


**ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA E MEIO AMBIENTE
ENGENHARIA AGRÍCOLA E AMBIENTAL**

JADY FERNANDES WAILANTE

**Indicadores de qualidade do solo
aplicados a diferentes preparos agrícolas
em sistema orgânico de produção no
estado do Rio de Janeiro**

**UNIVERSIDADE
FEDERAL
FLUMINENSE**



**Niterói
2020**

JADY FERNANDES WAILANTE

Indicadores de qualidade do solo aplicados a diferentes preparos agrícolas em sistema orgânico de produção no estado do Rio de Janeiro

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Agrícola e Ambiental, da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Agrícola e Ambiental.

Orientador:

Prof. Dr. Carlos Rodrigues Pereira

Coorientador:

Dr. Fabiano de Carvalho Balieiro

Niterói,
2020

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE
Gerada com informações fornecidas pelo autor

W138i Wailante, Jady Fernandes
Indicadores de qualidade do solo aplicados a diferentes
preparos agrícolas em sistema orgânico de produção no
Estado do Rio de Janeiro / Jady Fernandes Wailante ; Carlos
Rodrigues Pereira, orientador ; Fabiano de Carvalho Balieiro,
coorientador. Niterói, 2020.
54 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia
Agrícola e Ambiental)-Universidade Federal Fluminense, Escola
de Engenharia, Niterói, 2020.

1. Qualidade do solo. 2. Serviços ecossistêmicos. 3.
Indicadores enzimáticos. 4. Cultivo orgânico. 5. Produção
intelectual. I. Pereira, Carlos Rodrigues, orientador. II.
Balieiro, Fabiano de Carvalho, coorientador. III. Universidade
Federal Fluminense. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDD -

Bibliotecário responsável: Sandra Lopes Coelho - CRB7/3389

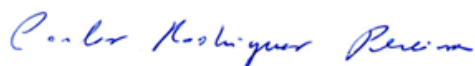
JADY FERNANDES WAILANTE

Indicadores de qualidade do solo aplicados a diferentes preparos agrícolas em sistema orgânico de produção no estado do Rio de Janeiro.

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Agrícola e Ambiental, da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Agrícola e Ambiental.

Aprovada em 28 de agosto de 2020.

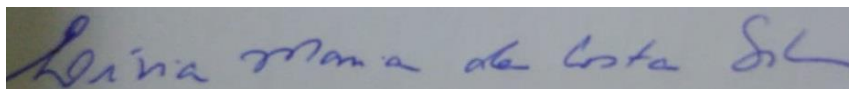
BANCA EXAMINADORA



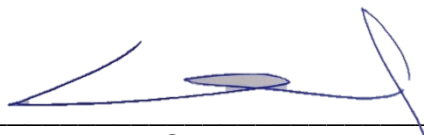
Prof. Carlos Rodrigues Pereira, D.Sc., Orientador, UFF



Fabiano de Carvalho Balieiro, D.Sc., Coorientador, Embrapa



Prof.^a Livia Maria Costa Silva, D.Sc., UFF



Prof. Leonardo da Silva Hamacher, D.Sc., UFF

DEDICATÓRIA

À minha família, por todo
o apoio e dedicação.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a minha mãe Márcia, por todo o seu amor e dedicação e por sempre ter me incentivado a buscar conhecimento, se não fosse por você eu não teria chegado até aqui,

Ao meu pai, Juarez, por me apoiar em tudo que faço, por sempre ter possibilitado que eu desse prioridade aos meus estudos e por ser um exemplo pra mim em concretização de sonhos,

A minha avó Dinéia por toda a sua doação, sabedoria e por ser luz na minha vida,

A minha tia Marilúcia pela sua compreensão, amor de mãe e por todo seu apoio ao longo da minha caminhada de estudos,

As minhas irmãs Deborah e Barbarah por sempre me incentivarem a ser uma pessoa melhor,

A minha sobrinha Maya que só pela sua existência deu mais sentido a essa vida,

Agradeço ao meu namorado Lucas, pelo seu companheirismo e por ter estado ao meu lado durante a caminhada na UFF,

A todos os amigos e amigas que me apoiaram ao longo da vida, mas em especial gostaria de agradecer ao Waldyr que esteve comigo em toda a jornada na UFF entre derrotas e vitórias, e que será uma amizade para a vida toda,

Agradeço a Embrapa Solos e ao CNPq, mas em especial ao meu orientador Fabiano Balieiro, pela sua orientação profissional e por seu grande coração, possibilitando que eu realizasse esse trabalho,

Agradeço a Silmara, Gizelle, Bianca e Juacyr da Embrapa Solos, pelo apoio, trabalho e estrutura no laboratório permitindo que eu realizasse os experimentos,

Agradeço aos pesquisadores Ednaldo, Caio, e Eduardo pelo suporte na coleta de amostras de solo,

Agradeço ao laboratório IBRA pela bonificação nas medições de enzimas,

Agradeço ao meu orientador Prof. Carlos Rodrigues Pereira pelo suporte e orientação, Á Profa. Livia Maria por ter sido uma conselheira, e a pessoa que mais me deu força durante o período letivo especial, por ter acreditado em mim, e me incentivado a não desistir.

Ao povo brasileiro que por meio do pagamento de impostos possibilitou que eu tivesse acesso ao ensino superior público e gratuito, e à Universidade Federal Fluminense,

pela infraestrutura, corpo docente, técnicos administrativos e profissionais de limpeza, por terem me proporcionado os anos de maior aprendizagem da minha vida.

*Existia algo inteiro
Antes do céu e da terra.
Silencioso e sem forma,
Imutável e independente.
Sempre em movimento,
em círculo.
Chamemos-lhe mãe do mundo,
Não sei seu nome,
Chamo-lhe Tao...*

*O que não tem limites,
Eternamente flui,
sempre fluindo,
constantemente regressa,*

*O homem obedece à terra,
A terra obedece ao céu,
O Tao obedece á sua própria
natureza.*

(Tao Te Ching)

RESUMO

Apesar dos enormes avanços nas últimas décadas, a análise de componentes biológicos do solo ainda é um desafio para cientistas do solo. Com isso, o uso de indicadores microbiológicos, principalmente enzimas, é um tema que merece ser explorado já que esses indicadores podem ser mais sensíveis em identificar os benefícios causados pela adoção de práticas agrícolas mais conservacionistas. O objetivo deste trabalho foi avaliar a qualidade do solo em diferentes manejos a partir de análise de fertilidade e indicadores da dinâmica da biomassa microbiana: a respiração basal do solo e a atividade enzimática (β -glucosidase, fosfatase ácida e arilsulfatase). O estudo foi realizado a partir de amostragem superficial de um Argissolo Vermelho Amarelo de área experimental dentro da Fazendinha Agroecológica, localizada no município de Seropédica, RJ. O experimento original é composto por 3 tratamentos e 3 repetições, sob experimento em blocos ao caso, contendo sistemas de cultivo de milho em preparos: convencional, plantio direto e cultivo mínimo com enxada rotativa. Utilizou-se como área de referência um sistema agroflorestal (SAF) considerado estável sob aspectos ecológicos e físicos, dada a sua diversidade de espécies e ausência de perturbações físicas à estrutura do solo. A análise a partir do indicador respiração basal como resultado de experimento indicam maior respiração e perdas de carbono sob forma de CO_2 no preparo de cultivo mínimo utilizando a enxada rotativa e, em contraponto, maior eficiência na estabilidade do carbono no sistema agroflorestal, atestando a hipótese inicial dessa estratégia de cultivo, apesar de promover um maior aporte de diferentes resíduos vegetais, sob o solo possui potencial de fixar mais carbono no solo ao longo do tempo. Quanto ao uso de indicadores enzimáticos, de maneira geral, os solos com maiores teores de carbono orgânico apresentaram valores superiores para a atividade das enzimas estudadas e, além disso, atestou-se que esses indicadores enzimáticos se mostraram mais sensíveis na diferenciação da qualidade do solo entre os manejos e são ferramentas eficientes na avaliação da ciclagem de nutrientes no solo.

Palavras-chave: atividade microbiológica do solo, serviços ecossistêmicos, indicadores enzimáticos.

ABSTRACT

Despite enormous advances in recent decades, the analysis of biological parameters of soil is still a challenge for soil scientists. Therefore, the use of microbiological indicators is a topic that merits further exploration. These indicators can be very useful in identifying the benefits of the adoption of more conservationist agricultural practices. The objective of this work was to evaluate soil quality in different production systems using microbiological indicators: basal soil respiration and enzymatic activity (β -glucosidase, acid phosphatase and arylsulfatase). The study was carried out from the superficial sampling of a Red Yellow Argisol from an experimental area inside the Fazendinha Agroecológica, located in the municipality of Seropédica, RJ. The original experiment consists of 3 treatments and 3 repetitions. Under a block experiment, the treatments are conventional corn cultivation systems, no-till and minimum cultivation with rotary hoe. An agroforestry system considered stable from an ecological and physical standpoint was used as a reference area, given its diversity of species and the absence of physical disturbances to its soil structure. The analysis from the baseline respiration indicator as a result of the experiment indicates greater respiration and consequent losses of carbon in the form of CO_2 in the preparation of minimum cultivation using the rotary hoe. In contrast, greater efficiency in carbon stability in the agroforestry system attesting to the hypothesis of this cultivation strategy, in spite of promoting a greater contribution of different plant residues under the soil, it can fix more carbon in the soil over time. As for the use of enzymatic indicators, in general, soils with higher levels of dissipated organic carbon have the highest values for the activity of the studied enzymes and in addition, it was confirmed that the enzyme indicators are more sensitive in determining changes between managements and are efficient tools for assessing nutrient cycling in the soil.

Keywords: soil microbiological activity, ecosystem services, enzymatic indicators.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS

Figura 1. Croqui da disposição da área experimenta estudada34

GRÁFICOS

Gráfico 1. Gráfico comparativo entre PD e CO, das curvas de fluxo de emissão de C-CO₂ acumulativa42

Gráfico 2. Gráfico comparativo entre SAF e PD das curvas de fluxo de emissão de C-CO₂ acumulativa.43

Gráfico 3. Gráfico que mostra a correlação positiva entre o carbono orgânico do solo (COS) e a atividade da enzima β -glucosidase47

Gráfico 4. Gráfico que mostra a correlação positiva entre o carbono orgânico do solo (COS) e a atividade enzimática da fosfatase ácida.47

Gráfico 5. Gráfico que mostra a correlação negativa entre teor de fósforo resina.48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Caracterização da estrutura horizontal do estrato arbóreo e regenerante do SAF multiextratificado, Fazendinha Agroecológica, Seropédica, RJ.....	32
Tabela 2. Dados calculados de capacidade de campo média e massa de água (Ma) para ajuste de umidade durante a incubação.....	35
Tabela 3. Classificação para interpretação dos resultados de parâmetros de fertilidade: carbono orgânico total (COT), Ca+Mg e pH	38
Tabela 4.– Interpretação e classificação dos resultados de fósforo e potássio de acordo com os critérios do manual de adubação e correção do solo para o estado do RJ.....	39
Tabela 5. Médias e desvios padrão dos resultados obtidos de respiração basal do solo em emissões de C-CO ₂ acumuladas.....	40
Tabela 6. Interpretação dos resultados indicadores enzimáticos do solo: atividade enzimática, em comparação com os teores de carbono orgânico do solo(COS).....	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

COS – Carbono orgânico do solo

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

FAO-Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura

GEE- Gases de efeito estufa

IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*

ITPS – *Intergovernmental Technical Panel on Soils*

MOS- Matéria orgânica do solo

QS - Qualidade do solo

RBS – Respiração basal do solo

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS.....	15
2.1 OBJETIVO PRINCIPAL.....	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DA LITERATURA	16
3.1 DEFINIÇÃO E AVALIAÇÃO DE QUALIDADE DO SOLO	16
3.2 INDICADORES DA ATIVIDADE DA MICROBIOTA COMO PARÂMETROS PARA QS	19
3.2.2 <i>Indicadores enzimáticos</i>	19
3.3 ATIVIDADE DA BIOMASSA MICROBIANA A PARTIR DA RESPIRAÇÃO DO SOLO.....	22
3.4 DIFERENTES ESTRATÉGIAS EM SISTEMAS DE MANEJO DE SOLOS AGRÍCOLAS	24
3.4.1 Preparos agrícolas	26
3.4.2 <i>Área de referência: sistema agroflorestal</i>	28
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	31
4.1 LOCAL DO ESTUDO	31
4.1.1 <i>Estrutura da área experimental</i>	31
4.2 AMOSTRAGEM DE SOLO	33
4.2.1 <i>Armazenagem e controle de umidade das amostras de solo</i>	34
4.2.3 <i>Capacidade de campo</i>	34
4.3 ENSAIO LABORATORIAL DE RESPIRAÇÃO BASAL.....	35
4.4 ANÁLISE DA ATIVIDADE ENZIMÁTICA	36
4.5 ANÁLISE DA FERTILIDADE	37
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	37
5.1 FERTILIDADE DO SOLO	37
5.2 ATIVIDADE BIOLÓGICA DO SOLO: RESPIRAÇÃO BASAL E ATIVIDADE ENZIMÁTICA	39
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	49
7. TRABALHOS FUTUROS	51
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

1. INTRODUÇÃO

Os solos tornaram-se um dos recursos mais vulneráveis frente às mudanças climáticas, degradação da terra, perda de biodiversidade e alta demanda por produção de alimentos frente a explosão demográfica (FAO, ITPS, 2015). Diante desse cenário e a fim de garantir a segurança alimentar, além de evitar perdas econômicas, o setor agrícola iniciou a busca por encontrar alternativas para um manejo voltado para a conservação do solo. Esse manejo, ademais, deve ser compatível com o nível tecnológico dos produtores rurais e com o tipo de solo manejado.

