi: 10.5380/rf.v38i2.11626
- BINDE, D. R.; SANTOS, T. R. R.; MORAIS, M. A. V.; CARVALHO, M. A. P. Eficiência do uso de sistemas agroflorestais sucessionais na recuperação do solo em flor de IBEZ/Barra do Garças-MT. Revista Panorâmica. Edição Especial, 2021. ISSN 2238-9210
- BORGES, W. L. B. Alterações físicas em Latossolos cultivados com plantas de cobertura em rotação com soja e milho. Revista Brasileira de Ciências Agrárias, v 11, p.149-155, 2016.
- BUTZKE, A. G.; DE OLIVEIRA, T. K.; BRAGA DE PAULA, A. E.; FIUZA, S. S. Fertilidade e carbono orgânico do solo em sistemas agroflorestais de duas décadas compostos de castanheira, cupuaçuzeiro e pupunheira na Amazônia Ocidental. Científica, Jaboticabal, v. 48, p. 160, 2020. doi: 10.15361/1984-5529.2020v48n2p160-169
- CHÁVEZ, L.F.; ESCOBAR, L. F.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. F.; MEURER, E. J. Diversidade metabólica e atividade microbiana no solo em sistema de integração lavoura-pecuária sob intensidades de pastejo. **Pesquisa agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 10, p. 1254-1261, 2011.
- CHEN C.; LIU W.; JIANG X.; WU J. Effects of rubber-based agroforestry systems on soil aggregation and associated soil organic carbon: Implications for land use. **Geoderma**, v. 299, p. 13-24, 2017. doi:10.1016/j.geoderma.2017.03.021

CROPLIFE (Brasil) (org.). **Conheça o Plano ABC+**. 2022. Disponível em: <<https://croplifebrasil.org/noticias/conheca-o-plano-abc/>>

EL MUJTAR, V.; MUÑOZ, N.; PRACK MC CORMICK, B.; PULLEMAN M.; TITTONELL, P. Role and management of soil biodiversity for food security and nutrition; where do we stand?, **Global Food Security**. v. 20, p. 132-144, 2019. doi: 10.1016/j.gfs.2019.01.007

FIDALGO, E. C. C.; BENITES, V. M.; MACHADO, P. L. O. A.; MADARI, B. E.; COELHO, M. R.; MOURA, I. B.; LIMA, C. X. Estoque de carbono nos solos do Brasil. Rio de Janeiro, RJ, Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 121, EMBRAPA, dez 2007.

FRIEDLINGSTEIN, P.; JONES, M. W.; O'SULLIVAN, M.; ANDREW, R. M.; BAKKER, D. C. E.; HAUCK, J.; QUÉRÉ, C. L.; PETERS, G. P.; PETERS, W.; PONGRATZ, J.; SITCH, S.; CANADELL, J. G.; CIAIS, P.; JACKSON, R. B.; ALIN, S. R.; ANTHONI, P.; BATES, N. R.; BECKER, M.; BELLOUIN, N.; BOPP, L.; CHAU, T. T. T.; CHEVALLIER, F.; CHINI, L. P.; CRONIN, M.; CURRIE, K. I.; DECHARME, B.; DJEUTCHOUANG, L. M.; DOU, X.; EVANS, W.; FEELY, R. A.; FENG, L.; GASSER, T.; GILFILLAN, D.; GKRTZALIS, T.; GRASSI, G.; GREGOR, L.; GRUBER, N.; GÜRSES, Ö.; HARRIS, I.; HOUGHTON, R. A.; HURTT, G. C.; IIDA, Y.; ILYINA, T.; LUIJKX, I. T.; JAIN, A.; JONES, S. D.; KATO, E.; KENNEDY, D.; GOLDEWIJK, K. K.; KNAUER, J.; KORSBAKKEN, J. I.; KÖRTZINGER, A.; LANDSCHÜTZER, P.; LAUVSET, S. V.; LEFÈVRE, N.; LIENERT, S.; LIU, J.; MARLAND, G.; MACGUIRE, P. C.; MELTON, J. R.; MUNRO, D. R.; NABEL, E. M. S.; NAKAOKA, S-I.; ONO, T.; PIERROT, D.; POULTER, B.; REHDER, G.; RESPLANDY, L.; ROBERTSON, E.; RÖDENBECK, C.; ROSAN, T. M.; SCHWINGER, J.; SCHWINGSHACKL, C.; SÉFÉRIAN, R.; SUTTON, A.; SWEENEY, C.; TANHUA, T.; TANS, P. P.; TIAN, H.; TILBROOK, B.; TUBIELLO, F.; VAN DER WERF, G. R.; VUICHARD, N.; WADA, C.; WANNINKHOF, R.; WATSON, A. J.; WILLIS, D.; WILTSHIRE, A. J.; YUAN, W.; YUE, C.; YUE, X.; ZAEHLE, S.; ZENG, J.. Global Carbon Budget 2021. **Earth System Science Data**. v. 14, n. 4, p. 1917-2005, 2022. Doi: 10.5194/essd-14-1917-2022.

