

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA – UEPG
SETOR DE ENGENHARIAS, CIENCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA
PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

ANDRÉ LUIZ OLIVEIRA DE FRANCISCO

ATRIBUTOS MICROBIOLÓGICOS DO SOLO EM DIFERENTES ROTAÇÕES DE
CULTURAS SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO NOS CAMPOS GERAIS-PR

PONTA GROSSA – PR

2022

ANDRÉ LUIZ OLIVEIRA DE FRANCISCO

ATRIBUTOS MICROBIOLOGICOS DO SOLO EM DIFERENTES ROTAÇÕES DE
CULTURAS SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO NOS CAMPOS GERAIS- PR

Tese apresentada para obtenção do título de
Doutor em Agronomia na Universidade
Estadual de Ponta Grossa, Área de
Concentração de Ciência do Solo e Recursos
Naturais.

Orientadora: Profa. Dra. Carolina Weigert
Galvão.

Co-orientadora: Dra. Lutezia Beatriz dos S.
Canalli.

PONTA GROSSA

2022

F819 Francisco, André Luiz Oliveira de
Atributos microbiológicos do solo em diferentes rotações de culturas sob sistema plantio direto nos Campos Gerais- PR / André Luiz Oliveira de Francisco. Ponta Grossa, 2022.
126 f.

Tese (Doutorado em Agronomia - Área de Concentração: Ciência do Solo e Recursos Ambientais), Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientadora: Profa. Dra. Carolina Weigert Galvão.
Coorientadora: Profa. Dra. Lutécia Beatriz dos Santos Canalli.

1. Enzimas - Solo. 2. Matéria orgânica. 3. Qualidade - solo. 4. Atividade microbiana. 5. Sistemas - produção. I. Galvão, Carolina Weigert. II. Canalli, Lutécia Beatriz dos Santos. III. Universidade Estadual de Ponta Grossa. Ciência do Solo e Recursos Ambientais. IV.T.

CDD: 631



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título da Tese: “Atributos Microbiológicos do solo em diferentes Rotações de Culturas sob Sistema Plantio Direto nos Campos Gerais-PR”

Nome: André Luiz Oliveira de Francisco

Orientadora: Profa. Dra. Carolina Weigert Galvão

Aprovado pela Comissão Examinadora:

Profa. Dra. Carolina Weigert Galvão

Prof. Dr. Carlos Alberto Casali

Profa. Dra. Tangriani Simioni Assmann

Dr. Gabriel Barth

Prof. Dr. Fabricio Tondello Barbosa

Ponta Grossa 02 de setembro de 2022.



Documento assinado eletronicamente por **Carolina Weigert Galvao, Professor(a)**, em 19/09/2022, às 15:08, conforme Resolução UEPG CA 114/2018 e art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Fabricio Tondello Barbosa, Professor(a)**, em 20/09/2022, às 10:16, conforme Resolução UEPG CA 114/2018 e art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Alberto Casali, Usuário Externo**, em 21/09/2022, às 13:27, conforme Resolução UEPG CA 114/2018 e art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Tangriani Simioni Assmann, Usuário Externo**, em 27/09/2022, às 11:19, conforme Resolução UEPG CA 114/2018 e art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Gabriel Barth, Usuário Externo**, em 28/09/2022, às 15:58, conforme Resolução UEPG CA 114/2018 e art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.uepg.br/autenticidade> informando o código verificador 1102032 e o código CRC 6C2FD8AD.

Dedico a Deus aos meus mentores espirituais que tanto me ajudaram a me manter no caminho correto e na busca dos meus sonhos. Aos meus pais, Francisco Carlos de Francisco (in memoriam) e Maria Luiza Oliveira de Francisco pelo amor, esforço e responsabilidade do que sou hoje.

Dedico a minha esposa Kairone por toda a paciência, amor, apoio nos momentos, principalmente os difíceis e nos futuros momentos de nossas vidas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a DEUS pela oportunidade oferecida neste mundo!

Agradeço a professora e orientadora Carolina Weigert Galvão pela incondicional ajuda, conselhos, ensinamentos e bons sentimentos a todo o momento, principalmente o da perseverança, em atingir meu sonho.

Agradeço a Lutecia Beatriz dos Santos Canalli minha amiga, co-orientadora e pessoa memorável ao qual tanto me ajudou na construção deste sonho.

Agradeço a Josiane Burkner dos Santos minha amiga e grande conselheira nos momentos bons e principalmente ruins deste sonho e de vários outros.

Agradeço os meus fieis estagiários/bolsistas/amigos aos quais me ajudaram tanto nesta pesquisa e na minha vida até hoje, aos quais tem considerável parcela nesta construção, Daniel Mocelin, Daiane Penteado, Marcus Rogério Junior, Renan Stanilavsky, Thiago Guse, Pedro Maciel, Luana Mercer, Rafael Gebieluca, Flávio Corrêa de Carvalho, Barbara Bagio, Rodrigo Carneiro, Iohann Bauchrowitz, Lya Thais, Lucas Medyk, Alexandre Solek, Gustavo Olzevski, Lais Naghter, Tatiane Moreira, Taize Schafranski, Christian Oliveira, Ana Kelly Chornoby, Carlos e espero não ter esquecido de ninguém ... ficaram os momentos, as ajudas, as coletas, as análises e uma grande gratidão.

Agradeço a todos os pesquisadores, funcionários, técnicos e pessoal do Instituto Agrônomo do Paraná - IAPAR (atual IDR-Paraná) da unidade de Ponta Grossa que ajudaram de alguma forma neste trabalho, em especial Renato Yagi, Josiane Assis, Andressa Andrade, José Augusto, Augustinho, Dacio, Liliane, Carine, Edson Marcio, Luis Henrique, Ranieri, Leandro, Antônio, Luizinho, Rosane, Clayton, Miguel, Roger Mileo. Na sede em Londrina agradeço a Maria Mattos, Oswaldo Machneski, Andrea Scaramal e Arnaldo Colozzi. E de forma geral a todos que tiveram alguma parcela mesmo que pequena na realização deste trabalho, mesmo sem saber.