A qualidade do solo (QS) é um conceito relativamente recente e é capaz de contemplar uma visão mais holística do solo. É possível ter um solo com elevadas taxas de produtividade, mas que essas estejam condicionadas a elevadas doses de corretivos que poderiam ser reduzidos com a adoção de manejos chamados conservacionistas (MENDES et al., 2018).

O exagero na utilização de insumos gera uma condição que não é sustentável em longo prazo, ocasionando em riscos de contaminação por substâncias tóxicas no ambiente, culminando em impactos ambientais significativos. Além do mais, o uso excessivo desses insumos gera gastos econômicos exagerados aos agricultores. Desse modo, o atingimento de maiores níveis de QS em sistemas agrícolas pode gerar benefícios como: perenidade da produção, resiliência às mudanças climáticas e assim, alcançar o aumento dos níveis de sustentabilidade do setor agrícola.

Nesse contexto, surge a necessidade do estudo dos serviços ecossistêmicos, esse conceito possui como princípio que as atividades econômicas, sociais e as relações humanas sofrem grande impacto devido a mudanças nos serviços gerados por ecossistemas, permeando assim, o estudo da dinâmica entre esses serviços gerados pela natureza e variáveis de atividades humanas (SUHKDEV, 2008). Com isso, pesquisas que trabalhem em prol do conhecimento da dinâmica desses serviços, permitem avaliar o uso de instrumentos de monitoramento da qualidade do solo, podendo, assim, atingir uma maior eficiência nos serviços ecossistêmicos prestados por esse sistema.

O manejo e os preparos realizados no solo podem alterar a sua qualidade. Sabe-se que os benefícios promovidos por sistemas mais conservacionistas promovem superioridade comparativa a esses sistemas se comparados a sistemas convencionais de manejo (TÓTOLA E CHAER, 2002). Nessa perspectiva, as alterações no ambiente com origem em ações antrópicas de atividades produtivas

agrícolas devem ser monitoradas.

Portanto, cientistas agrícolas da atualidade têm como pauta encontrar indicadores interpretáveis de parâmetros de sustentabilidade para o setor, a fim de decidir sobre as estratégias de manejo mais sustentáveis e, com isso, incentivar a aplicação desse conhecimento, no intuito de obter taxas de produtividade elevadas a menores custos financeiros, e, a menores custos ambientais.

Dessa forma, indicadores da qualidade do solo devem ser selecionados como sendo capazes de serem interpretados agindo como fonte de dados mensuráveis dos atributos do solo que não podem ser medidos diretamente. Um indicador pode ser formado por apenas uma variável ou uma construção complexa de variáveis múltiplas as quais medem um processo, o qual se constitui em um índice (BURGER, KELTING, 1999; TÓTOLA e CHAER, 2002).

Portanto, o uso de indicadores como ferramenta de monitoramento da qualidade do solo (QS) permite a avaliação das alterações e perturbações que ocorrem a QS, principalmente em ambientes antropizados, visando possibilitar agir com precaução frente adanos irreversíveis á saúde do solo e atingir práticas mais sustentáveis. Entretanto, segundo Mendes et al. (2018) os aspectos relacionados ao funcionamento biológico são os parâmetros menos explorados e, portanto, mais desconhecido do solo.

Diante deste cenário, o presente trabalho objetivou avaliar as mudanças na fertilidade do solo, na atividade enzimática e na taxa de respiração basal como sendo indicadores de QS frente a manejos diferenciados do solo em sistema de produção orgânico de milho (*Zea mays L.*).

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo principal

Comparar a qualidade do solo sob diferentes estratégias de manejos agrícolas (convencional, cultivo mínimo, plantio direto) em um sistema de produção de milho orgânico, tendo como referência um sistema agroflorestal.

2.2 Objetivos específicos

i) Avaliar a atividade enzimática (β -glucosidase, fosfatase ácida e arilsulfatase) em solos sob manejos diferenciados do solo e um sistema de referência agroflorestal.

ii) Estimar a atividade microbiana de solos sob diferentes manejos, a partir de um ensaio de respiração basal.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Definição e avaliação de qualidade do solo

A adequação do solo para a produção agrícola tem se fundamentado, por anos, em manter níveis elevados da fertilidade do solo. No entanto, o conceito de fertilidade utiliza como critérios apenas os aspectos químicos em termos de fornecimento para as culturas apenas de nutrientes químicos e água.

Segundo Embrapa (2013), a fertilidade do solo corresponde à capacidade desse sistema em fornecer nutrientes em quantidade adequada às necessidades da cultura. Entretanto sabe-se que as intensivas ações antrópicas de preparo do solo estão causando altas taxas de degradação desse sistema.

A degradação do solo é um dos problemas globais mais debatidos no século XXI sendo esse de ocorrência especialmente grave nos trópicos e subtropicais. Algumas estimativas já indicam que a degradação da terra diminuiu os serviços ecossistêmicos prestados pelo solo em aproximadamente 60% apenas no período compreendido entre 1950 e 2010.

Sendo esse um horizonte muito pequeno considerando os milhares de anos que o ser humano encontra-se habitando o planeta. Esses dados de taxas aceleradas de degradação impactam uma área de 500 milhões de hectares (Mha) nos trópicos, e, estima-se que 33% da superfície da terra encontram-se afetada por algum tipo de fenômeno de degradação do solo (LAL, 2015).

O esgotamento do reservatório de carbono orgânico do solo (COS) é um problema global e uma das principais causas da degradação do solo, estudos de longo prazo demonstram que os teores de COS estão reduzindo, o que além de reduzir a qualidade ambiental poderá influenciar na concentração de nutrientes essenciais: o N disponível para a planta e outros nutrientes essenciais, como P e S sofrem influência desse processo (LAL, 2015).

Sabe-se que os estoques de carbono do solo além de serem controlados por fatores climáticos e biogeoquímicos, sofrem grande impacto pela mudança no uso e ocupação da terra, de forma mais agravante quando se converte ecossistema nativo para sistemas agrícolas e de pastagens (CERRI, 2008). Entretanto, os solos, frequentemente, reagem lentamente às mudanças no uso da terra frente ao manejo adotado e, por esse motivo, pode ser mais difícil detectar mudanças na qualidade do

solo antes que ocorram danos irreversíveis (NORTCLIFF, 2002).

Portanto, um componente importante da avaliação da qualidade do solo é a identificação de um conjunto de atributos sensíveis do solo que refletem a sua capacidade de exercer a sua função e que podem facilmente serem utilizados como indicadores da qualidade do solo em análises periódicas.

O conceito de qualidade solo é relativamente novo, atualmente, a definição mais divulgada para QS, é a proposta por Doran e Parkin (1994, p.7):

A capacidade de um solo funcionar, dentro dos limites do ecossistema, para sustentar a atividade biológica, manter a qualidade ambiental e promover a saúde de plantas e animais.

A distinção entre características inerentes (aspecto estático) e atributos gerenciáveis (aspectos dinâmicos), no entanto, ainda não é algo de conhecimento absoluto e plenamente definido e também irá depender do contexto do ecossistema que está inserido esse sistema solo (SCHWILCH et al., 2016).

Para seleção de indicadores para medir os atributos do solo e inferir sobre QS devem ser considerados alguns requisitos. Os requisitos mais divulgados pela literatura (DORAN, PARKIN, 1996; TOTOLA, CHAER 2002) para indicadores são:

- i) Integrar propriedades e processos químicos, físicos e biológicos e podem representar as propriedades ou funções do solo que são mais difíceis de serem medidas diretamente, considerar a sobreposição de indicadores pode ser necessária para uma interpretação mais robusta.
- ii) Possuir relevância ecológica e a sua variação natural deve ser bem conhecida.
- iii) Agir em variações em longo prazo no manejo e no clima, mas consideravelmente resistentes a flutuações em curto prazo devido às mudanças climáticas ou ao desenvolvimento e fase cultura.
- iv) Possuir uma medição acurada e precisa frente a uma ampla variação de tipos e condições de solo.
- v) Ser de determinação simples e de baixo custo, permitindo que um grande número de análises possa ser realizado.

No Brasil, a percepção da necessidade da inclusão de indicadores da atividade da microbiota nas avaliações periódicas do solo ganhou mais importância com o advento dos conceitos ligados a agricultura conservacionista. Nos últimos anos, um

grande número de dados científicos e de relatos de agricultores demonstrava que muitas vezes as alterações nas propriedades químicas e nos teores de matéria orgânica do solo (MOS), não eram eficazes em identificar as modificações que ocorriam no solo em função da adoção de práticas mais conservacionistas de manejo (MENDES et al., 2018).

Ademais, as justificativas para medir processos microbiológicos que ocorrem no sistema solo utilizando indicadores mensuráveis tem origem na percepção do papel chave que esses fenômenos promovem como: auxílio no processo de fixação biológica do nitrogênio, estruturação do solo, minimização de pragas e doenças nas plantas, solubilização de nutrientes para as plantas, redução de patógenos e pragas de plantas, degradação de compostos persistentes, em associações micorrízicas. Dado as funções ecossistêmicas conferidas a microbiota, um solo de alta qualidade possui atividade biológica em intensidade, contêm populações microbianas balanceadas, sendo vários os indicadores microbiológicos que podem fornecer uma estimativa para QS (TÓTOLA, CHAER, 2002).

Sabe-se que nos mecanismos biológicos do solo destacam-se os atores principais: microrganismos, raízes de plantas e a fauna dos ecossistemas. Os processos biológicos que ocorrem apresentam uma estreita inter-relação com os componentes físicos e químicos, os quais influenciam, em conjunto, não somente a produtividade, mas impactam suas funções ecossistêmicas e, conseqüentemente, os serviços ambientais prestados (MENDES et al., 2018).

Por descrever a parte viva e mais ativa da matéria orgânica do solo (MOS) e por esta interferir em processos bioquímicos, indicadores biológicos podem ser mais sensíveis que os indicadores químicos e físicos por detectar, antecipadamente, alterações que ocorrem na capacidade de funcionar do solo em função do seu uso e manejo (STÖCKER et al., 2017). Além disso, a alta sensibilidade dos processos biológicos para descrever alterações no solo proporcionam respostas mais rápidas quando comparadas a uso de outros indicadores, como atributos físicos e químicos (TÓTOLA, CHAER, 2002).

Os estudos da atividade de microrganismos no solo são feitas em níveis diferentes sabe-se que as enzimas podem ser utilizadas em um nível de medição das taxas potenciais de atividade de populações microbianas específicas e na avaliação dessa atividade constantemente são feitas a medição das enzimas do solo que estão envolvidas com a ciclagem dos nutrientes (C,N, P e S) (TÓTOLA, CHAER, 2002).

3.2 Indicadores da atividade da microbiota como parâmetros para QS

A adequada atividade da microbiota no solo depende de fatores abióticos como temperatura, pressão atmosférica, pressão hidrostática, pressão osmótica, salinidade, umidade, aeração, pH, e, de fatores bióticos como os compostos orgânicos presentes que são suas fontes de energia e de carbono. A atividade dos microrganismos dependerá ainda de compostos inorgânicos, ou seja, dos nutrientes presentes no solo. Em ambiente natural esses processos biológicos também terão influência das taxas de radiação solar (PAUL, CLARK, 1996).

Portanto, os microrganismos necessitam em seus processos de uma variedade de compostos orgânicos e inorgânicos a fim de garantirem a sua sobrevivência e pleno desenvolvimento no solo. Dessa forma, esses seres vivos são capazes de obter energia a partir da degradação do carbono, principalmente, via decomposição da matéria vegetal produzida pelas plantas ou da própria matéria orgânica constituinte no solo. Com seus mecanismos convertem energia e matéria de uma forma para outra, realizando o movimento de energia e de matéria, o que caracteriza um processo de fluxo no sistema solo.

O fluxo de energia e matéria no sistema solo se constitui pela matéria vegetal adicionada, via subsistema plantas, e transformada pelos microrganismos à CO_2 . Sendo eles os maiores responsáveis pela formação de compostos orgânicos, subprodutos da sua atividade, e pela quebra de moléculas, liberam energia, e geram outros tipos de compostos orgânicos. A quebra de moléculas, geralmente, é feita através de enzimas, que são liberadas pelos microrganismos para este fim (VEZZANI, 2001).

3.2.2 Indicadores enzimáticos

As enzimas presentes no solo atuam ativamente nos fluxos de carbono, nitrogênio e outros elementos essenciais nos ciclos biogeoquímicos como o fósforo (P) e o enxofre (S). Dessa maneira, compreender os fatores que regulam a expressão enzimática no solo, é um estágio essencial na caracterização metabólica de um sistema solo, e no conhecimento do seu potencial de fertilidade, qualidade e resiliência. Os microrganismos, sendo altamente abundantes e diversos no solo apresentam um alto potencial metabólico.

Geralmente, os microrganismos do solo têm seu crescimento limitado e,

portanto, podem explorar mal suas capacidades. Ademais, as atividades microbianas do solo devem estar relacionadas aos estoques de C e N do solo a fim de adquirir informações dos processos de transformação da matéria orgânica que ocorrem no solo (HOPKINS, 2005).