EMBRAPA (Brasília). Centro Nacional de Pesquisas de Solos (org.). **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Brasília, DF: Embrapa, 3. ed., p. 577, 2017.

EMBRAPA (Brasília). **Visão 2030: o futuro da agricultura brasileira**. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

FAO. **FAO's work on agroecology**. A Pathway to Achieving the SDGs. Food and Agriculture Organization of the United Nations (2018). Disponível em <<http://www.fao.org/3/I9021EN/i9021en.pdf>>.

FAO. **The State of Food and Agriculture**. Food and Agriculture Organization of the United Nations (2016). Disponível em: < <http://www.fao.org/3/a-i6030e.pdf>>.

FÁVERO, C.; LOVO, I. C.; MENDONÇA, E. S. Recuperação de área degradada com sistema agroflorestal no vale do Rio Doce, Minas Gerais. **R. Árvore**, Viçosa, v. 32, n. 5, p. 861-868, 2008.

FERNANDES, F. A.; FERNANDES, A. H. B. M. **Atualização dos métodos de cálculo de estoques de carbono do solo sob diferentes condições de manejo**. Corumbá: Embrapa Pantanal, p. 5, 2013. Disponível em: <www.cpap.embrapa.br/publicacoes/online/COT95.pdf>

FONSECA, R. R.; BARBOSA, K. S. S.; JESUS, K. E.; SILVA, L. M.; SOUSA, N. T. B.; SILVA, G. R.; PAULETTO, D.; OTAKE, Y. F. Densidade e umidade do solo em sistemas agroflorestais. **Agroecossistemas**, v. 10, n. 2, p. 367 – 374, 2018. ISSN online 2318-0188

FREITAS, I. C.; SANTOS, F. C. V.; CUSTODIO FILHO, R. O.; CORRECHEL, V. Carbono no solo, acúmulo e qualidade da serapilheira em sistemas de produção familiar. *Floresta*, Curitiba, PR, v. 46, n. 1, p. 31-38, mar 2016. DOI: 10.5380/ufv.v46i1.42065

FREITAS, L.; OLIVEIRA, I. A.; CASAGRANDE, J. C.; SILVA, L. S.; CAMPOS, M. C. C. Estoque de carbono de latossolos em sistemas de manejo natural e alterado. **Ciênc. Florest.**, 2018. doi: 10.5902/1980509831575

GHABBOUR, E. A.; DAVIES, G.; MISIEWICZ, T.; ALAMI, R. A.; ASKOUNIS, E. M.; CUOZZO, N. P.; FILICE, A. J.; HASKELL, J. M.; MOY, A. K.; ROACH, A. C.; SHADE, J. National comparison of the total and sequestered organic matter contents of conventional and organic farm soils. **Advances in Agronomy**, 1–35, 2017.