Agradeço aos amigos que criei, pós-graduando, funcionários e professores da UEPG, em especial a todos os integrantes do LABMOM, professor Rafael Mazer Daiane Hyeda, Ana Kelly Julião, Salomé pela constante ajuda e disponibilidade. No setor de solos do departamento de agronomia agradeço em especial a professora Neyde Giarola e aos amigos e colegas Santos Brant, Kelly, Regiane, Ariane, Lucia, Henrique. Além dos meus colegas de turma das aulas de 2018, em especial Felipe

Dallas, Isabela, Guilherme e a todos os demais. Todos ficaram de alguma forma na minha mente nesta caminhada rumo ao meu sonho. Um especial agradecimento a imensa ajuda do professor Daniel Potma.

Agradeço a minha irmã Julia pelo apoio constante e meus familiares tanto meus como do lado da Kairone que me apoiaram em vários momentos.

Agradeço aos meus amigos/professores do Cescage pela constante ajuda, apoio e parceria que tiveram parte na realização deste trabalho, em especial ao Luis Miguel, Carla Ferreira, Jean Olizeski, Ariadne Waureck, Tereza de Carvalho, Leonardo Túlio, André Tretin e Guilherme Túlio.

Agradeço ao Instituto Agrônomo do Paraná (atual IDR-Paraná), meu local de trabalho, que possibilitou a realização desta pesquisa de doutorado, dando suporte e apoio, minha imensa gratidão, espero dar retorno desta ajuda durante minha vida profissional nele.

Agradeço a Universidade Estadual de Ponta Grossa, promotora da pós-graduação que me deu a chance de ser doutor, agradeço muito.

Agradeço a todos que de alguma forma mesmo que pequena apostaram em me ajudar, em todos os sentidos, levando este sonho da realização do doutorado em frente, nesta tortuosa caminhada até aqui!!!

“Para que o mau triunfe basta que os bons fiquem de braços cruzados”.

“Edmund Burke”

O homem depende de seu pensamento:

É realmente verdade que gratidão gera gratidão e lamúria gera lamúria. Isto acontece porque o coração agradecido comunica-se com Deus, e o queixoso relaciona-se com Satanás. Assim, quem vive agradecendo, torna-se feliz; quem vive se lamuriando, caminha para a infelicidade. A frase "Alegrem-se que virão coisas alegres", expressa uma grande verdade.

Alicerce do Paraíso - 13ª Edição

RESUMO

FRANCISCO, A. L. O. **Atributos microbiológicos do solo em diferentes rotações de culturas sob sistema plantio direto nos Campos Gerais - PR.** Orientador: Carolina Weigert Galvão. Ponta Grossa, 2022. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2022.

A rotação de culturas é prática essencial para um sistema agrícola sustentável, uma vez que aporta resíduos e matéria orgânica ao solo, tendo tal processo intensificado pelo uso de plantas de cobertura. Esta matéria orgânica é fonte de energia para a microbiota, proporcionando sua ativação e melhoria da fertilidade do solo. As rotações precisam ser planejadas para se adequarem aos objetivos dos produtores, mas também visando a qualidade e sustentabilidade do ambiente que está inserida. Existem diversos indicadores de qualidade do solo que avaliam o ambiente de produção verificando sua condução de momento, os relacionados a microbiota do solo têm sido reportados como de grande importância e correlação positiva entre mudanças de manejo e os indicadores microbiológicos do solo. O objetivo deste trabalho foi avaliar o comportamento de indicadores microbiológicos do solo ligados ao ciclo do carbono (C) e nitrogênio (N) em diferentes sistemas de rotações de cultura em sistema plantio direto (SPD). O Experimento foi conduzido na Estação Experimental do IDR-Paraná em Ponta Grossa-PR desde 2017. O delineamento experimental é o de blocos ao acaso, onde são comparadas 6 rotações, com diferentes níveis de diversificação de culturas, com 4 repetições. Os tratamentos tiveram propostas diferenciadas, cada qual com uma sequência de espécies para atender a proposta, uma delas sendo sucessão (Rotação I), a mais utilizada na região, considerada testemunha. As outras 5 rotações propostas na pesquisa foram a Rotação Produtor (Rotação II), Grãos (Rotação III), Grãos/Fitomassa (Rotação IV), Forrageiras de Inverno (Rotação V), Fitomassa Inverno (Rotação VI), cada qual composta por uma sequência de diferentes culturas a fim de atender propostas ligadas à presença de adubos verdes (incluindo consórcio), aumento da diversidade de culturas produtivas e intercalação de grupos vegetativos e cultivados visando obter dados. Coletou-se uma amostra composta de solo por parcela na camada 0-0,10 m nos verões das safras 2018/2019, 2019/2020 e 2020/2021. Foi avaliada a atividade de cinco enzimas do solo (Arilsulfatase, B-Glucosidase, Fosfatase Ácida e Hidrolase do Diacetato Fluoresceína, Urease), e foram quantificados também o C e o N da biomassa microbiana, a respiração basal do solo (RBS), o quociente microbiano e o quociente metabólico. Foram também determinados o conteúdo e o estoque de C orgânico total e das frações lábil e não lábil (> e < 53 μ m), e foi quantificado o nitrato, o amônio, além dos elementos incluídos nas análises de rotina de fertilidade de solo. Foi feita a avaliação da produtividade das culturas de verão e foi determinada a massa seca de todas as culturas nas safras de inverno e verão. Os resultados foram submetidos à análise de variância, aplicando-se o teste de F e quando houve significância, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. Também foi realizada uma análise multivariada de componentes principais e de regressão dos dados de 3 anos de avaliação. Os tratamentos com maior diversidade de espécies de cobertura apresentaram valores superiores de atividade das enzimas arilsulfatase, hidrolase do diacetato de fluoresceína, B-Glucosidase, Fosfatase Ácida e na quantidade de C e N da biomassa microbiana e na RBS nos 3 anos avaliados. Ao longo dos anos de análise, foi possível verificar que a maior parte dos indicadores manteve seus valores, porém a atividade de arilsulfatase,

hidrolase do diacetato, B-glucosidase, fosfatase ácida, e a quantidade de C e N da biomassa microbiana, RBS, amônio, nitrato e C orgânico total tiveram um aumento. Assim, conclui-se que as rotações de culturas com uso de adubos verdes induzem a um incremento da qualidade do solo, principalmente quando leguminosas são incluídas.

Palavras Chave: Enzimas do Solo, Matéria Orgânica, Qualidade do Solo, Atividade Microbiana, Biomassa Microbiana, Sistemas de Produção.