No sistema solo, os microrganismos liberam enzimas extracelulares capazes de aumentar a eficiência e a rapidez na decomposição de resíduos orgânicos complexos (ligninases, celulasas, proteases, glucosidases, galactosidases), além de promoverem a ciclagem de nutrientes (fosfatases, amidases, urease, sulfatase) atuando assim, ativamente na formação da MOS e da estrutura do solo. O potencial de uso de enzimas como indicadores de qualidade do solo, especialmente a β -glucosidase e a arilsulfatase, tem sido verificado no cerrado (MENDES et al., 2003; PEIXOTO et al., 2010) e no sul do país (BALOTA et al., 2004; LISBOA et al., 2012; MENDES et al., 2015).

Deste modo, a avaliação da atividade de enzimas extracelulares pode ser utilizada como indicadores de QS, a fim de exprimir diretamente a eficiência da atividade microbiana. Além disso, indicadores enzimáticos possuem potencial para serem usados como ferramenta na análise da ciclagem dos nutrientes que ocorrem no solo. Em estudos utilizando esses indicadores em áreas experimentais e fazendas comerciais, observou-se que as enzimas arilsulfatase e β -glucosidase foram as que apresentaram a maior consistência e se mostraram mais sensíveis para detectar perturbações do solo. Esses estudos também mostraram que os indicadores em análise demonstram mais eficiência comparados ao uso do indicador mais tradicional de biomassa microbiana como parâmetro para informar sobre os contrastes entre os diferentes sistemas de manejos adotados (MENDES et al., 2016, BALOTA et al., 2004, LOPES et al., 2013).

Por sua vez, a atividade de enzimas extracelulares é influenciada pelas propriedades físicas, químicas, microbiológicas e bioquímicas do solo (VERES et al., 2015). Assim, a atividade de enzimas do solo tem sido sugerida como potencial indicador da qualidade e complementação de análises de fertilidade do solo na medida em que estão totalmente relacionadas com as variabilidades nas taxas de decomposição de matéria orgânica e também com a capacidade de armazenamento de carbono no solo, devido à sua estreita relação com a biologia do solo, por serem de fácil medição e de rápida resposta às alterações ocorridas (DICK, BANDICK, 1999).

Neste trabalho, concentrou-se em avaliar a atividade enzimática das enzimas: β -glucosidase, fosfatase ácida e arilsulfatase. Essas enzimas estão relacionadas principalmente a ciclagem de nutrientes do solo. Sendo a β -glucosidase relacionada com o ciclo de carbono, a fosfatase ácida relaciona-se principalmente com o ciclo do fósforo, mas estudos sugerem ainda a sua relação com o carbono, já a arilsulfatase relaciona-se com o ciclo de enxofre no solo (MENDES et al., 2016, BALOTA et al., 2004).

A β -glucosidase é uma enzima extracelular, que desempenha um papel importante na degradação da MOS. Faz parte de um conjunto de enzimas denominado: glucosidases, as quais possuem um papel chave na fase final da degradação da celulose na medida em que catalisam a hidrólise de moléculas mais complexas formadas por hidratos de carbono produzindo assim açúcares mais simples como a glucose, uma fonte de energia mais biodisponível aos microrganismos do solo (ALVARENGA, et al., 2008).

É a enzima responsável por atuar na etapa final do processo de decomposição da celulose. Essa enzima é responsável pela hidrólise dos resíduos de celobiose formando assim o açúcar simples β -D-glucose (PAUL, CLARK, 1996).

Segundo Mendes et al. (2018), a celobiose é um dissacarídeo de rápida decomposição no solo e sua presença está relacionado a teores mais elevados de atividade da β -glucosidase e conseqüentemente a maiores teores de C prontamente mineralizável. Em seus estudos, foi observada uma menor quantidade de C prontamente mineralizável em áreas com maior diversidade de espécies vegetais e, conseqüentemente, da maior complexidade de resíduos vegetais que atingem a superfície do solo (galhos, ramos, folhas, flores, frutos e sementes). Cabe mencionar que no presente trabalho o sistema de referência como sendo de maior diversidade de espécies vegetais e, conseqüentemente, de maior complexidade, foi o sistema agroflorestal.

A medição da atividade enzimática tem potencial para ser adotada nas rotinas de análise do solo. A atividade das enzimas pode revelar-se, como já demonstrado por estudos anteriores, potenciais indicadores em estudos que visam medir a habilidade de um ecossistema de solo em degradar matéria vegetal e proveres açúcar simples para a população microbiana presente no solo além de ser capaz de gerar dados acerca da ciclagem de nutrientes no solo, estabilização do carbono e resposta

de microrganismos a perturbações (STOTT, 2009).

Balota *et al.* (2004) observaram correlações significativas entre a atividade enzimática e o C orgânico total do solo e o C e N da biomassa microbiana. Dessa forma, esses resultados evidenciam que a atividade enzimática do solo é um indicador sensível de alterações na qualidade do solo, e que podem diferenciar diferentes práticas de manejo adotadas.

3.3 Atividade da biomassa microbiana a partir da respiração do solo

A respiração do solo é um indicador sensível que pode ser utilizado no monitoramento de alterações ambientais que ocorrem nesse sistema. A respiração edáfica é o somatório das liberações de CO₂ para a atmosfera, resultante de vários processos que ocorrem na serapilheira, superfície e camadas mais profundas do solo realizados por microrganismos, raízes de plantas e invertebrados. Por outro lado, a respiração basal indica a liberação de C-CO₂ pelo solo devido exclusivamente a atividade de microrganismos presentes (D'ANDRÉA *et al.*, 2002).

O solo comporta-se como um sistema aberto, trocando matéria e energia com o meio. As alterações no estoque de carbono no solo são controladas pela taxa de decomposição de COS, por exemplo, devido às alterações no microclima e pelas alterações na quantidade e na qualidade do C que circula através do sistema. O uso da terra afeta diretamente tanto microclima quanto a quantidade, a qualidade e as vias de entrada C (DON; SCHUMACHER; FREIBAUER, 2011).

No monitoramento da QS, um dos principais atributos de análise é o cálculo do balanço de “outputs” e “inputs” (STENBERG, 1999) e a análise de atividade microbiana a partir da respiração dos microrganismos medida pela liberação de CO₂ se enquadraria então como uma análise de “output” de carbono no solo.

A respiração basal do solo é um resultado da atividade microbiana e pode ser descrita pela liberação de CO₂ utilizando-se de metodologia capaz de medir quantitativamente esse fenômeno. A partir dessa análise quantitativa, é possível realizar uma avaliação qualitativa da atividade microbiana do solo.

Além disso, a estimativa da quantidade de CO₂ liberado nesse processo é um indicativo do carbono lábil ou prontamente metabolizável presente no solo (DORAN, PARKIN, 1994). A respiração do solo, então, é um indicador capaz de agir no monitoramento da decomposição da matéria orgânica de um sistema de solo

(ANDERSON, DOMSCH, 2010).

Dados recentes demonstram que a respiração do solo é a segunda principal fonte de CO₂ dos ecossistemas terrestres, produzindo mais desse gás por ano do que a combustão de combustíveis fósseis. Quantitativamente, as perdas de carbono do ecossistema decorrentes da respiração microbiana foram estimadas e resultam em uma transferência de 40 a 70 Pg de carbono do solo para a atmosfera a cada ano (IPCC, 2019).

Entretanto, a taxa de respiração basal mais elevada pode ser relacionada tanto a distúrbios, como também a um alto nível de produtividade do ecossistema, devendo ser analisada de forma mais específica, em cada contexto (ISLAM; MULCHI; ALI, 2000). Com isso, além de relacionado com a sustentabilidade e qualidade do solo na agricultura, a respiração do solo também se relaciona com taxas de produtividade.

A quantificação de CO₂ liberado pela respiração dos microrganismos é um dos métodos mais tradicionais e utilizados para avaliar a atividade metabólica da população microbiana do solo. O gás liberado durante a atividade dos microrganismos é diversificado, podendo ser originado de organismos tanto aeróbios quanto anaeróbios (GAMA-RODRIGUES, 1999).

A respiração basal traduz a taxa de decomposição de compostos orgânicos no solo. Quando essa atividade microbiana é alta ocorre maior decomposição e, conseqüentemente, liberação de nutrientes para as plantas, porém, também pode significar maior suscetibilidade a perdas de carbono do solo, em longo prazo (SOUZA et al., 2010).

Ademais, quando se pensa na utilização da respiração basal como indicador/parâmetro para QS, esse apresenta como vantagem realizar considerações sobre a sustentabilidade de um agrossistema no que tange a qualidade e estabilidade do carbono e à contribuição de solos agrícolas para o aumento da concentração do CO₂ na atmosfera (SOUZA et al., 2010), podendo assim ser um indicador/parâmetro capaz de ser utilizado em interpretações sobre o impacto dos preparos agrícolas sobre a perda da matéria orgânica do solo e sobre a problemática de “descarbonização do solo” e potencial de contribuição da agricultura para as mudanças climáticas.

Estudos recentes têm apontado para a redução de estoques de carbono microbiano em sistemas menos estáveis, como o plantio convencional, quando comparados a áreas de mata nativa ou ambientes similares, como sistemas

agroflorestais. Estes últimos são responsáveis por promover maior produção de biomassa aérea e subterrânea, assim como a cobertura do solo, favorecendo o acúmulo de carbono e a manutenção da fertilidade do solo por meio de uma ciclagem mais eficiente de nutrientes e da redução de perdas por lixiviação e erosão (GAMA-RODRIGUES, 2016).

Apesar de todo o potencial de uso da informação, a avaliação da respiração microbiana, feita isoladamente, deverá ser feita com cautela, na medida em que, poderá ocasionar em uma avaliação limitada sobre as respostas do sistema solo. De fato, apesar desse indicador ser sensível a condições de estresse ou perturbações ocorridas no solo, e expressar as perdas de carbono no solo para atmosfera, uma opção de avaliação mais completa a ser conduzida é a determinação do quociente metabólico que é a taxa de respiração por unidade de biomassa microbiana (qCO_2). E, mais recentemente, surge como debate o grande potencial da análise enzimática para medir a atividade biológica, por ser uma análise mais simples e de baixo custo do que a análise via quantificação de biomassa.

Cabe considerar que a abordagem de monitoramento proposta no presente trabalho, de avaliação das perdas de carbono do solo em forma de CO_2 utilizando o indicador de respiração é utilizada como ferramenta de pesquisa. Os experimentos de respiração possuem limitações para serem aplicados a monitoramentos de rotina visto que exigem uma metodologia e operações relativamente trabalhosas, dessa forma, o custo operacional se torna elevado para ser incluído em análises rotineiras solicitadas por agricultores, por exemplo.

De fato, cabe mencionar que em relação ao uso de indicadores enzimáticos, perspectivas mostram um incentivo à sua inclusão em análises rotineiras. A atividade enzimática, que no passado apresentava limitações operacionais e econômicas, foi adaptada e tende a ser inserida nas análises rotineiras de análise de fertilidade de laboratório. Com isso, essa análise que também está totalmente relacionada à atividade de microrganismos presentes no solo tende a tornar-se mais acessível para monitoramentos pois estará disponível em laboratórios de análise de solo para os agricultores que queiram avaliar a atividade biológica em suas áreas de cultivo.

3.4 Diferentes estratégias em sistemas de manejo de solos agrícolas

A mudança no uso do solo, que preconiza a retirada da vegetação natural para

o estabelecimento de cultivos agrícolas, está associada à redução da estabilidade de agregados, da cobertura do solo e poderá alterar o ciclo de carbono conferindo um maior potencial de perdas de carbono no solo (SÁ, LAL, 2009). O fenômeno de perdas de carbono no sistema solo apresenta-se como um desafio para estudos que se concentram em medir as alterações dos atributos do solo frente a diferentes estratégias de manejos.

Sabe-se que a dinâmica do carbono no solo está diretamente relacionada aos preparos agrícolas. Variando-se o manejo do uso do solo, os preparos agrícolas adotados o solo poderá atuar como emissor de CO₂ para a atmosfera, ou como dreno, pelo acúmulo, de carbono na forma de matéria orgânica (IPCC 2001).

Essa relação tem origem no fato de que, o preparo agrícola, é capaz de afetar a atividade metabólica dos microrganismos nos processos de decomposição dos resíduos vegetais e da matéria orgânica no solo (MOS), as quais também são influenciadas pela temperatura e umidade do solo (COSTA et al., 2008). Portanto, considerando os ganhos e perdas nos estoques de carbono orgânico no solo sob diferentes manejos agrícolas, pode-se interpretar o efeito de sistemas adotados quanto ao influxo ou efluxo líquido de C no sistema solo-atmosfera.

De todo o C orgânico no solo, uma parte considerável encontra-se em estruturas chamadas de matéria orgânica do solo (MOS). Entretanto, os compostos orgânicos do solo são facilmente decompostos quando se realizam práticas de manejo não conservacionistas, causando agravamento no efeito estufa, devido à liberação de gases de efeito estufa (GEE), como CO₂, CH₄ e N₂O (CERRI et al., 2007). Por outro lado, o aumento do estoque de MOS é um processo relativamente lento que deve visar um manejo adequado, notadamente em regiões de clima tropical, onde a taxa de decomposição é mais acentuada devido às altas temperaturas e umidade do solo (SIX et al., 2002).

Para realizar considerações sobre as alterações causadas pelo uso do solo e em estudos de monitoramento de QS há de se realizar uma comparação de manejos convencionais, manejos conservacionistas e áreas sob condições mais naturais, com vegetação nativa, ou área que possua de acordo com literatura níveis adequados dos atributos medidos, dentro de cada tipo de solo. Com isso, duas abordagens diferentes são propostas para o estabelecimento de critérios de referência para avaliação da QS: (i) o uso de solos nativos e não perturbados e aqueles com impactos antropogênicos mínimos; e (ii) o uso de solos de referência capazes de manter um alto nível de

produtividade e desempenho ambiental (DORAN, PARKIN, 1994).