GABRIEL FILHO, A.; PESSOA, A. C. S.; STROHHAecker, L.; HELMICH, J. J. Preparo convencional e cultivo mínimo do solo na cultura de mandioca em condições de adubação verde com ervilhaca e aveia preta. **Ciência Rural**, v. 30, n. 6, p. 953-957, mar. 2000.

GOURDJI, P.; LÄDERACH, A.M.; VALLE, C.Z.; MARTINEZ, D.B. Lobell Historical climate trends, deforestation, and maize and bean yields in Nicaragua **Agric. For. Meteorol.**, v. 200, p. 270-281, 2015. doi: .1016/j.agrformet.2014.10.002).

GUIMARÃES, N.F.; GALLO, A.S.; FONTANELLI, A.; MENEGHIN, S. P.; SOUZA, M. D. B.; MORINIGO, K. P. G.; SILVA, R. F. Biomassa e atividade microbiana do solo em diferentes sistemas de cultivo do cafeeiro. **Revista de Ciências Agrárias**, v.40, p. 34-44, 2017.

GUO, J.; WANG, B.; WANG, G.; MYO S. T. Z.; CAO, F. Effects of three cropland afforestation practices on the vertical distribution of soil organic carbon pools and nutrients in eastern China. **Global Ecology and Conservation**, 2020. doi: 10.1016/j.gecco.2020.e00913

HAGHIGHI, I.; MARTIN, T.; REIFFSTECK, P.; DUC, M.; SZYMKIEWICZ, F.; CHEVALIER, C. An automated crumb test procedure to estimate the soil disaggregation properties in contact with water. **Eur. J. Environ. Civ. Eng.** 2020. doi: 10.1080/19648189.2020.1854123

HARKES, P.; SULEIMAN, A.K.A.; VAN DEN ELSEN, S.J.J. ET AL. Conventional and organic soil management as divergent drivers of resident and active fractions of major

soil food web constituents. **Sci Rep.** v. 9, 2019. doi: 10.1038/s41598-019-49854-y

HARTMANN, M.; B. FREY, J.; MAYER, P.; MÄDER, F. Widmer Distinct soil microbial diversity under long-term organic and conventional farming **ISME J.**, v. 9, p. 1177-1194, 2015. doi: 10.1038/ismej.2014.210

HISTÓRICO. 2021. Federação Brasileira do Sistema Plantio Direto. Disponível em: <https://febrapdp.org.br/historico>. Acesso em: 24 abr. 2021.

IAPAR (Londrina). Instituto Agronômico do Paraná (org.). **Manual de análise química de solo e controle de qualidade.** n. 76. Londrina, PR, 1992.

KIHARA, J.; SILESHI, G.W.; NZIGUHEBA, G.; KINYUA M.; ZINGORE, S.; SOMMER, R. Application of secondary nutrients and micronutrients increases crop yields in sub-Saharan Africa. **Agron. Sustain. Dev.**, p. 25, 2017. doi: 10.1007/s13593-017-0431-0

LIANG C.; SCHIMEL J. P.; JASTROW J. D. The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage **Nat. Microbiol.** v. 2, p. 1-6, 2017. 10.1038/nmicrobiol.2017.105 2017 28

LEHMANN, J.; HANSEL, C. M.; KAISER, C.; KLEBER, M.; MAHER, K.; MANZONI, S.; NUNAN, N.; REICHSTEIN, M.; SCHIMEL, J. P.; TORN, M. S.; WIEDER, W. R.; KÖGEL-KNABNER, I. Persistence of soil organic carbon caused by functional complexity. **Nature Geoscience**, v. 13, n. 8, p. 529-534, 2020. <http://dx.doi.org/10.1038/s41561-020-0612-3>.