ABSTRACT

FRANCISCO, A. L. O. **Microbiological attributes of the soil in different crop rotations under no-till system in Campos Gerais - PR.** Advisor: Carolina Weigert Galvão. Ponta Grossa, 2022. Thesis (Doctorate in Agronomy) – State University of Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2022.

Crop rotation is an essential practice for a sustainable agricultural system, since it adds residues and organic matter to the soil, and this process is intensified by the use of cover crops. This organic matter is a source of energy for the microbiota, providing its activation and improving soil fertility. The rotations need to be planned to suit the objectives of the producers, but also aiming at the quality and sustainability of the environment in which it is inserted. There are several soil quality indicators that evaluate the production environment, verifying its conduction at the moment, those related to the soil microbiota have been reported as of great importance and a positive correlation between management changes and soil microbiological indicators. The objective of this work was to evaluate the behavior of soil microbiological indicators linked to the carbon (C) and nitrogen (N) cycle in different crop rotation systems in a no-tillage system (DPT). The experiment was conducted at the Experimental Station of IDR-Paraná in Ponta Grossa-PR since 2017. The experimental design is randomized blocks, where 6 rotations are compared, with different levels of crop diversification, with 4 replications. The treatments had different proposals, each with a sequence of species to meet the proposal, one of them being succession (Rotation I), the most used in the region, considered a witness. The other 5 rotations proposed in the research were the Producer Rotation (Rotation II), Grains (Rotation III), Grains/Phytomass (Rotation IV), Winter Forages (Rotation V), Phytomass Winter (Rotation VI), each one composed of a sequence of different crops in order to meet proposals related to the presence of green manures (including intercropping), increased diversity of productive crops and intercalation of vegetative and cultivated groups in order to obtain data. A sample composed of soil per plot was collected in the 0-0.10 m layer in the summers of the 2018/2019, 2019/ 2020 and 2020/2021. The activity of five soil enzymes (Arylsulfatase, B-Glucosidase, Acid Phosphatase and Fluorescein Diacetate Hydrolase, Urease) was evaluated, and the C and N of microbial biomass, basal soil respiration (RBS), soil microbial quotient and metabolic quotient. The content and stock of total organic C and the labile and non-labile fractions ($>$ and $< 53 \mu\text{m}$) were also determined, and nitrate and ammonium were quantified, in addition to the elements included in routine soil fertility analyses. The productivity of summer crops was evaluated and the dry mass of all crops in the winter and summer crops was determined. The results were submitted to analysis of variance, applying the F test and when there was significance, the means were compared by Tukey's test at 5% error probability. A multivariate principal components and regression analysis of the 3-year evaluation data was also performed. The treatments with greater diversity of cover species showed higher values of activity of the enzymes arylsulfatase, fluorescein diacetate hydrolase, B-Glucosidase, Acid Phosphatase and in the amount of C and N in the microbial biomass and in the RBS in the 3 years evaluated. Over the years of analysis, it was possible to verify that most of the indicators maintained their values, but the activity of arylsulfatase, diacetate hydrolase, B-glucosidase, acid phosphatase, and the amount of C and N in the microbial biomass, RBS, ammonium, nitrate and total organic C had an increase. Thus, it is concluded that crop rotations with the use

of green manures induce an increase in soil quality, especially when legumes are included.

Keywords: Soil Enzymes, Organic Matter, Soil Quality, Microbial Activity, Microbial Biomass, Production Systems.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - Imagem aérea do experimente situado na Estação Experimental do Polo Regional de Pesquisa do IDR - Paraná em Ponta Grossa, PR.....	38
QUADRO 1 - Tratamentos compostos por uma sucessão e cinco rotações de culturas para o primeiro e segundo ciclo de três anos proposto no experimento (as cores informam os períodos avaliados).....	39
FIGURA 2 - Organização da amostragem realizada no experimento para obter todas as amostras utilizada	43
FIGURA 3 - Curva de regressão ajustada para interação dos tratamentos nos anos de avaliação (safras 2018-19, 2019-20, 2020-21) para Carbono Orgânico Total.....	63
FIGURA 4 - Curva de regressão ajustada para interação dos tratamentos nos anos de avaliação (safras 2018-19, 2019-20, 2020-21) para amônio.....	66
FIGURA 5 - Curvas de regressão ajustadas para interação dos tratamentos nos anos de avaliação (safras 2018-19, 2019-20, 2020-21) para Carbono da biomassa microbiana (A), beta glucosidase (B), Nitrogênio da biomassa microbiana (C) e arilsulfatase (D).....	72
FIGURA 6 - Curvas de regressão ajustada para interação dos Tratamentos nos anos de avaliação (safras 2018-19, 2019-20, 2020-21) para fosfatase ácida.....	73
FIGURA 7 - Biplot referente a Análise de Componentes Principais (PCA) dos dados da safra de verão (índices microbiológicos, de carbono, de nitrogênio e produtivos do 1º ano de cultivo (2018-19).....	80
FIGURA 8 - Gráfico Biplot referente a Análise de Componentes Principais (PCA) dos dados da safra de verão (índices microbiológicos, de carbono, de nitrogênio e produtivos do 2º ano de cultivo (2019-20).....	83
FIGURA 9 - Gráfico Biplot referente a Análise de Componentes Principais (PCA) dos dados da safra de verão (índices microbiológicos, de carbono, de nitrogênio e produtivos do 2º ano de cultivo (2019-20).....	86