Cabe ressaltar que, nesse trabalho concentrou-se em estudar preparos agrícolas convencionais no que tange o preparo do solo antes da semeadura e preparo periódico comparado a sistemas mais conservacionistas: plantio direto e cultivo mínimo que são as estratégias de cultivo conservacionistas mais difundidas pelo país. Já como área referência não perturbada, que promove alto potencial de conservação, possibilitando altos níveis de produtividade e de mata nativa, utilizou-se o sistema agroflorestal.

3.4.1 Preparos agrícolas

Atualmente, as estratégias de preparo e manejo do solo mais largamente utilizadas em escala comercial são: sistema de cultivo convencional (CC), cultivo mínimo (CM) e plantio direto (PD), os quais se diferenciam entre si, principalmente, em relação a intensidade e tipo de preparo de revolvimento do solo aplicado, além também do uso de mais herbicidas, corretivos e fertilizantes em geral.

Na agricultura brasileira, a prática do plantio direto iniciou-se na década de 70 e ganhou força nas últimas décadas. Esse sistema passou a ser amplamente difundido devido aos ganhos econômicos diretos, indiretos e benefícios ecossistêmicos comprovados. Além de reter e prover água da chuva no solo, o PD também realiza o sequestro de carbono e promove a conservação, a estrutura e fertilidade do solo (POWER, 2010).

A semeadura direta ou técnica do plantio direto (PD) é uma estratégia conservacionista de manejo que dispensa operações de aração e gradagem no preparo do solo, e adota a utilização de cobertura sobre a superfície do solo sobre forma de palhada, sendo essa oriunda de rotação de culturas. Já o sistema de cultivo mínimo consiste no revolvimento mínimo durante preparo do solo e ambas as técnicas conservacionistas têm por finalidade conservar o solo buscando uma produção mais sustentável, e proporcionando economia ao produtor com uso de corretivos e adubação (ALBUQUERQUE et al., 2013).

Desde a implementação dos sistemas agrícolas em plantio direto no Brasil, em 1971, está sendo evidenciado por agricultores e cientistas que esse sistema resulta em benefícios ao desenvolvimento da cultura. Esses benefícios são observados pelo incremento na retenção de umidade no solo, pelo decréscimo nas temperaturas

máximas do solo, pelo maior controle da erosão e pela melhoria em algumas propriedades físicas, químicas e biológicas. A melhoria nessas propriedades resulta em maiores rendimentos das culturas e maiores índices de sustentabilidade agrícola e qualidade do solo, conferindo ao plantio direto uma vantagem comparativa em desempenho em relação ao plantio convencional (PC). (ALBUQUERQUE et al., 2013)

Cabe destacar que, entre as inúmeras vantagens do PD, é dado um grande destaque ao incremento nos teores de matéria orgânica do solo, o que, além de ser um atributo que contribui efetivamente pela fertilidade e a estrutura do solo, também abre possibilidades para o comércio de créditos de carbono e para certificação de propriedades como sendo de agricultura de baixo carbono (ALBUQUERQUE et al., 2013). Portanto, além de promover benefícios a qualidade do solo a adoção do plantio direto gera benefícios e pode gerar maior valor a produção agrícola facilitando financiamentos em programas governamentais.

O aumento da matéria orgânica vegetal sendo depositada no solo, tratando-se do sistema de plantio direto, que acumula matéria vegetal em forma de palhada, pode promover o aumento da qualidade do solo já que promove reconhecíveis benefícios no aumento das taxas de infiltração e do armazenamento de água no solo, diminuição da temperatura superficial no perfil do solo, aumento da atividade microbiana, e acúmulo superficial de nutrientes e de matéria orgânica nas camadas superficiais do solo, entre outros (BAYER, MIELNICZUK, 1999), além de expressiva redução da erosão hídrica (CASSOL, 1984).

Atualmente, o território brasileiro conta com uma estimativa de área plantada de cerca de 10 milhões de hectares em sistema de plantio direto. A principal característica dessa estratégia de manejo é evitar operações de mobilização periódica do solo além de sempre que possível promover a rotação de culturas. Essas estratégias visam à redução de custos com adubação e maquinário além de promoverem benefícios ao solo e ao ambiente onde é instalado o sistema (CRUZ, 2014).

O plantio direto, então, é definido como o processo de semeadura em solo não revolvido, no qual a semente é colocada em sulcos ou covas, com largura e profundidade suficientes para a adequada cobertura e contato das sementes com a terra, é entendido como um sistema com os seguintes fundamentos: i) eliminação ou redução das operações de preparo do solo; ii) formação e manutenção da cobertura morta em forma de palhada iii) rotação de culturas; e iv) uso de máquinas semeadoras

específicas (CRUZ, 2014). Além da expressiva melhoria de qualidade do solo pelo aumento nos estoques de MOS, a adoção de sistemas de manejo sem revolvimento do solo e o alto aporte de resíduos resulta na retirada de CO₂ da atmosfera e na sua retenção no solo (BAYER; MIELNICZUK; MARTIN-NETO, 2000).

No que diz respeito ao chamado sistema de preparo agrícola convencional - SPC, o mesmo tem como estratégia valer-se de forte mecanização para fornecer todos os tipos de condições demandados para que ocorra a germinação das sementes. Nesse sistema a eficiência baseia-se na preparação intensiva em uma frequência periódica, a fim de reduzir, principalmente, as plantas consideradas invasoras para a plantação e evitar riscos ao desenvolvimento da cultura desejada (CORREA, 2014).

O sistema de plantio chamado convencional (SC) tem como princípio realizar, periodicamente, 2 arações e 2 gradagens a partir de implementos agrícolas, como órgãos ativos desse processo: arados de discos ou aivecas e grades aradoras, mas variações nas frequências dessas operações podem ocorrer. Entretanto, a partir da frequência das operações de preparo inicial e periódico do solo com arações e gradagens procura-se manter o solo continuamente destorroado e manter os níveis altos de aeração e permitir uma camada arável mais profunda (CRUZ, 2014). O cultivo mínimo é o sistema agrícola que também é considerado como sendo de natureza conservativa se comparado ao sistema convencional pois ele apenas utiliza-se de operações agrícolas em situações de compactação.

Já quanto ao uso da enxada rotativa, que pode ser utilizado como substituto de implementos no preparo do solo. Esse equipamento também tem como objetivo manter o solo destorroado e uma camada arável profunda, mas tem como ferramenta agrícola o uso de um único equipamento capaz de substituir o trabalho que é realizado no sistema convencional pelas grades e pelos arados. Esse equipamento chamado enxada rotativa provoca forte impacto sobre o solo, ocorrendo uma alta desintegração dos agregados, tornando esses instáveis, e, mais sujeitos a processos erosivos e degradantes da qualidade do solo (EMBRAPA, 1984).

3.4.2 Área de referência: sistema agroflorestal

Na legislação brasileira, a portaria Resolução CONAMA nº 429/2011 (BRASIL, 2011), estabelece uma definição oficial para o conceito de sistema agroflorestal como sendo aquele que:

promove o uso e a ocupação do solo em que plantas lenhosas perenes são manejadas em associação com plantas herbáceas, arbustivas, arbóreas, culturas agrícolas, forrageiras em uma mesma unidade de manejo, de acordo com arranjo espacial e temporal, com alta diversidade de espécies e interações entre estes componentes.

Nos últimos tempos, cientistas tem observado que é na complexidade dos ecossistemas que se verifica um desempenho mais eficiente das funções do sistema solo, incrementando a sua qualidade e a promoção da qualidade ambiental do ambiente no entorno. Adotar a estratégia de empregar maior complexidade em sistemas agrícolas pode ser efetuado pelo cultivo contínuo e diversificado de plantas em uma mesma área. Cientistas de solo devem se voltar para a construção da agricultura do complexo, que promova as relações mutualísticas entre as espécies, pois só assim o sistema solo terá qualidade ao longo do tempo e desenvolverá a sustentabilidade do agrossistema (VEZZANI, MIELNICZUK 2009).

Os sistemas agroflorestais são sistemas de cultivo que se caracterizam pelo cultivo simultâneo de espécies arbóreas, agrícolas anuais e até mesmo animais. Dessa forma, são capazes de promover interações ecológicas mais complexas, e de trazerem benefícios para o arranjo espacial e/ou temporal de uma produção agrícola, como consequência dessa complexidade. Além disso, esse sistema destaca-se também por conferir uma grande quantidade de biomassa sendo depositada no solo, favorecendo o acúmulo de carbono nas camadas mais superficiais do solo (ALTIERI, 2012).

O uso de SAFs para manutenção ou para melhoria da QS se destaca pelo seu desempenho na contribuição em mecanismos de fixação de nitrogênio no solo, redução da erosão, diminuição do uso de fertilizantes, além da eficiente ciclagem de nutrientes e considerável aporte de matéria orgânica. Ademais, esse sistema é já é reconhecido pela sua eficiente capacidade produtiva agrícola (SIMINSKI; DOS SANTOS; WENDT, 2016).

Tratando-se dos serviços ecossistêmicos que vêm sendo conferidos ao sistema agroflorestal destacam-se o alto potencial para sequestro do carbono, a reciclagem de nutrientes, a maior cobertura vegetal e por consequência, a redução da erosão do solo e o aumento da qualidade dos recursos hídricos (CHERUBIN; CHAVARRO-

BERMEO; SILVA-OLAYA, 2019).

Devido ao potencial para sequestro de carbono, os sistemas agroflorestais acumulam carbono ao longo do tempo, sendo eles capazes de recuperar quantidades perdidas durante a derruba de árvores e a queima de sistemas de florestas primárias. Estimativas demonstraram que os sistemas agroflorestais podem funcionar como “banco” de estoque de carbono, recuperando entre 54% e 82% do C comparado a solos em ambientes naturais florestais, partindo de um horizonte de 15 anos (RODRIGUES et al., 2010).

Diante dos citados benefícios, frente aos potenciais serviços ecossistêmicos e grande relevância de diminuir as perdas de C e consequentes perdas de MOS em sistemas agrícolas atribuídos, estudos científicos tem se concentrado em utilizar áreas de SAF como sendo de referência, a fim de comparar a contribuição dessas estratégias de cultivo no incremento da QS, e na sustentabilidade do solo, partindo por exemplo, do contexto de perdas de C pelo solo considerando o grande impacto que esse fenômeno de degradação promove.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Local do estudo

O estudo foi realizado a partir de amostras de um Argissolo Vermelho Amarelo, no município de Seropédica – RJ, altitude de 33 m e clima classificado como Aw conforme classificação de Köppen. O solo foi coletado na estação chuvosa (janeiro de 2020) no sítio experimental Fazendinha Agroecológica na unidade da Embrapa Agrobiologia, em ensaios de comparação de diferentes preparos agrícolas, do Pesquisador da Embrapa Ednaldo da Silva Araújo.

4.1.1 Estrutura da área experimental

A área de plantio de milho, no período em que foi realizado a coleta, continha uma população de aproximadamente 50.000 plantas por hectare. O delineamento experimental tem sua estrutura formada por blocos casualizados com três repetições, formando um total de 9 parcelas, sendo as parcelas de 5 x 12 m. Os tratamentos corresponderam a diferentes manejos de preparo do solo, inicial e periódico, sendo eles: 1) sistema de plantio direto (SPD), sem uso de herbicida, e com uso de triturador de resíduos (Triton); 2) sistema de cultivo mínimo com o uso da enxada rotativa (SCM) e 3) sistema de cultivo convencional (SCC), com a aplicação de operações de preparo em uma frequência periódica de uma aração e duas gradagens. Ressalta-se que a área experimental segue os princípios do cultivo orgânico, não sendo utilizados herbicidas em nenhum dos tratamentos (SILVA et al., 2018).

Na área experimental que diferencia os tipos de preparo do solo (direto, convencional e mínimo) descrita utiliza-se a espécie de milho como cultura principal e indicadora de desempenho, entretanto, realiza-se o princípio de rotação de culturas, principalmente leguminosas, com objetivo de aumentar a saúde do solo. Dado isso, surge a importância de relatar o histórico da área, especificamente, quanto a quantidade de adubação aplicada nos 4(quatro) primeiros anos agrícolas, considerando que o estabelecimento das culturas iniciou no ano de 2015.

No primeiro ano agrícola, utilizou-se a sucessão milho/abobrinha com adubação de cobertura, na forma de torta de mamona de 80 kg N ha⁻¹. No segundo ano agrícola, a sucessão ocorreu com milho/feijão com adubação na forma de mamona de 100 kg N ha⁻¹, no terceiro ano agrícola a sucessão foi milho/mucuna

verde utilizando 50 kg N ha⁻¹ e já no quarto ano agrícola período entre 2017/2018 a sucessão foi milho/mucuna preta com adubação de cobertura de 50 kg N ha⁻¹ em forma de torta de mamona.

Os sistemas agroflorestais devem ser feitos de forma a tentar reproduzir ao máximo, e de forma natural, as formações para que o sistema potencialize os processos de acumulação de biomassa. Essa estratégia de cultivo visa permitir que os nutrientes possam ser melhor aproveitados pelos indivíduos, bem como a radiação e a umidade. Para isso, é importante conhecer as características de cada espécie utilizada, sua posição no sistema, e como se relaciona com as demais espécies e locais fatores edafoclimáticos (ARAÚJO et al., 2019).