LORENZ, K.; LAL, R. Soil organic carbon sequestration in agroforestry systems. A review. **Agronomy For Sustainable Development**, v. 34, n. 2, p. 443-454, fev. 2014. <http://dx.doi.org/10.1007/s13593-014-0212-y>.

LORI, M.; SYMNACZIK, S.; MÄDER P.; DE DEYN, G; GATTINGER, A. Organic Farming Enhances Soil Microbial Abundance And Activity — A meta-analysis and meta-regression. **Journal pone**, v. 12, p. 1-25, 2017. doi: 10.1371/journal.pone.0180442

LUCAS, M., SCHLÜTER, S., VOGEL, HJ. ET AL. Roots compact the surrounding soil depending on the structures they encounter. **Sci Rep.** nov 2019. doi: 10.1038/s41598-019-52665-w

LUIZÃO, F. J. Ciclos de nutrientes na Amazônia: respostas às mudanças ambientais e climáticas. **Ciência e Cultura**, v. 59, n. 3, p. 31-36, 2007.

LUO, Z.; FENG, W.; LUO, Y.; BALDOCK, J.; WANG, E. Soil organic carbon dynamics jointly controlled by climate, carbon inputs, soil properties and soil carbon fractions. **Global Change Biology**, Wiley, v. 23, n. 10, p. 4430-4439, jun. 2017. <http://dx.doi.org/10.1111/gcb.13767>.

MACEDO, J. L. V. **Sistemas Agroflorestais: princípios básicos.** Instituto Amazônia. Amazonas, p. 13-14, 2013.

MACHADO, P.L.O.A. Carbono do solo e mitigação da mudança climática global. **Química Nova**, v.28, p.329-334, 2005.

MAPA de solos do estado do Paraná. Embrapa Solos, 2020. Disponível em: http://geoinfo.cnps.embrapa.br/layers/geonode%3Aparana_solos_20201105.

MARTINS, T. P.; RANIERI, V. E. L.. Sistemas agrofloretais como alternativa para as reservas legais. **Ambiente & Sociedade**. v. 17, n. 3, p. 79-96, 2014. doi: 10.1590/s1414-753x2014000300006.

MENDES, I. C.; CHAER, G. M.; SOUSA, D. M. G.; JUNIOR, F. B. R.; DANTAS, O. D.; OLIVEIRA, M. I. L.; LOPES, A. A. C.; SOUZA, L. M. Bioanálise de solo: A mais nova aliada para a sustentabilidade agrícola. *Nutrição de plantas ciência e tecnologia (NPCT)*, Piracicaba, SP, n. 8, p. 1-11, dez 2020.

MENDES, I. C.; SOUSA, D. M. G.; REIS JUNIOR, F. B.; LOPES, A. A. C. Indicadores de qualidade biológica para manejo sustentável de solos arenosos. *Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*, v. 44, p. 20-25, 2018.

MENDES, I. C.; SOUSA, D. M. G.; REIS JUNIOR, F. B.; LOPES, A. A. C.; SOUZA, L. M. Bioanálise de solo: Aspectos teóricos e práticos. **Tópicos em Ciência do Solo**, p. 399-462, 2019.

MENDES, I. C.; SOUZA, L. V.; RESCK, D. V. S.; GOMES, A.C. Propriedades biológicas em agregados de um latossolo vermelho-escuro sob plantio convencional e direto no cerrado. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, jun 2003. doi: 10.1590/S0100-06832003000300005

MOREIRA, F.M.S.; SIQUEIRA, J.O. Microbiologia e bioquímica do solo, **Editora UFLA**, Lavras, 2 ed., p. 729, 2006.

OLIVEIRA, E. S.; REATTO, A.; ROIG, H. L. Estoques de carbono do solo segundo componentes da paisagem. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, Brasília, v. 32, n. 1/2, p. 71-93, ago. 2015. Disponível em: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/138868/1/Estoques-de-carbono-do-solo.pdf>.