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Sequência aleatória das parcelas (repetições) no experimento de rotações de Culturas.....	40
TABELA 2 - Massa seca da parte aérea das referidas culturas de inverno das rotações de culturas nas safras de 2018, 2019 e 2020.....	52
TABELA 3 - Massa seca da parte aérea das culturas de verão das rotações de culturas nas safras 2018-19, 2019-20 e 2020-21.....	52
TABELA 4 - Massa seca da parte aérea dos tratamentos com a cultura de milho implantado no verão, na safra 2020-21, nas rotações de cultura do experimento.....	54
TABELA 5 - Produtividade das culturas de verão das rotações de cultura nas safras 2018-19, 2019-20 e 2020-21.....	55
TABELA 6 - Peso de mil grãos (PMS) das parcelas das culturas de verão, safra 2019-20, nas rotações de culturas do experimento	56
TABELA 7 - Produtividade dos tratamentos com a cultura de milho implantado no verão, safra 2020-21, nas rotações de cultura do experimento	56
TABELA 8 - Atributos químicos do solo nas rotações de culturas durante o verão na safra 2018-19, e na floresta, ambiente referência	58
TABELA 9 - Atributos químicos do solo nas rotações de culturas durante o verão na safra 2019-20, e na floresta, ambiente referência	58
TABELA 10 - Atributos químicos do solo nas rotações de cultura durante o verão na safra 2020-21, e na floresta, ambiente referência	59
TABELA 11 - Avaliações do Carbono do solo sob rotações de cultura durante a cultura de verão nas safras 2018-19, 2019-20 e 2020-21, e na floresta, ambiente referência.....	61
TABELA 12 - Nitrato e Amônio, nas safras 2018-19, 2019-20 e 2020-21, nas rotações de cultura do experimento e na floresta, ambiente referência.....	64
TABELA 13 - Respiração Basal do Solo (RBS) e Carbono da Biomassa Microbiana (CBM) e Nitrogênio da Biomassa Microbiana (NBM), Quociente Microbiano (qM) e Quociente Metabólico (qCO ₂) nas safras 2018-19, 2019-20 e 2020-21, nas rotações de culturas do experimento e na floresta, ambiente referência.....	70
TABELA 14 - Atividade das enzimas Arilsulfatase, B-Glucosidase, Fosfatase Ácida e Hidrolase do Diacetato Fluoresceína (FDA), Urease nas safras 2018-19, 2019-20 e 2020-21, nas rotações de culturas do experimento e na floresta, ambiente referência.....	71

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	OBJETIVOS.....	18
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
3	HIPÓTESES.....	19
4	REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....	20
4.1	ROTAÇÕES DE CULTURA NO SISTEMA DE PRODUÇÃO AGRÍCOLA.....	21
4.1.1	Aubos Verdes.....	22
4.2	MATÉRIA ORGÂNICA E CICLAGEM DE NUTRIENTES NO SOLO..	24
4.3	INDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO E CICLAGEM DE NUTRIENTES.....	26
4.3.1	Indicadores Microbiológicos de Qualidade do Solo.....	27
4.3.1.1	Atividade enzimática do solo.....	27
4.3.1.2	Biomassa microbiana do solo.....	32
4.3.1.3	Respiração basal do solo e quociente metabólico.....	33
5	MATERIAL E MÉTODOS.....	36
5.1	LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DO EXPERIMENTO.....	36
5.2	DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS.....	36
5.3	METODOLOGIA DE AMOSTRAGEM.....	41
5.4	ANÁLISES ENZIMÁTICA DO SOLO.....	42
5.5	DETERMINAÇÃO DO CARBONO E NITROGÊNIO DA BIOMASSA MICROBIANA DO SOLO, RESPIRAÇÃO BASAL DO SOLO, QUOCIENTE METABÓLICO E QUOCIENTE MICROBIANO.....	44
5.6	ANÁLISE DE NITRATO E AMÔNIO NO SOLO.....	46
5.7	ANÁLISES QUÍMICAS DO SOLO.....	46
5.8	AVALIAÇÃO DO CARBONO E ESTOQUE DE CARBONO NO SOLO.....	47
5.9	AVALIAÇÕES DAS CULTURAS.....	48
5.10	ANÁLISE DOS DADOS.....	48
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	50
6.1	PRODUÇÃO DE FITOMASSA DAS CULTURAS DE INVERNO E VERÃO.....	50
6.2	PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS.....	53
6.3	ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO.....	56
6.4	CARBONO NO SOLO.....	59
6.5	NITROGÊNIO NO SOLO.....	63
6.6	INDICADORES MICROBIOLÓGICOS DO SOLO.....	65
6.7	ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS DAS AVALIAÇÕES.....	78
7	CONCLUSÃO.....	88
	REFERÊNCIAS.....	89
	ANEXO A - CONJUNTO COM 5 GRÁFICOS COM AS MÉDIAS CLIMATOLÓGICAS DE PRECIPITAÇÃO MENSAIS PARA O PERÍODO DE JUNHO DE 2017 A MAIO DE 2021.....	110
	ANEXO B - GRÁFICOS COM AS MÉDIAS CLIMATOLÓGICAS DE TEMPERATURAS MÉDIA, MÍNIMAS E MÁXIMAS MENSAIS PARA O	113

PERÍODO DE JUNHO DE 2017 A MAIO DE 2021.....	
ANEXO C - CROQUI EXPERIMENTAL.....	117
ANEXO D - ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DO SOLO.....	119
ANEXO E - FOTOS DO EXPERIMENTO DURANTE OS MOMENTOS DE CONDUÇÃO E COLETA NO PERÍODO DE DURAÇÃO DO EXPERIMENTO.	121

1 INTRODUÇÃO

A rotação de culturas é uma premissa para um sistema agrícola sustentável sendo componente básico do manejo do solo em sistema plantio direto (SPD). Contudo, muitos produtores, visando facilidades nos processos agrícolas, utilizam por muitos anos as mesmas espécies nas safras inverno e verão, e assim não atendem totalmente os fundamentos que a rotação de culturas prima.

A utilização de culturas alternativas para fins econômicos, ainda que com menor rentabilidade, ou mesmo a utilização de adubos verdes em períodos pouco propícios a ganhos, visando condicionamento do solo, são estratégias a serem aplicadas para se estabelecer rotações de culturas mais diversificadas e eficientes para o condicionamento do solo. Contudo, apesar de muito defendida e recomendada pela pesquisa, devido ao imediatismo econômico e pouco conhecimento das vantagens e benesses ao solo e ao ambiente no médio e longo prazo, não vem sendo adotada pelos agricultores.

A rotação de culturas promove diversas alterações em elementos básicos da dinâmica da matéria orgânica do solo (MOS), dos nutrientes no solo e na microbiologia do solo, dentre muitos outros aspectos. A diversidade de espécies de plantas, mesmo não concomitantes, se desenvolvendo no solo promove maior diversidade na biota e microbiota do solo, que se altera a cada espécie presente, impedindo domínio de determinados grupos nos sistemas, com as mesmas espécies/grupos vegetais repetitivas. Além disso, o cultivo de variadas espécies vegetais (ou grupos) ao longo dos anos induzem a utilização diferenciada dos nutrientes do solo, evitando que sejam exauridos. Em sistemas baseados apenas na sucessão de cultivos ou monocultura isto não ocorre devido à constante presença dos mesmos restos vegetais sendo inseridos no solo, possibilitando inclusive o aumento de patógenos e insetos.