O sistema agroflorestal que será utilizado nesse estudo teve sua implementação iniciada no ano de 2000, com um arranjo multiextratificado. Espécies como açaí (*Euterpe oleracea* Mart.), cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*), grumixama (*Eugenia brasiliensis* Lam.), citrus (*Citrus* sp.) e guapuruvu (*Schizolobium parahyba* (Jacq.) Walp.) foram plantadas junto com repolho e colheitas de amendoim forrageiro, este último sendo utilizado como adubo verde. (DA SILVA et al., 2016)

No sistema agroflorestal multiextratificado localizado na Fazendinha Agroecológica, Seropédica, RJ que, foi utilizado como área de referência no presente trabalho, foram feitas as identificações quanto as espécies de estratos arbóreos e estratos regenerativos. Nesse estudo realizado por Araújo et al. (2019). foram identificados os números de indivíduos das principais espécies presentes, a densidade absoluta e a densidade relativa de cada espécie listada. Com isso, dada a importância do conhecimento das espécies presentes na área, e de forma a caracterizar mais detalhadamente o sistema agroflorestal que foi utilizado como referência, esses dados estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1. Caracterização da estrutura horizontal do estrato arbóreo e regenerante do SAF multiextratificado, Fazendinha Agroecológica, Seropédica, RJ

Estratos arbóreos	NI	DA	DR
<i>Gliricidia sepium</i> (Jacq.) Walp.	143	386,49	35,75
<i>Archontophoenix alexandrae</i> (F. Muell) H. Wendl. & Drude	73	197,3	18,25
<i>Euterpe oleracea</i> Mart.	40	108,11	10

<i>Schizolobium parahyba</i> (Vell.) S. F. Blake	7	18,92	1,75
<i>Guarea guidonia</i> (L.) Sleumer	9	24,32	2,25
<i>Euterpe edulis</i> Mart.	20	54,05	5
<i>Theobroma cacao</i> L.	18	48,65	4,5
<i>Bixa orellana</i> L.	12	32,43	3
<i>Citharexylum myrianthum</i> Cham.	6	16,22	1,5
<i>Averrhoa carambola</i> L.	7	18,92	1,75
Estratos regenerativos	NI	DA	DR
<i>Archontophoenix alexandrae</i> (F. Muell) H.Wendl. & Drude	93	251,35	16,88
<i>Theobroma cacao</i> L.	64	172,97	11,62
<i>Coffea</i> L.	36	97,3	6,53
<i>Bactris gasipaes</i> Kunth.	26	70,27	4,72
<i>Erythroxylum pulchrum</i> A. St. Hill	26	70,27	4,72
<i>Citharexylum myrianthum</i> Cham.	23	62,16	4,17
<i>Bixa orellana</i> L.	22	59,46	3,99
<i>Heliconia</i> sp.	19	51,35	3,45
<i>Leucaena leucocephala</i> (Lam.) de Wit	14	37,84	2,54
<i>Euterpe edulis</i> Mart.	10	27,03	1,81

Legenda: NI = número de indivíduos, DA = densidade absoluta (indivíduos/ha); DR= densidade relativa(%) Fonte: Adaptada de Araújo et al(2019)

4.2 Amostragem de solo

A amostragem de solo ocorreu em janeiro de 2020 e foi feita na profundidade de 0-10 cm, onde está concentrada a maior parte do C do solo e atividade microbiana efetuando-se em duas áreas adjacentes: área I composta de sistema agroflorestal

(SAF) consolidado e área II em monocultivo de milho (*Zea mays L.*) com parcelas de diferentes preparos agrícolas: convencional (CO), sistema cultivo mínimo com manejo de enxada rotativa (CM) e plantio direto (PD). A Figura 1 mostra a área experimental instalada.

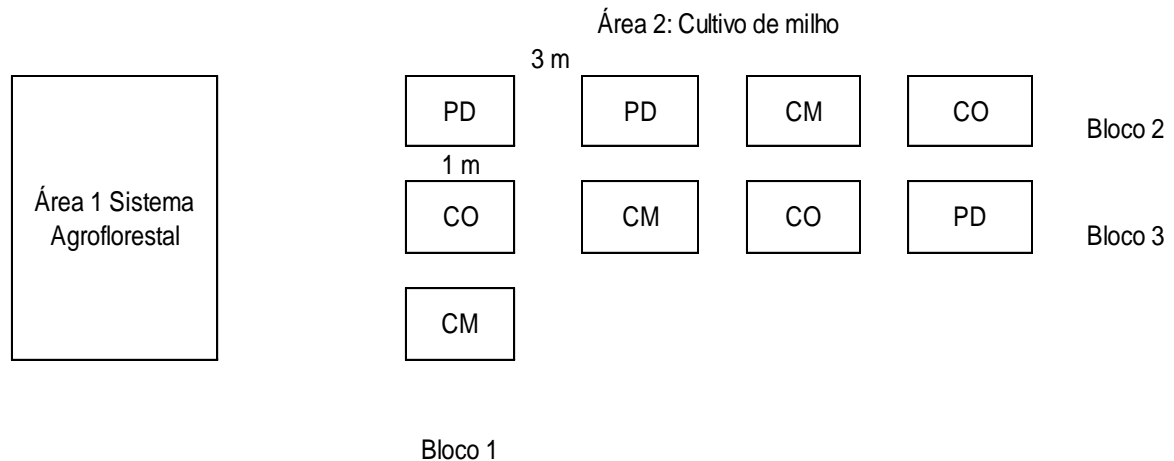


Figura 1. Croqui da disposição da área experimental I em sistema agroflorestal e área II que compara os diferentes preparos de solo em monocultivo de milho (*Zea mays L.*).

Amostras compostas foram obtidas a partir de 4 amostras simples para a garantia de uma melhor representatividade da variabilidade espacial da área e dos tratamentos. Com isso, 1 (uma) amostra composta foi formada de cada parcela (ver croqui da Figura 1), sendo que o movimento dentro da parcela seguiu na direção diagonal dentro de cada parcela referente a cada preparo.

Após a homogeneização das amostras totalizaram-se 12 amostras compostas das 3) repetições dos 4 diferentes tratamentos: cultivo convencional (SCC), plantio direto (SPD), cultivo mínimo com enxada rotativa (RO) e sistema agroflorestal (SAF).

4.2.1 Armazenagem e controle de umidade das amostras de solo

As amostras, após chegarem do campo, e serem levadas a Embrapa Solos, foram imediatamente colocadas em uma geladeira a uma temperatura média de 10 °C, a fim de que se preservasse ao máximo a umidade inicial e, principalmente, visando a redução da atividade microbiana presente. Após essa etapa de controle, na sala de preparo de amostras, realizou-se o peneiramento de sub-amostras de solo que iriam ser utilizadas no estudo de respiração. A ferramenta utilizada foi peneira granulométrica com malha de 2,5 mm.

4.2.3 Capacidade de campo

O cálculo da capacidade de campo (CC) se fez necessário, pois de acordo com a Norma internacional ISO16072:2011, para a medição de respiração basal em laboratórios, o ajuste de umidade no solo deverá ser realizado para que ele esteja entre 60-70% da CC, a fim de obter uma análise da atividade biológica adequada. Além disso, desejou-se homogeneizar essa variável nas amostras para que fossem expostas a uma mesma quantidade de umidade, para que não houvesse influência dessa variável no estudo.

Com isso, primeiro, com as amostras retiradas da geladeira a uma temperatura média de 10°C, calculou-se a umidade inicial, já presente nas amostras pelo método de secagem em estufa utilizando a temperatura de 105 °C, por intervalo de tempo de 24h (EMBRAPA, 2018). A capacidade de campo foi estimada da seguinte forma: 50 g de solo de cada replicata foram colocados em funil com filtro, e acima de uma proveta, verteu-se uma quantidade de 100 g de água ultrapura no solo e, após o período de aproximadamente um dia, a massa de solo foi pesada, levada a estufa a 105°C, por 24h, e pesada novamente (EMBRAPA, 2018).

A quantidade de água retida no solo (M_a), resistente a força da gravidade, determinada pela diferença do peso antes e após a secagem, é uma estimativa, com precisão aceitável, da capacidade de campo (CC). Com isso, a massa necessária de água (M_a) a ser adicionada em cada amostra de 50 g para ajuste de umidade na fase incubação foi calculada e é mostrada na Tabela 1.

Tabela 2. Dados calculados de capacidade de campo média e massa de água (M_a) para ajuste de umidade durante a incubação.

Tratamento	CC ^a (%)	(σ^c)	60% CC	(σ^c)	M_a (g) ^b	(σ^c)
Convencional	0,46	0,00	0,28	0,00	12,36	0,24
Plantio direto	0,49	0,03	0,30	0,02	13,90	0,80
Cultivo mínimo	0,47	0,00	0,28	0,00	12,82	0,18
Sistema agroflorestal	0,48	0,01	0,28	0,01	13,01	0,42

a. Capacidade de campo; b. Massa de água; CO: Convencional; PD: Plantio direto, CM – Cultivo mínimo; c- desvio padrão

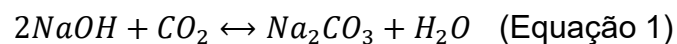
4.3 Ensaio laboratorial de respiração basal

A taxa de respiração basal do solo (RBS) foi estimada através da quantificação de CO₂ liberado do solo durante um período de 9 dias de incubação. O solo foi incubado em um recipiente fechado e o CO₂ liberado pelas amostras de 50 g de solo foi absorvido em uma solução de NaOH (0,3 mol), em adaptação do método originalmente proposto por Jenkinson e Powlson (1976).

No presente estudo, foram utilizadas as 12 amostras, obedecendo as 3 repetições oriundas do sítio experimental referente a cada preparo agrícola. As amostras de 50 g após receberam a quantidade de água necessária (Ma) para estarem a 60% da CC, foram dispostas em recipientes de 80 ml e colocadas dentro em jarros incubadores de 1,3 l. Após a montagem dos vidros contendo solo, estes foram levados para a estufa BOD para uma pré-incubação, por um período de 24h, na temperatura de 23,5°C até que se atinja um equilíbrio da atividade biológica presente.

Após esse período de 24h, o experimento de respiração foi montado, inserindo-se um pote de 80 ml com solução alcalina de 20ml de NaOH (0,3 mol) nos 12 jarros incubadores contendo amostras de solo de cada manejo. Já nos 3 jarros, responsáveis por medir o “branco”, continham apenas a solução de NaOH (0,3 mol).

As trocas dos frascos de NaOH e as medições por titulação do NaOH (0,3 mol) com HCl (0,20 mol) nos intervalos de 3, 6, 24, 120 e 216 horas, totalizando 5 rodadas de trocas e de titulação que foram realizadas imediatamente após as trocas de todos os frascos, a titulação ocorreu no titulador automático utilizando o indicador ácido/base fenolftaleína, pela estequiometria da reação:



4.4 Análise da atividade enzimática

As atividades das enzimas: β-glucosidase, fosfatase ácida e arilsulfatase foram utilizadas como indicadores enzimáticos neste trabalho. Estas três enzimas do solo foram selecionadas por seus papéis no ciclo C (β-glucosidase), ciclo P (fosfatase ácida) e ciclo S (arilsulfatase). A metodologia de avaliação laboratorial ocorreu de acordo com Tabatabai (1994) pelo Laboratório de Microbiologia do Instituto Brasileiro de Análises (IBRA).

4.5 Análise da fertilidade

As concentrações de fósforo, potássio, carbono orgânico do solo, e a acidez do solo, que são parâmetros que, tradicionalmente, são utilizados como indicadores de fertilidade e nutrição para as plantas, foram avaliados pelo Instituto Brasileiro de Análises (IBRA).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Fertilidade do solo

No contexto do estado do RJ, os dados de fertilidade básica gerados acerca das amostras de solo foram confrontados com o *Manual de Adubação e Calagem do estado do Rio de Janeiro* (Freire et al., 2013) que estabelece valores de referência para os atributos químicos do solo de sistemas agrícolas na região. Os dados demonstraram que as médias do teor de carbono orgânico do solo (COS) ficaram abaixo da classificação “adequado” em todos os tratamentos, sendo o sistema agroflorestal àquele de melhor desempenho, classificado como “moderado”. Os sistemas agroflorestais (SAF), que são multiextratos, tendem a ser mais eficientes que os sistemas de cultivo agrícola convencional quanto a capacidade de estocagem de C no solo, em função do não revolvimento anual do solo e a eficiência de assimilar C das diferentes espécies que compõe o SAF, nos diferentes extratos aéreo e subterrâneo.

Já quanto a análise acerca do pH das amostras, todos os tratamentos foram classificados como sendo de solo ácido, sendo o sistema agroflorestal fortemente ácido e os demais moderadamente como demonstra os dados na Tabela 2. De fato, solos tropicais são naturalmente ácidos pela sua evolução e intemperismo, especialmente em ambientes florestais, onde a maior parte dos nutrientes encontram-se imobilizados na biomassa vegetal. Os sistemas agrícolas avaliados, poderiam receber calcário para elevar ligeiramente o pH para nível adequado. Quanto a confrontação com os valores de referência para o parâmetro de fertilidade de teor de cálcio e magnésio que também é referenciado pelo aludido manual, todos os tratamentos foram classificados como sendo “adequados”.

Tabela 3. Classificação para interpretação dos resultados de parâmetros de fertilidade: carbono orgânico total (COT), Ca+Mg e pH, de acordo com o manual de adubação do estado do RJ. As amostras foram coletadas na profundidade de 0-10cm.