OLIVEIRA, J.; LIMA, A.; MININI, D.; SILVA, E. Usos, Efeitos E Potencial Tóxico Dos Agrotóxicos Na Qualidade Do Solo. **Agrarian Academy**, v. 5, n. 9, p. 454-467, 2018. doi: 10.18677/agrarian_academy_2018a45.

PAIVA, T. S.; FERRARESI, T. M.; DIDONET, A. D.; FERREIRA, E. P. B. Sistema Agroflorestal: análise microbiana e enzimática do solo. In: Resumos do VIII Congresso Brasileiro de Agroecologia, 2013, Porto Alegre. v. 8, n. 2, nov 2013. ISSN 2236-7934

PUERTA, V.L.; PUJOL PEREIRA, E.I.; WITTEWER, R.; VAN DER HEIJDEN, M. J. Six Improvement of soil structure through organic crop management, conservation tillage and grass-clover ley. **Soil Tillage Res.**, v. 180, p. 1-9, 2018. doi:

10.1016/j.still.2018.02.007

PULROLNIK, K. **Transformações do Carbono no Solo**. Planaltina: Embrapa Cerrados, p. 35, 2009. Disponível em: <chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcgclclefindmkaj/https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CPAC-2010/31495/1/doc-264.pdf>

QUEIROZ, L. R.; NETO, M. M. G.; ALVARENGA, R. C.; MENDES, F. F.; SIMÃO, E. P.; WILDA, L. R. M. Estoque de carbono e densidade de solo sob cultivo com diferentes culturas agrícolas, em Sete Lagoas, MG. In: XXIX Congresso Nacional de milho e sorgo, 2012, Água de Lindóia, 2012, p. 1705-1711.

SALES R. P.; PORTUGAL, A. F.; MOREIRA, J. A. A.; KONDO, M. K.; PEGORARO, R. F. Qualidade física de um Latossolo sob plantio direto e preparo convencional no semiárido. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, CE, v.47, n.3, p.429-438, 2016.

SALTON, J. C. **Matéria orgânica e agregação do solo na rotação lavoura-pastagem em ambiente tropical**. 2005. 178 f. Tese (Doutorado) - Curso de Faculdade de Agronomia, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

TABATABAI, M. A. Soil Enzymes. In: METHODS of soil analysis: part 2: **microbiological and biochemical properties**. Madison: SSSA, 5 ed., p. 775-833, 1994.

TANG, L.; KE, X.; ZHOU, T.; ZHENG, W.; WANG, L. Impacts of cropland expansion on carbon storage: A case study in Hubei, China. **Journal of Environment Management**, p. 1-12, mar. 2020.

TAVARES FILHO, J. **Física e conservação do solo e água**. Londrina: Eduel, 2013.
TROIAN, D.; ROSSET, J. S.; MARTINS, L. F. B. N.; OZÓRIO, J. M. B.; CASTILHO, S. C. P.; MARRA, L. M. Carbono orgânico e estoque de carbono do solo em diferentes sistemas de manejo. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, Centro Universitário de Maringá, v. 13, n. 4, p. 1447-1469, out. 2020. doi: 10.17765/2176-9168.2020v13n4p1447-1469.

TÓTOLA, M. R.; BORGES, C. G. M. Microrganismos e processos microbiológicos como indicadores da qualidade. 2002.

WARDLE, D. A. Biomassa Microbiana: métodos para quantificação da biomassa microbiana do solo. In: HUNGRIA, M.; ARAUJO, R. S. **Manual de Métodos Empregados em Estudos de Microbiologia Agrícola**. Brasília: Embrapa, p. 419-436, 1994.

ZHANG Y.; LIAO, X.; WANG, Z.; WEI, X.; JIA, X.; SHAO, M. Synchronous sequestration of organic carbon and nitrogen in mineral soils after conversion agricultural land to forest. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 295, 2020. doi: 10.1016/j.agee.2020.106866.