A MOS atuando como coloide e condicionador do solo, já vastamente estudada, tem esta capacidade potencializada com a rotação de culturas, devido a esta promover o aporte de diferentes materiais com diferentes qualidades e em diferentes estágios e velocidade de decomposição.

A ciclagem de nutrientes em sistemas de rotação de culturas, com diversidade e quantidade de materiais aportados ao longo do tempo, apresenta mudanças, principalmente nos ciclos do carbono (C), nitrogênio (N) e enxofre, sendo estes

intimamente ligados a MOS. Esta diversificação demonstra um ambiente mais sustentável e um pouco mais próximo dos ambientes de florestas naturais.

A rotação de culturas é um dos princípios para a consolidação do sistema plantio direto (SPD) como o mais sustentável de produção agrícola, sendo que diferentes rotações de culturas e a contribuição das mesmas para a MOS também afeta a microbiota do solo. Portanto, existe a necessidade de compreender as particularidades que diferentes rotações de culturas promovem ao solo, quantificando as alterações diversas através da atividade da microbiota e da MOS.

A utilização de ferramentas adequadas que identifiquem e quantifiquem atores importantes e seus processos no contexto de sistemas de rotação de culturas são essenciais apresentando-se como indicadores de qualidade do solo. Neste sentido a matéria orgânica do solo e os processos relacionados, como a ciclagem de nutrientes, são elementos interessantes para quantificação e estudo, estando os microrganismos do solo em posição de destaque e atrelados a ciclagem de nutrientes e a matéria orgânica em todo o ambiente. Também a correlação destes índices de qualidade do solo com os componentes de rendimento e a produtividade das culturas em rotação, permitem correlacionar ganhos econômicos com a qualidade do solo no sistema de produção.

As enzimas do solo são indicadores já consolidados para análise da qualidade do solo por estarem diretamente envolvidas no processo de degradação da matéria orgânica pelos microrganismos do solo, sendo parte integral da ciclagem dos nutrientes nos ambientes. Além disso, as enzimas do solo são uma ferramenta de análise comparativa entre sistemas de produção, e sistemas naturais preservados próximos e/ou padrões já determinados pela literatura, podendo abranger inúmeros ciclos de nutrientes e moléculas do ambiente.

Diversas são as enzimas produzidas pela microbiota do solo que tem como alvo a quebra da matéria orgânica. Tais enzimas estão ligadas a ciclagem de nutrientes como o enxofre, N, fósforo, dentre outros compostos que são muito importantes para os sistemas agrícolas de produção.

O conteúdo microbiano e da atividade biológica do solo podem ser medidos através da quantificação do C e do N da biomassa microbiana, e respiração do solo (RBS), respectivamente. Assim sendo ferramentas que proporcionam uma visão geral de análise do comportamento da biota do solo frente a alterações no ambiente, como

nos diferentes sistemas de rotações de culturas, além de proporcionar análise da parte viva da MOS.

Desta forma a aplicação de índices microbiológicos do solo (enzimas, atividades microbianas, dentre outros) pode vir a ser de grande interesse para demonstração de mudanças nos sistemas de produção agrícola e do ambiente em geral demonstrando/quantificando alterações de manejo das mais diversas, inclusive aquelas associadas a mudanças de cobertura e alterações da matéria orgânica.

Tais resultados ainda são de grande valia para demonstrar quais índices podem servir como base para futuras correlações e também contribuir para apontar índices de acompanhamento em larga escala para demonstração de qualidade do ambiente de produção.

2 OBJETIVO

O presente trabalho teve por objetivo comparar diferentes rotações de cultura sob sistema plantio direto a partir da análise de atributos microbiológicos do solo ligados ao ciclo do carbono e nitrogênio e da produtividade das culturas empregadas.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a atividade das enzimas do solo (arilsultase, B-glucosidase, Fosfatase Ácida, Diacetato de Fluoresceína e Urease) frente as diferentes rotações de culturas em sistema plantio direto durante o período de 3 anos;
- Avaliar o carbono e nitrogênio da biomassa microbiana, a respiração basal e os quocientes metabólico e microbiano do solo em diferentes rotações de culturas em sistema plantio direto durante o período de 3 anos;
- Avaliar o conteúdo e o estoque de carbono orgânico total no solo e o estoque de carbono nas frações lábil e associada aos minerais ($>$ e $<$ 53 μ m) do solo em diferentes rotações de culturas em sistema plantio direto durante o período de 3 anos;
- Avaliar o nitrato e o amônio no solo em diferentes rotações de culturas em sistema plantio direto durante o período de 3 anos;
- Avaliar a fertilidade do solo (fósforo, potássio, cálcio, magnésio, alumínio, enxofre, soma de bases, capacidade de troca de cátions, acidez potencial e acidez ativa) em diferentes rotações de culturas em sistema plantio direto durante o período de 3 anos;
- Avaliar a produtividade e a produção de matéria seca das culturas empregadas nas diferentes rotações de culturas testadas sob sistema plantio direto durante o período de 3 anos;
- Avaliar a interação dos dados avaliados entre si nas diferentes rotações de culturas e nos diferentes anos acompanhados.

3 HIPÓTESES

Os atributos químicos do solo não apresentarão valores estatisticamente diferentes entre os tratamentos, porém os atributos microbiológicos se mostrarão estatisticamente diferentes, demonstrando serem sensíveis o bastante para evidenciar as alterações induzidas pelas diferentes rotações de culturas testadas sob sistema plantio direto.

As rotações de culturas que apresentarem maiores valores de atividade das enzimas do solo, respiração basal do solo, C e N da biomassa microbiana e seus quocientes resultarão em uma maior produtividade das culturas e depósito de matéria orgânica na superfície do solo agricultável da área em questão.

Os atributos microbiológicos do solo apresentarão seus maiores valores em sistemas de rotação de culturas mais diversificados e no último ano de avaliação.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A qualidade ambiental é resultante de um conjunto de propriedades desejáveis que o solo, água e atmosfera devem possuir. Contudo cada dia mais a sociedade vem desrespeitando o ambiente do ponto de vista de preservação e utilização racional dos recursos (água, solo, atmosfera) e promovendo redução da qualidade deste em prol de produção para seu usufruto, de energia, estruturas urbanas e rurais e outros itens que incluem vastamente a agricultura e suas cadeias (MENDES et al., 2009; LOPES et al., 2018). Para mensurar a qualidade ambiental, temos a utilização de atributos que são avaliados os quais tenham forte relação com o ambiente e mostrem modificações, este os chamamos de indicadores ambientais (MELLONI, 2007).