Tratamento	COT (g/dm ³)		Ca+ Mg (cmolc/dm ³)		pH (CaCl ₂)	
	Média	(σ)	Média	(σ)	Média	(σ)
Convencional	8,33	0,47	3,8	0,14	5,63*	0,05
Cultivo mínimo (RO)	9,33	0,47	4,13	0,09	5,80*	0
Plantio direto	9,67	1,25	4,1	0,22	5,73*	0,12
Sistema agroflorestal	13,33	0,47	4,57	0,34	5,03**	0,05

Legenda: Verde- Adequado ; Amarelo- Moderado e Vermelho (Inadequado); /* Moderadamente ácido; ** Fortemente ácido/ σ- desvio padrão

Ademais, a tabela 2 mostra que entre os tratamentos convencional, cultivo mínimo com enxada rotativa e plantio direto há menor variação no valor de teores de carbono orgânico total do solo (COT), apesar da menor concentração ter sido medida para o sistema convencional. Já o solo oriundo do sistema SAF, este mostrou possuir um teor de COT mais elevado entre os demais tratamentos e, de acordo com a referência utilizada pode ser classificado como sendo de classe de fertilidade média, em contraposição, os outros tratamentos de preparos agrícolas em monocultivo de milho foram classificados como sendo de classe de fertilidade baixa para a medição de carbono orgânico do solo, também em referência as classificações utilizadas pelo manual supracitado para plantios agrícolas no estado do RJ.

Quanto ao recomendado para solos do estado do RJ a tabela 3 mostra que em relação aos teores de fósforo, todos os tratamentos, com exceção do sistema agroflorestal, foram classificados como adequados. O teor médio de fósforo resina no SAF, nesse estudo, foi relativamente mais baixo e ficou classificado como valor “moderado”. Já confrontando os teores de potássio o SAF obteve classificação como “inadequado” já os demais tratamentos obtiveram valores de teor de potássio considerados “moderados”. Estes resultados são função direta da adubação frequente (anual) que os sistemas agrícolas recebem, e que no manejo de SAF ocorreu apenas nas covas das plantas, no plantio das mudas. Ademais, esses resultados trazem em evidência o potencial de reciclagem do SAF e de imobilização desses elementos na biomassa aérea das espécies presentes.

Tabela 4.– Interpretação e classificação dos resultados de fósforo e potássio de acordo com os critérios do manual de adubação e correção do solo para o estado do RJ. Fonte: (Embrapa,2014).

Tratamento	Fósforo (mg/dm ³)		Potássio (mg/dm ³)	
	Média	(σ)	Média	(σ)
Convencional	68,00	29,22	101,66	9,58
Cultivo mínimo (RO)				
Rotativa	50,33	15,63	117,30	17,78
Plantio direto	51,33	28,29	129,03	20,93
Sistema agroflorestal	32,33	7,32	49,53	12,09

Legenda: Verde- adequado; Amarelo- moderado e Vermelho inadequado; /* moderadamente ácido ** Fortemente ácido/ σ - desvio padrão.

5.2 Atividade biológica do solo: respiração basal e atividade enzimática

De acordo com os objetivos do trabalho gerou-se dados para análise microbiológica do solo a partir de atributos microbiológicos mensuráveis do solo, ou bioindicadores: taxa de respiração basal e atividades das enzimas β -glucosidase, fosfatase ácida e arilsulfatase. O estudo foi feito com intuito de comparar a qualidade biológica dos diferentes tratamentos sobre o cultivo de milho e usando o sistema agroflorestal como ambiente de referência. Nessa perspectiva, foram gerados dados relativos a partir do experimento descrito de taxa de respiração basal e de análise laboratorial de medição da atividade enzimática.

A interpretação dos resultados relativos às atividades dos microrganismos presentes no solo, como indicadores de QS, diferem da análise que se faz a partir de indicadores químicos de fertilidade do solo, para os quais os níveis de referência (baixo, médio, adequado e alto) são bem definidos para cada elemento e tipo de solo (geralmente levando em consideração características como textura, conteúdo de matéria orgânica e sistema de manejo). É um desafio interpretar indicadores microbianos e o uso de tratamentos referência são normalmente usados, podendo este ser uma mata ou mesmo um tratamento com performance positiva de forma a realizar a comparação (DICK, 1992).

Todavia, estudos mais recentes vêm se concentrando na criação de tabelas interpretativas referenciais para indicadores microbiológicos. Embora essas tabelas

tenham sido feitas para o bioma Cerrado (LOPES et al., 2013). Na análise desse trabalho utilizaremos essas tabelas de referência para interpretação de indicadores microbiológicos visto que ainda não existem tabelas de referência específicas para o bioma do estado do RJ.

Dado o experimento de respiração basal realizado em janeiro de 2020 foi possível quantificar o CO₂ liberado por cada amostra de solo a fim de modelar esse processo. Foram gerados, assim, dados a partir das medições de quantificação de emissões de C-CO₂ utilizando o método da titulação e posteriormente seguindo os cálculos estequiométricos para amostras de 50g, extrapolando os resultados para 1kg de solo. A partir desses dados, foram calculadas as médias entre as repetições e os desvios padrão entre os tratamentos gerando-se como resultado para análise as curvas de evolução de emissão de CO₂, sendo possível comparar os resultados dos 4 (quatro) diferentes tratamentos.

Considerando a tabela 4 dos resultados obtidos de respiração basal a partir das médias dos tratamentos e a análise estatística de dispersão, as medições que obtiveram maior valor de desvio padrão e maior variabilidade nos dados entre as repetições foram os referentes ao sistema de uso de enxada rotativa. Em contraposição as medições referentes ao sistema agroflorestal obtiveram valores de desvio padrão mínimos. Esses achados podem estar relacionados com a deposição mais homogênea do material orgânico, via serapilheira no SAF que nos outros sistemas, onde as culturas são plantadas em linhas.

Tabela 5. Médias e desvios padrão dos resultados obtidos de respiração basal do solo em C-CO₂ acumulado em um período de 9 dias de incubação.

Preparo agrícola	Profundidade (cm)	RBS (C-CO ₂ mg/kg solo)	Desvio padrão
Cultivo mínimo	0-10	50,12	0,88
Convencional	0-10	42,44	0,42
Plantio Direto	0-10	48,03	0,56
SAF	0-10	35,28	0,28

O sistema que acumulou uma maior quantidade de emissão de C-CO₂ ao longo do período de 9 dias, entre os três preparos agrícolas foi o sistema que realizou os preparos periódicos do solo, em sistema de cultivo mínimo, e com uso do equipamento da enxada rotativa para preparo do solo. Há de se considerar que nesse sistema houve menor revolvimento se comparado ao sistema convencional, mas foi utilizado

uma ferramenta com alta capacidade de desagregação do solo, apesar da menor frequência de uso.

Já o sistema convencional que seguiu o princípio de realizar 1 aração e 2 gradagens no preparo do solo, provocando um revolvimento comparativo maior do solo obteve uma menor emissão acumulativa comparativa entre os sistemas de PD e RO, mantidas as mesmas condições de umidade e temperatura em todo o período de incubação. Embora pareça estranho esse comportamento do CO₂, esse resultado pode ter origem no fato do carbono estar sendo estocado em compartimento distintos do solo. Grosseiramente pode-se separar o C do solo em dois compartimentos, o lábil que se refere ao material orgânico mais grosseiro e aportado ao solo, como folhas e seus fragmentos, raízes, sementes e resíduos da meso e macrofauna do solo, todos em diferentes estágios de decomposição. O outro compartimento seria aquele representado pela matéria orgânica do solo humificada, e que está intimamente associada a fração mineral (Roscoe e Machado, 2000). Essas frações são conhecidas como matéria orgânica particulada e pesada (complexos organo-minerais), respectivamente.

Assim, é possível que nos SAF, pelo menor revolvimento do solo, a MOS esteja sendo “guardada” em compartimentos mais estáveis, complexos e por isso menos acessíveis a microbiota do solo; ao passo que nos demais sistemas, a maior parte da MOS seja representada pela fração mais acessível a biota do solo e por isso o maior efluxo de CO₂ nesses sistemas. Outra hipótese é de que a adubação e a elevação do pH do solo, possam estar melhorando as condições para a microbiota decompor a matéria orgânica do solo.

Realizando uma comparação direta das curvas de respiração apenas entre o sistema plantio direto e convencional, apesar de ter sido verificada uma atividade microbiana acumulada superior no PD no final do período de incubação de 9 dias, resultado qualitativo similar aos obtidos nos trabalhos de Balota e Chaves (2011), e Lisboa et al. (2012), a comparação direta entre os dois sistemas permite observar que a diferença não foi tão ampla ao longo do período como demonstra o gráfico da Figura 2.

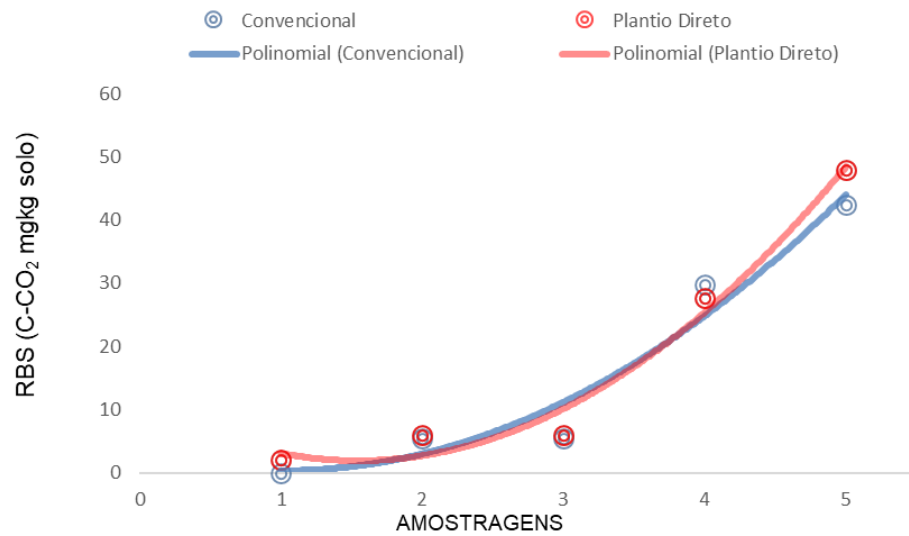


Gráfico 1. Gráfico comparativo entre PD e CO, das curvas de fluxo de emissão de C-CO₂ acumulativa durante um período de 9 dias de incubação com 5 medições. Fonte: Elaboração própria.

O SAF, como já evidenciado, foi utilizado como sistema de referência por representar um sistema mais complexo, mas comparando-o diretamente com o plantio direto, que também promove uma maior conservação e qualidade para o solo, o PD teve uma curva de respiração com taxas mais altas em todo o período de incubação como mostrado no gráfico da figura 3. Esse resultado tem relação com o fato de o SAF promover a deposição de resíduos mais complexos devido à alta diversidade e maior densidade de espécies em uma mesma área.

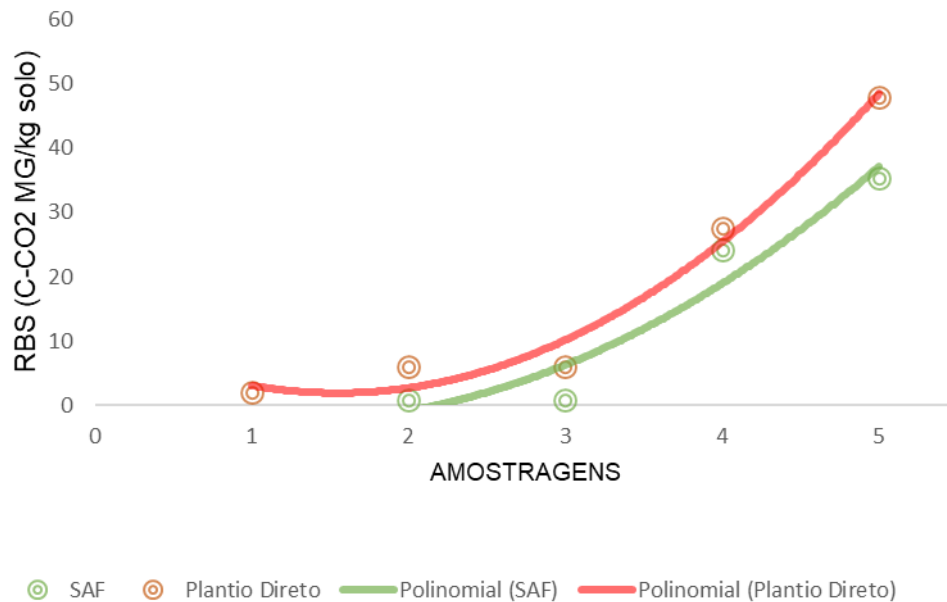


Gráfico 2. Gráfico comparativo entre SAF e PD das curvas de fluxo de emissão de C-CO₂ acumulativa durante um período de 9 dias de incubação com 5 medições. Fonte: elaboração própria.

Os resultados de SAF como tratamento nesse estudo mostraram que apesar desse sistema conferir naturalmente um maior aporte de MOS e de acordo com análise feita possuir um maior teor de carbono orgânico do solo entre os demais tratamentos, obteve, nesse estudo, um valor acumulado de RBS igual a 35,28 (C-CO₂ mg/kg solo) o que foi < 40,0 sendo classificado como baixa de acordo com a classificação de Lopes et al.,(2013). De fato, como mencionado pelo próprio autor em seu estudo ecossistemas mais naturais e mais complexos tendem a ter taxas de respiração basal relativas mais baixas, pois a população microbiana encontra-se em maior equilíbrio e confirma-se, com esse resultado, a hipótese de que esse manejo agrícola poderá fixar a maiores taxas o carbono no solo ao longo do tempo.

De maneira a aprofundar a análise microbiológica de qualidade do solo e utilizar outros indicadores de atividades dos microrganismos foram gerados dados da atividade enzimática em cada tratamento estudado. As enzimas β -glucosidase, fosfatase ácida e arilsulfatase foram medidas de acordo com a metodologia proposta por (TABATABAI, 1994) e foram confrontadas com as tabelas referenciais para uso de enzimas como indicadores de qualidade do solo formuladas para estudos que foram feitos no bioma Cerrado.

Tabela 6. Interpretação dos resultados indicadores enzimáticos do solo: atividade enzimática, em comparação com os teores de carbono orgânico do solo(COS).

Tratamento	β -glucosidase		Fosfatase Ácida		Arilsulfatase		COS	
	mg PNG/kg	(σ)	mg PNG/kg	(σ)	mg PNG/kg	(σ)	g/dm ³	(σ)
CO	79,62	4,87	332,14	49,95	123,81	40,70	8,33	0,5
CM	96,41	13,09	525,39	96,37	224,34	67,36	9,33	0,5
PD	109,3	22,99	489,65	237,20	215,96	88,51	9,67	1,3
SAF	103,48	20,05	550,80	94,76	282,43	14,74	13,33	0,5

Legenda: Verde- adequado; Amarelo-Moderado; σ - desvio padrão; β -glucosidase, fosfatase ácida e arilsulfatase expressos em mg de p-nitrofenol/kg de solo/h. Tabelas de referência de interpretação utilizadas de Mendes et al. (2018).

De acordo com o mostrado na Tabela 5, de interpretação dos indicadores enzimáticos, em relação a atividade da β -glucosidase o sistema que conferiu maior medição foi o plantio direto seguido do sistema agroflorestal, sendo o sistema convencional de preparo aquele que obteve o menor valor e também uma medida de dispersão baixa considerando a medida de desvio padrão, atribuindo assim uma maior confiabilidade ao fato de ter um desempenho comparativo mais baixo em relação ao indicador β -glucosidase. Entretanto, de maneira geral, todos os tratamentos foram classificados como sendo de atividade “moderada” para essa enzima considerando as tabelas de referência de Mendes et al. (2018). Ademais, cabe mencionar que considerando as médias observadas e a dispersão expressada pelos valores de desvio padrão entre os tratamentos conservativos e sistema agroflorestal (SAF), houve pouca diferenciação entre os tratamentos quanto ao desempenho nesse indicador β -glucosidase.

Cabe mencionar que Lopes et al., (2013) em seu estudo e interpretação de dados de indicadores enzimáticos sendo aplicados em amostras de solos do bioma Cerrado encontraram medidas de atividades menores da enzima β -glucosidase em solos nativos se comparados a sistemas sob plantios agrícolas, com a ressalva que para essa comparação direta há de se considerar utilizar amostras de solos com teores de SOC semelhantes.

Em seu estudo, Peixoto et al., (2010) demonstrou que valores menores para a atividade enzimática β -glucosidase podem parecer indicar uma baixa atividade biológica, o que pode levar a uma interpretação errônea dos índices microbiológicos. Todavia, esse fato pode estar relacionado à qualidade e quantidade de material vegetal devolvido como resíduos, que podem ser mais complexos, por exemplo, em áreas nativas do que aqueles comumente encontrados em campos agrícolas.

Entretanto, apesar do sistema agroflorestal ter obtido uma média mais baixa do

que o sistema de plantio direto, considerando a dispersão entre as médias, não ficou tão clara essa diferenciação entre os tratamentos conservativos e o sistema de referência.

Quanto ao demonstrado na Tabela 5 em referência ao indicador fosfatase ácida apenas os sistemas que ficaram abaixo do classificado como de atividade “adequada” foram os manejos plantio direto e convencional sendo que o sistema de plantio direto apenas apresentou um desempenho de aproximadamente 4% abaixo do que é classificado como sendo “adequado” que são valores > 495 mg PNG/kg. Cabe mencionar que como já debatido a fosfatase ácida é uma enzima que relacionasse com o ciclo do fósforo no solo e as atividades reciclagem de matéria orgânica no solo.

Quanto a análise de dispersão demonstrada pela atividade da fosfatase ácida, os dados mostram que houve uma razoável diferença entre as estatísticas dos tratamentos, de forma mais específica, o sistema de plantio direto obteve uma dispersão elevada se comparada aos demais tratamentos e o sistema convencional a menor dispersão em suas médias.

Ademais, a partir da análise do indicador fosfatase se comparado aos teores de carbono orgânico e de fosforo extraídos por resina, foi possível conceber uma lógica de correlação. Os resultados demonstram que a lógica da correlação entre a atividade da fosfatase e o teor de carbono orgânico do solo demonstra-se positiva, sendo o sistema agroflorestal o que obteve o maior valor de atividade de fosfatase ácida e o maior valor de COS. Em contraposição, quanto a relação que essa enzima possui com o ciclo de fósforo no solo, os resultados demonstram que a atividade dessa enzima foi maior em solos com menores teores de fósforo presentes evidenciando uma correlação negativa. De fato, nesse estudo o solo que possui menor teor de fósforo é o sistema agroflorestal já que esse não recebe adubação frequente em comparação ao sistema convencional que recebe correção química mas demonstrou um desempenho alto do indicador enzimático fosfatase que pode ser interpretado como a demonstração de um potencial autossustentável de mineralização do P no solo.

Com isso, percebe-se que esses resultados podem estar relacionados ao fato que os microrganismos do solo (MOS) tendo fósforo disponível no solo poderão reduzir a taxa de produção de fosfatase ácida. De fato, os microrganismos presentes no solo do sistema agroflorestal demonstraram agir de forma eficiente a partir desse indicador, considerando que produziram a fosfatase ácida no sistema agroflorestal em

maior quantidade que os demais tratamentos, devido a necessidade de quebrar moléculas orgânicas para obtenção do fósforo.

Quanto à análise da enzima arilsulfatase como indicador, os dados demonstram que o sistema que teve maior desempenho nesse indicador de atividade microbiológica foi o sistema agroflorestal, seguido do cultivo mínimo e plantio direto, ressaltando mais uma vez o menor desempenho comparativo no solo oriundo do sistema convencional frente aos indicadores enzimáticos. Cabe considerar que o sistema convencional obteve os menores valores relativos de indicadores de atividade enzimática entre os tratamentos na análise das três enzimas, ademais resalta-se que esse tratamento foi o sistema que obteve o menor teor de carbono presente no solo, ou seja, menores teores de matéria orgânica do solo (MOS).

Como demonstrado nos dados desse estudo e ilustrados nos gráficos nas figuras 3 e 4, foi observada a correlação positiva das atividades das enzimas fosfatase ácida e β -glucosidase estudadas e o teor de carbono orgânico do solo em todos os tratamentos, corroborando com afirmativas de outros trabalhos. Segundo Lopes et al., (2013) o teor de COS é um atributo que está totalmente relacionado ao desempenho do solo nos serviços de retenção e ciclagem de nutrientes, estabilidade física, retenção de água, filtragem de compostos tóxicos e conservação da biodiversidade no solo. Com isso é possível dizer que o COS e o bioindicadores enzimáticos demonstraram-se como sendo indicadores eficientes do desempenho das funções do solo e conseqüentemente dos processos relacionados a sua qualidade, principalmente, relacionado esse conceito a eficiência da atividade biológica presente a qual relaciona-se com outras funções do solo.

Em relação a correlação entre o indicador fosfatase ácida e os teores de fósforo resina no solo, como demonstra o gráfico da figura 5 e conforme já descrito na análise dos dados encontrados, de maneira geral, houve uma correlação linear negativa entre as duas medidas. De fato, sendo os microrganismos do solo os maiores responsáveis pela produção dessa enzima, tendo fósforo (P) disponível, tendem a produzir menos da enzima fosfatase, mas diante da necessidade da falta de disponibilidade, tendem a liberar essas enzimas em maiores taxas para que seja possível a mineralização de P.

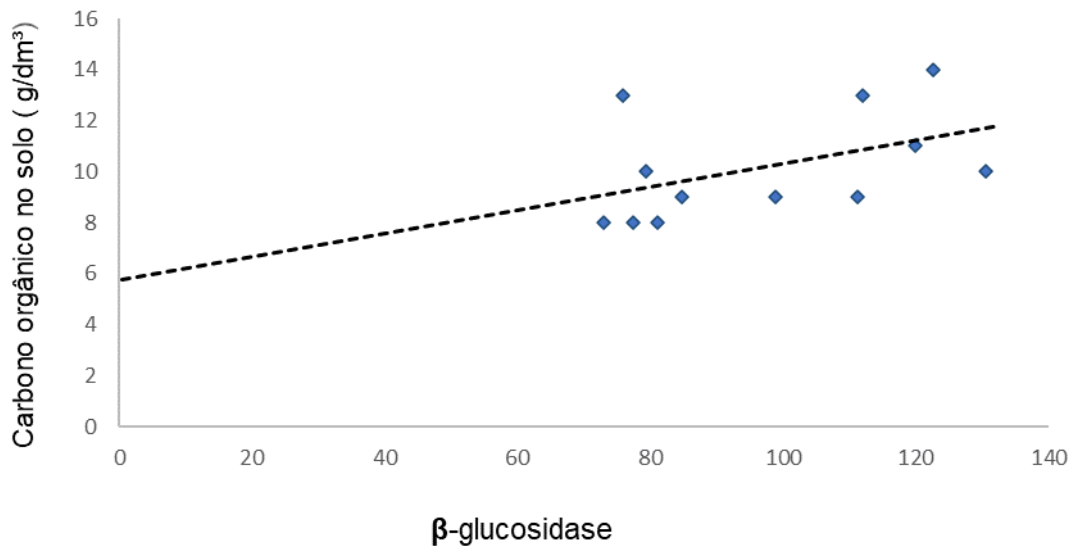


Gráfico 3. Gráfico que mostra a correlação positiva entre o carbono orgânico do solo (COS) e a atividade da enzima β -glucosidase, os pontos representam os dados dos quatro tratamentos juntos em azul. Fonte: elaboração própria

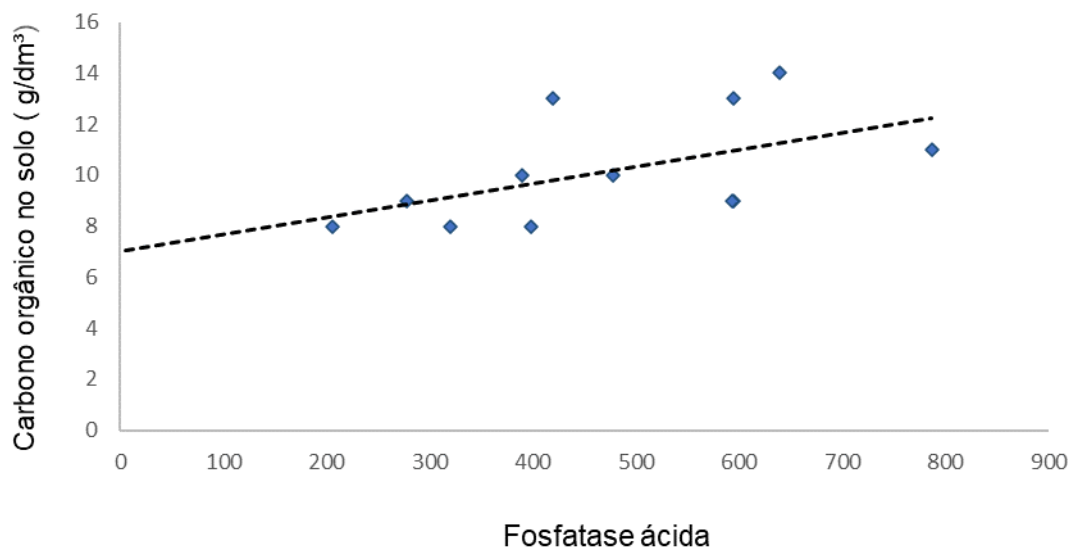


Gráfico 4. Gráfico que mostra a correlação positiva entre o carbono orgânico do solo (COS) e a atividade enzimática da fosfatase ácida, os pontos representam os dados dos quatro tratamentos juntos em azul. Fonte: elaboração própria.