Dentre os diversos atributos que podem vir a ser mensurados no ambiente agrícola para determinação de sua qualidade, os relacionados ao solo são muito importantes (MENDES et al., 2015; TATE, 2021). No entanto, a multiplicidade de fatores químicos, físicos e biológicos que controlam os processos biogeoquímicos e suas variações em função do tempo e espaço, aliados a complexidade do solo, tornam difíceis as interpretações dos valores obtidos (DORAN; PARKIN, 1994). Para determinação de qual atributo é mais interessante/recomendado de ser avaliado, há de se verificar a sua sensibilidade, estabilidade, e facilidade de medição (MENDES et al., 2015; SILVA et al., 2021).

Doran e Parkin (1994) consideram a qualidade do solo como a capacidade deste de funcionar dentro dos limites do ecossistema para sustentar a produtividade biológica, manter a qualidade ambiental e promover a saúde de plantas, animais e humana. Esta abordagem leva em consideração não apenas o papel do solo na produção agrícola, mas também a sua participação em funções específicas no ecossistema, compreendendo a sustentabilidade do sistema agrícola em longo prazo. Ao longo das últimas 3 décadas cada vez mais o solo vem atraindo atenções para sua qualidade.

A qualidade do solo agrícola sofre continuamente com as mudanças proporcionadas pela produção agrícola uma vez que essa prática leva a retirada da cobertura original do solo, requer comumente a adição de agroquímicos e fertilizantes nas culturas e manejos diversos a depender da cultura, como revolvimento do solo, trânsito de máquinas e animais, dentre outros. (WANDER, 2009; FRANZLUEBBERGS, 2021). A rotação de culturas e o sistema de plantio direto (SPD)

são manejos que reduzem os efeitos ao ambiente produtivo, minimizando alguns destes problemas, sendo que a adoção do cultivo de adubos verdes neste sistema intensifica tais vantagens promovendo aumento na diversidade e quantidade de matéria orgânica depositada no solo e mudanças benéficas na ocupação do solo e ambiente, as quais aproximam um pouco este sistema ao natural (BAKER et al., 2006; STONE, 2010; FRANCHINI et al., 2011; KASSAM et al., 2013; CALLEGARI, 2014; CONCEIÇÃO et al., 2021).

4.1 ROTAÇÕES DE CULTURA NO SISTEMA DE PRODUÇÃO AGRÍCOLA

A rotação de culturas já é consolidada no meio agrícola, sendo essencial para que haja um sistema mais sustentável e com qualidade em todos os sentidos (solo, fitopatologia, plantas daninhas, dentre outros). A rotação é definida como a alternância de diferentes culturas em uma mesma área, com tempos determinados (ciclos), levando-se em conta as estações do ano (STONE, 2010; FONTOURA et al., 2015). A ausência de um sistema de rotação promove diversas perturbações no ambiente produtivo, distanciando este dos sistemas naturais, caracterizado pela diversidade no ambiente (REICOSKY; SAXTON, 2007; XIONG et al., 2016). No solo, a ausência da diversidade de culturas originará problemas físicos, químicos e biológicos, como por exemplo a diminuição do teor de matéria orgânica do solo (MOS), a degradação da estrutura do solo, a intensificação dos processos erosivos, e a redução da atividade e diversidade biológica (FRANCHINI et al., 2011; BALOTA, 2017).

A sucessão de culturas, por sua vez, define-se como o ordenamento de duas culturas em uma mesma área por tempo indeterminado, alternando o cultivo nas estações do ano (FRANCHINI et al., 2011; KASSAM et al., 2013; MA; WU, 2016). Apesar das vantagens do uso da rotação e da sucessão de culturas, muitos produtores rurais na atualidade, por conveniência ou questões financeiras, se utilizam de sistema próximos a sucessão de culturas promovendo diversos prejuízos ao solo como redução de determinados nutrientes no solo, menor eficiência do ciclo da água, dentre outros.

As rotações devem ser planejadas de forma a englobar culturas com diferentes demandas de nutrientes, capacidades de inserção de matéria orgânica, e sistemas radiculares para assim gerar maiores benefícios a biota e microbiota do solo e a planta

sucessora (SANTOS; REIS, 2001; REICOSKY; SAXTON, 2007; SCOPEL et al., 2012, VENKATESWARLU et al., 2013; DEEM et al., 2016). Em adição é importante realizar um aporte de matéria vegetal capaz de manter o solo coberto e realizar o mínimo de revolvimento (perturbação) do solo (VENKATESWARLU et al., 2013; CALLEGARI, 2014).

De forma geral a rotação de culturas incrementa o funcionamento e qualidade de vários setores da planta, além dele mesmo, vários setores ao mesmo tempo, gerando aumento da matéria orgânica e da estruturação do solo, principalmente através da formação e manutenção de agregados no ambiente (FRANCHINI et al., 2011; VENKATESWARLU et al., 2013; SHAG et al., 2021). O estoque de C também é afetado positivamente pela rotação de culturas devido a inserção de materiais de diversas origens e taxas de decomposição (LAL, 2015). O comportamento dos nutrientes também sofre alterações, ocorrendo o aumento da disponibilidade de nutrientes para as culturas, mesmo os mais complexos como o fósforo (DEEN et al., 2016). Além disso, a rotação também afeta o processo de complexação (captura) de elementos tóxicos uma vez que essa ocorre junto a matéria orgânica, e leva de forma geral a algumas mudanças na capacidade de troca de cátions e ânions do solo (CTC/CTA) (CARTTALAN et al., 1997; UNGER; BLANCO-CANQUI, 2012; RINCON-FLOREZ et al., 2016; PIAZZA et al., 2020). Vários autores relatam a promoção de diversos índices da fauna do solo no sistema rotacionado de culturas em relação aos sistemas baseados em monocultura (DEEN et al., 2016; BALOTA, 2017) ao longo do tempo. Estudos de longo prazo são essenciais para avaliar os efeitos da rotação de culturas sob SPD nos processos biológicos do solo (BALOTA et al., 2014a; BALOTA, 2017; PIAZZA et al., 2020).