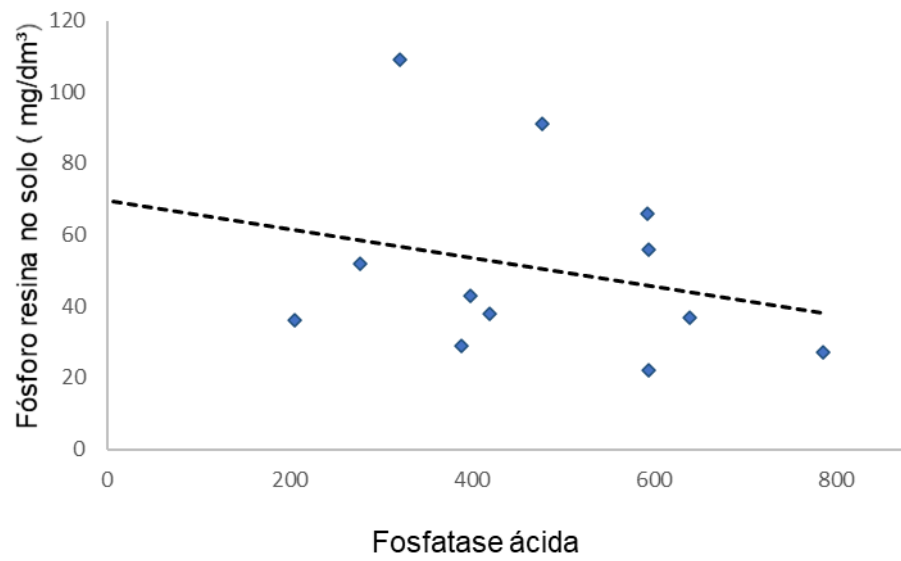


Gráfico 5. Gráfico que mostra a correlação negativa entre teor de fósforo resina presente no solo e a atividade enzimática de fosfatase ácida, os pontos representam os dados dos quatro tratamentos e 3 repetições. Fonte: elaboração própria.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diferentes sistemas de manejos agrícolas podem alterar a qualidade do solo (QS) e esse fato foi possível de ser observado, principalmente, a partir da avaliação da atividade da microbiota, que demonstrou ser mais sensível às perturbações. De forma mais específica, e tratando do objetivo central deste trabalho, os cultivos agrícolas diferenciaram-se devido aos preparos empregados, estes demonstraram alterar ativamente a dinâmica da matéria orgânica do solo, via avaliação a partir de indicadores de QS.

Ademais, foi possível conferir aos indicadores enzimáticos uma maior eficiência em comparar os diferentes manejos adotados, e, esses indicadores demonstraram possuir alto potencial de serem usados no monitoramento e na aquisição de informações sobre o estado da QS e sobre os processos biológicos que ocorrem no solo. Os resultados obtidos a partir desses indicadores aumentam a compreensão desses processos, e são capazes de auxiliar a tomada de decisão para agricultores. Com isso, foi possível evidenciar o grande potencial dos indicadores enzimáticos na medição dos benefícios que sistemas conservacionistas promovem, de forma mais sensível, e mais rapidamente em comparação com análises rotineiras de fertilidade convencionais.

Nesse estudo, foi possível atestar ainda que o sistema convencional é um sistema agrícola menos resiliente pois depende altamente de corretivos externos à produção para atingir níveis de nutrição adequados para as plantas. Além disso, atestou-se que o sistema agroflorestal possui grande potencial agroambiental, na medida em que, é capaz de produzir alimento, em taxas de produtividades elevadas, e viabiliza a eficiência em processos de sequestro C e a ciclagem de outros nutrientes essenciais. De fato, neste trabalho essa hipótese pareceu comprovar-se pois esse foi o sistema que mais agregou matéria orgânica no solo, com reduzida emissão de CO₂ em todo o período, de nove dias de incubação, corroborando com a hipótese inicial de que ecossistemas mais complexos (como os naturais) podem obter resultados que indicam uma melhor eficiência na fixação de carbono no solo devido a menores taxas de respiração basal, se comparadas a solos com teor de carbono orgânico e texturas parecidas.

Portanto, fica claro que a agricultura conservacionista poderá ser estimulada pelo uso de indicadores sensíveis e que comprovem os benefícios que conferem. E

com isso, ocorre o estímulo aos processos relacionados à conservação do solo e da água em sistemas agrícolas, promovendo uma eficiente ciclagem de nutrientes, reduzindo, assim, a necessidade de aplicação de insumos externos à unidade de produção orgânica. Além disso, estudos acerca de preparos conservacionistas podem fomentar e apoiar as decisões de agricultores e governos dentro do contexto de política de uso do solo nos territórios.

. Tratando-se especificamente do uso das enzimas como indicadores de serviços ecossistêmicos presentes no solo, percebeu-se alguma correlação positiva com o teor de carbono orgânico do solo e em contraposição uma correlação negativa entre a fosfatase ácida e os teores de fósforo resina no solo, resultados que estão relacionados a ativa atuação das enzimas na ciclagem de nutrientes no solo.

Conclui-se, portanto, que estudos de qualidade do solo (QS) devem levar em consideração a relevância da dinâmica da microbiota no solo a partir de indicadores de QS como os indicadores enzimáticos visando conclusões mais aprofundadas sobre as estratégias de manejo e os benefícios que conferem. O sistema agroflorestal nesse estudo, pareceu ter um resultado de maiores índices de qualidade do solo juntamente aos sistemas mais conservativos de plantio direto e cultivo mínimo apesar de esse último ter obtido maiores taxas de perdas de carbono no solo. Dado isso, conclui-se que o uso de indicadores aumenta o poder de decisão governamental acerca das políticas de uso do solo podendo favorecer os subsídios ao uso de práticas conservativas com o uso racional do solo em sistemas agrícolas promovendo assim a garantia da promoção de serviços ecossistêmicos pelo solo.

7. TRABALHOS FUTUROS

Sendo a RBS fortemente influenciada por variações na temperatura e pelas condições de umidade presentes na amostra de solo, estudos futuros sugerem a realização de experimento de respiração basal do solo considerando diferentes gradientes de temperatura, a fim de mimetizar, por exemplo, o aquecimento global a fim de verificar a resposta da atividade microbiológica de cada preparo com exposição a condições de stress de temperatura.

Outra perspectiva de análise futura envolve a adoção de outra metodologia de medição de respiração basal a partir de outro método, por cromatografia gasosa, que segundo bibliografia pode ser mais adequada para medições horárias, em períodos de tempo menores que 24h de incubação. Esse experimento estava sendo planejado para ser realizado em Março de 2020, entretanto, devido ao advento da pandemia da COVID-19 não foi possível realizá-lo.

Além disso, a aplicação da metodologia de cromatografia gasosa diferente de medição de respiração as mesmas amostras de solo tem por objetivo comparar os dados encontrados por duas metodologias diferentes e realizar considerações sobre a precisão das duas metodologias empregadas, além disso, o método de cromatografia gasosa apesar de ser considerado caro devido ao equipamento ser de investimento inicial elevado confere maior sustentabilidade as medições de emissão de gases no solo, por não produzir passivos ambientais, pois não gera resíduos tóxicos como o método de titulação usando ácido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBUQUERQUE, A. W., SANTOS, J. R., MOURA FILHO, G. E REIS, L. S. Plantas de cobertura e adubação nitrogenada na produção de milho em sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, 721-726, 2013.
- ALTIERI, M.; NICHOLLS, C. I. O potencial agroecológico dos sistemas agroflorestais na América Latina. **Revista Agriculturas: experiências em agroecologia**, v. 8, n. 2, 2011.
- ALVES DE CASTRO LOPES, André; GOMES DE SOUSA, Djalma Martinhão; CHAER, Guilherme Montandon; BUENO DOS REIS JUNIOR, Fábio; GOEDERT, Wenceslau J.; DE CARVALHO MENDES, Iêda. Interpretation of Microbial Soil Indicators as a Function of Crop Yield and Organic Carbon. **Soil Science Society of America Journal**, [S. l.], v. 77, n. 2, p. 461–472, 2013. DOI: 10.2136/sssaj2012.0191.
- ANDERSON, Traute Heidi; DOMSCH, Klaus H. Soil microbial biomass: The eco-physiological approach. **Soil Biology and Biochemistry**, [S. l.], v. 42, n. 12, p. 2039–2043, 2010. DOI: 10.1016/j.soilbio.2010.06.026. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.06.026>.
- ARAÚJO, Emanuel José Gomes De; LIMA, Dayane Oliveira Lima; CURTO, Rafaella De Angeli; SILVA, Eduardo Vinícius; ARTUR JUNIOR, José Carlos. SPACE PATTERN OF FOREST SPECIES AND ITS RELATIONSHIP WITH AGRICULTURAL FACTORS AGROFLORESTAL SYSTEM. **Forest**, [S. l.], v. 44, n. 2, p. 1115–1128, 2019. DOI: 10.5380/rf.v49.
- BALOTA, Elcio Liborio; CHAVES, Julio César Dias. Microbial activity in soil cultivated with different summer legumes in coffee crop. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, [S. l.], v. 54, n. 1, p. 35–44, 2011. DOI: 10.1590/S1516-89132011000100005.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; MARTIN-NETO, L. Efeito de sistemas de preparo e de cultura na dinâmica da matéria orgânica e na mitigação das emissões de CO₂. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S. l.], v. 24, n. 3, p. 599–607, 2000. DOI: 10.1590/s0100-06832000000300013.
- CHERUBIN, Maurício Roberto; CHAVARRO-BERMEO, Juan Pablo; SILVA-OLAYA, Adriana Marcela. Agroforestry systems improve soil physical quality in northwestern Colombian Amazon. **Agroforestry Systems**, [S. l.], v. 93, n. 5, p. 1741–1753, 2019.

DOI: 10.1007/s10457-018-0282-y.

COSTA, Falberni de Souza; BAYER, Cimélio; ZANATTA, Josiléia Acordi; MIELNICZUK, João. Estoque de carbono orgânico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, [S. l.], v. 32, n. 1, p. 323–332, 2008. DOI: 10.1590/s0100-06832008000100030.

DA SILVA, Camila Santos; PEREIRA, Marcos Gervasio; DELGADO, Rafael Coll; DA SILVA, Eduardo Vinícius. Espacialização dos atributos químicos e físicos do solo em um sistema agroflorestal, Seropédica, Brasil. **Cerne**, [S. l.], v. 22, n. 4, p. 407–414, 2016. DOI: 10.1590/01047760201622042159.

DON, Axel; SCHUMACHER, Jens; FREIBAUER, Freibauer. Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks – a meta-analysis. **Global Change Biology**, [S. l.], p. 1658–1670, 2011. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2010.02336.x.

FAO & ITPS. **Intergovernmental Technical Panel on Soils. Status of the World's Soil Resources**. Rome. Disponível em: <http://www.fao.org/3/a-i5199e.pdf>.

GAMA-RODRIGUES, Emanuela; GAMA-RODRIGUES, Antonio Carlos. **Biomassa Microbiana e Ciclagem de Nutrientes**. [s.l: s.n.].

IPCC. **Climate change and land grabbing: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems**. DOI: 10.4337/9781784710644.

ISLAM, K. ..; MULCHI, C. ..; ALI, A. .. Interactions of tropospheric CO₂ and O₃ enrichments and moisture variations on microbial biomass and respiration in soil. **Global Change Biology**, [S. l.], n. x, 2000.

LAL, Rattan. Restoring soil quality to mitigate soil degradation. **Sustainability (Switzerland)**, [S. l.], v. 7, n. 5, p. 5875–5895, 2015. DOI: 10.3390/su7055875.

LISBOA, BRUNO BRITO; VARGAS, LUCIANO KAYSER; SILVEIRA, Andressa; OLIVEIRA DA, MARTINS, ADRIANA FERREIRA AND SELBACH, Pedro alberto. Indicadores microbianos de qualidade do solo em diferentes sistemas de manejo. **Revista brasileira de Ciência do Solo**, [S. l.], v. 36, n. 1, p. 45–55, 2012.

MENDES, Iêda Carvalho; DE SOUSA, Djalma Martinhão Gomes; REIS JUNIOR, Fábio Bueno; LOPES. **Bioanálise de solo: como acessar e interpretar a saúde do solo**. Planaltina, DF.

RODRIGUES, Vanda Gorete S.; CASTILLA, Carlos; CORRÊA, Rogério S.; PALM,

Cheryl. Estoque de Carbono em sistema agroflorestal com Café Rondônia-Brasil. [S. l.], p. 38–42, 2010.

SÁ, João Carlos de Moraes; LAL, Rattan. Stratification ratio of soil organic matter pools as an indicator of carbon sequestration in a tillage chronosequence on a Brazilian Oxisol. **Soil and Tillage Research**, [S. l.], v. 103, n. 1, p. 46–56, 2009. DOI: 10.1016/j.still.2008.09.003.

SILVA, Camila; SANTOS, Silvio; GUERRA, Daniel; ESPINDOLA, Jose Antonio; ARAÚJO, Ednaldo. Avaliação de diferentes manejos do solo sobre a produtividade do milho (*Zea mays*) em sistema orgânico de produção. **Cadernos de Agroecologia**, [S. l.], v. 13, 2018.

SIMINSKI, Alexandre; DOS SANTOS, Karine Louise; WENDT, Juliano Gil Nunes. Rescuing agroforestry as strategy for agriculture in Southern Brazil. **Journal of Forestry Research**, [S. l.], v. 27, n. 4, p. 739–746, 2016. DOI: 10.1007/s11676-016-0232-3.

SOUZA, Edicarlos Damacena De; COSTA, Sérgio Ely Valadão Gigante de Andrade; IBANOR, Anghinoni; DE LIMA, Christina Venzke Simões; CARVALHO, Paulo César de Faccio; MARTINS, Amanda Posselt. Biomassa microbiana do solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto, submetido a intensidades de pastejo. [S. l.], n. 1, p. 79–88, 2010.

STENBERG, Bo. Monitoring Soil Quality of Arable Land: Microbiological Indicators. **Acta Agriculturae Scandinavica Section B: Soil and Plant Science**, [S. l.], v. 49, n. 1, p. 1–24, 1999. DOI: 10.1080/09064719950135669.

VEZZANI, Fabiane Machado. **Qualidade do sistema solo na produção agrícola**. 2001.

VEZZANI, Fabiane Machado; MIELNICZUK, João. Revisão de literatura: Uma visão sobre qualidade do solo. **R. Bras. Ci. Solo**, **33:743-755**, 2009, [S. l.], n. 1, p. 743–755, 2009.