4.1.1 Adubos Verdes

Os adubos verdes são culturas de diversos grupos vegetais cultivadas com o objetivo de promover melhorias nas qualidades físicas, químicas e biológicas do solo. Não há interesse direto na produção comercial de suas partes, mas sim a proteção e recuperação do sistema ambiental, além de promoção da fertilidade do solo e condições socioeconômicas da produção agrícola (STONE, 2010; CONCEIÇÃO et al., 2021). Os adubos verdes promovem a inserção de matéria orgânica no solo trazendo

benefícios a mesma sem que haja retirada (extração) de nutrientes como em uma cultura produtiva (CALLEGARI, 2014; ZENG et al., 2016; CONCEIÇÃO et al., 2021). A adubação verde gera benefícios físicos ao solo uma vez que em momentos de lacuna de produção reduz os problemas de erosão, e promove a descompactação do solo pela ocupação de sistema radicular diferenciado e o aumento na retenção de água (STONE, 2010; CONCEIÇÃO et al., 2021).

Os benefícios nos atributos químicos do solo através da utilização da adubação verde não se restringem apenas a matéria orgânica. A adubação verde ainda insere N no ambiente após a decomposição dos tecidos da leguminosa utilizada e a recuperação de nutrientes em camadas profundas do solo ao se utilizar determinadas adubos verdes (STONE, 2010; CONCEIÇÃO et al., 2021). Os adubos verdes também modificam o ambiente produtivo como um todo, não apenas o solo, levando a mudanças na ocupação de plantas daninhas no sistema, alterações e quebras de ciclo de pragas e doenças, além de aumentar o número de insetos benéficos ao ambiente (STONE, 2010; CALLEGARI, 2014).

Os adubos verdes auxiliam na introdução de nutrientes no ambiente do solo e também na dinâmica e recuperação de nutrientes, não apenas o N introduzindo através da fixação biológica de N, mas também promovendo a aceleração do processo de ciclagem de nutrientes. Os adubos verdes atuam na busca com seus sistemas radiculares para obtenção de nutrientes antes imobilizados ou inacessíveis (profundidade), trabalhando por meio de relações microbianas junto as suas raízes para descomplexar nutrientes e também atuação fisiológica da planta pela busca de nutrientes, os quais em todos os exemplos temos os nutrientes sendo recolocados no ciclo da fertilidade do ambiente de produção (CONCEIÇÃO et al., 2021).

Pesquisas com utilização de adubos verdes em sistema de produção (rotações de cultura) envolvendo atividade microbiana do solo que demonstraram que rotações de cultura com a utilização de adubos verdes incrementam a atividade microbiana, tanto de enzimas como a fosfatase ácida e B-glucosidase como a respiração basal do solo (RBS) e C da biomassa microbiana (CBM) a longo prazo (BALOTA et al. 2014, 2017).

Os benefícios são maximizados (em sua totalidade) quando se utiliza a mistura de espécies como adubos verdes (CALLEGARI, 2014), os conhecidos consórcios de espécies que combinam plantas de acordo com as necessidades e os planos do ambiente de produção. Combinações de leguminosas e gramíneas são os adubos

verdes mais comuns, inserindo massa verde em quantidade e N no ambiente de produção (STONE, 2010; CONCEIÇÃO et al., 2021).

A utilização de consorcio de espécies de adubos verdes promove benefícios simultâneos de diferentes espécies de adubos verdes e o sinergismo destas relações entre espécies no ambiente de produção, acelerando processos benéficos no solo e no ambiente. Um consorcio de espécies bem planejados levam a vantagens de gerar uma equilibrada liberação de nutrientes e relação C/N no ambiente, além de promover diversidade de raízes, incremento de nutrientes no sistema, dentre outras vantagens (STONE, 2010; CALLEGARI, 2014; CONCEIÇÃO et al., 2021).

Os adubos verdes promovem diversas melhorias ao ambiente de produção, contudo não geram benefícios financeiros ao produtor, e dificultam o plantio uma vez que algumas espécies são difíceis de serem obtidas e há pouco conhecimento de uso e manejo das mesmas a campo (STONE, 2010; DEEN et al., 2016; CONCEIÇÃO et al., 2021). Diante disso, são necessários estudos para dimensionar o uso da adubação verde de modo a trazer benefícios ambientais, financeiros e na produção.

4.2 MATÉRIA ORGÂNICA E CICLAGEM DE NUTRIENTES NO SOLO

A MOS composta principalmente pelos restos das plantas acima do solo em diferentes estágios de decomposição mediada em boa parte pelos organismos do solo de diferentes origens, dentre eles os microrganismos do solo, sendo que esta biomassa microbiana decompositora destes restos perfaz 1 a 5% da sua composição e compõe a parte viva desta. A matéria orgânica promove ao solo inúmeros benefícios do ponto de vista físico, químico e biológico. Em relação ao condicionamento físico do solo, atua na agregação e cor do solo, influencia na porosidade e retenção de água do solo (NOVOTNY; MARTIN NETO, 2008; TONY et al. 2015) e está relacionada aos processos de formação do solo.

Do ponto de vista químico a matéria orgânica atua como uma argila, promovendo diversas atividades químicas do solo (trocas, oclusões, dentre outras), além de promover liberações de nutrientes durante seu processo de quebra/decomposição (ciclagem de nutrientes) (SILVA; MENDONÇA, 2007; DICK et al., 2009). A matéria orgânica também possibilita alterações de acidez ativa e elementos do solo, possibilitando mudanças devido aos seus grupos químicos, como

por exemplo captura de elementos químicos (inclusive tóxicos) e mudanças nos equilíbrios químicos (BALDOCK; BROOS, 2012).

Por fim do ponto de vista biológico a matéria orgânica é um combustível para o solo, sendo através dela que a biota e microbiota do solo sobrevive e assim pode promover todos os benefícios já conhecidos parte biológica do solo, como agregação do solo, ciclos biogeoquímicos dos solos, dentre outros (GAMA-RODRIGUES; GAMA-RODRIGUES, 2008; MURPHY, 2014). A quantidade e a qualidade da MOS influenciam no comportamento e diversidade da microbiota do solo. Os materiais vegetais aportados podem alterar não apenas a população de um microrganismo, mas também dos demais componentes deste (vizinhos) dentre eles as raízes das plantas e os macrorganismos (SINGH; RENGEL, 2007; CODRON et al., 2010; CONCEIÇÃO et al., 2021)

A biota do solo tem grande importância para a ciclagem de nutrientes junto a MOS (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006; BALDOCK, 2007). Assim de acordo com a qualidade e quantidade de matéria vegetal (alimento) e de acordo com o ambiente, a parte viva do solo irá atuar na liberação desses nutrientes (GAMA-RODRIGUES e GAMA-RODRIGUES, 2008; BALDOCK; BROOS, 2012) sendo estes nutrientes liberados após a morte da microbiota degradadora e passíveis de uso pela própria microbiota do solo e principalmente pela cobertura vegetal sobre este solo para se desenvolverem.

Diversos são os fatores que influenciam a ciclagem de nutrientes: temperatura, umidade, condições químicas do solo, como acidez, assim como condições físicas do solo como a compactação, inundação, dentre outros (BAYER; MIELNICZUKL, 2008; BALDOCK; BROOS, 2012). A qualidade, quantidade e distribuição da matéria orgânica no ambiente são fatores de peso na dinâmica dos nutrientes. A relação C/N e C/P, e a quantidade de outros constituintes (proteínas, composição das estruturas de C, dentre outros) determinaram o tempo de decomposição do material e recalcitrância deste no sistema (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006; SINGH; RENGEL, 2007; CAMARGO et al., 2008; VENKATESWARLU et al., 2013).

A distribuição e quantidade da matéria orgânica no perfil do solo promovem mudanças na velocidade de degradação da matéria orgânica (BAYER; MIELNICZUKL, 2008). A distribuição pelo perfil, principalmente através de manejos de solo, acelera o processo de degradação e o SPD, em contraponto, gera aumento na superfície do solo (SINGH; RENGEL, 2007; VENKATESWARLU et al., 2013).

As formas como os cultivos são manejados causam uma rápida perda de matéria orgânica, levando a baixa atividade biológica do solo, um declínio na estabilidade do agregado e uma redução na produtividade das culturas (BAYER e MIELNICZUKL, 2008; BALDOCK; BROOS, 2012). Além disso, o sequestro de C no solo pode ser ampliado com algumas práticas de lavoura, como o aporte contínuo de matéria orgânica (MURPHY, 2014), ou o contrário, onde práticas não conservacionistas promovem problemas ligados a aquecimento global com a liberação de vastas quantidades de C antes sequestrados no ambiente agrícola de produção.

A qualidade da MOS normalmente muda muito lentamente, portanto muitos anos (5-10 anos) são necessários para detetar mudanças resultantes de perturbação. A extensão do volume de MOS é controlada principalmente pela abundância e pela atividade de microrganismos, que pode responder à perturbação em escalas de tempo mais curtas (meses). Por esta razão, os parâmetros biológicos e bioquímicos do solo são considerados indicadores precoces e sensíveis ao estresse ecológico e à restauração do solo (BOLINDER et. al., 1999; ROLDAN et al., 2003; SÁ et. al., 2013; GESSIELER; SCOW, 2014; MENDES et al., 2015; BALOTA, 2017).

Dentre os indicadores microbiológicos do solo mais utilizados relacionados a ciclagem de nutrientes no ambiente de produção agrícola destacam-se a atividade das enzimas do solo, o CBM e NBM, a RBS, a macrofauna do solo e as técnicas moleculares de identificação dos microrganismos (SIQUEIRA; MOREIRA, 2006; USDA, 2015; BALOTA, 2017; FUHRMANN; ZUBERER, 2021; TATE, 2021). A microbiota apresenta-se no solo como um reservatório de nutrientes e com grande suscetibilidade a mudanças do ambiente e alterações de fatores mesmo que pouco representativos no solo, sendo que ao afetar uma comunidade microbiana com uma mudança, todas as demais podem ter decréscimos ou acréscimos (BALOTA, 2017).

4.3 INDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO E A CICLAGEM DE NUTRIENTES

Para avaliar a qualidade do solo diversos indicadores físicos, químicos e biológicos do solo, foram determinados (DORAN; PARKIN, 1994). Os indicadores em geral devem ser sensíveis o bastante para verificar a água no solo, o desenvolvimento da planta, a degradação do solo, a compartimentalização, o fluxo de elementos químicos no solo e por fim o habitat do solo (VEZZANI; MIELNICZUK, 2009; SILVA et

al., 2021). Dentre os indicadores físicos destacam-se a densidade do solo e infiltração, dentre os químicos, destacam-se a acidez ativa, condutividade elétrica, e teor de matéria orgânica e por fim, dentre os biológicos destacam-se, a RBS, e o CBM e a NBM (DORAN; PARKIN, 1994).

Os indicadores físicos de qualidade do solo estão segundo Aguiar (2008) intimamente relacionados com a estrutura do solo, sendo que estes indicadores demonstram razoável precisão alterações nos manejos do solo. Os métodos são baratos e de fácil mensuração, indicando com certa rapidez os efeitos no sistema de produção.

Os indicadores químicos de qualidade do solo são mais dependentes do tempo e da condução do sistema de produção das culturas e requerem cuidado pois os mesmos têm grande variação a depender do manejo aplicado (MILINDRO et al., 2016).

Os indicadores biológicos do solo englobam análises da macro e meso fauna de animais do solo e também da microbiota do solo (ARAUJO; MONTEIRO, 2007), sendo o último, atualmente, o foco principal de estudos de qualidade do solo. Os indicadores microbiológicos do solo são mais sensíveis as mudanças de manejos do que os indicadores químicos e físicos (MOREIRA ; SIQUEIRA, 2006; ARAUJO; MONTEIRO, 2007; TATE, 2021).

4.3.1 Indicadores Microbiológicos de Qualidade do Solo

As mudanças de manejo nos sistemas de produção agrícola alteram diversos elementos do solo, como nutrientes, oxigênio, água, matéria orgânica, dentre outros. Estas mudanças levam a alterações nos padrões de vida da microbiota do solo alterando sua população, organização e atividade.

4.3.1.1. Atividade enzimática do solo

As enzimas são a parte vital do metabolismo da microbiota do solo, estando intimamente ligadas as atividades, ações e o comportamento de seus geradores. Uma vez que são participantes diretas da ciclagem de nutrientes, sua atividade tem sido utilizada como indicador da dinâmica da biota do solo e tem mostrado correlação com muitos fatores que influenciam o solo. A atividade das enzimas do solo responde

rapidamente aos fatores ambientais e pode ser avaliada utilizando metodologias consideravelmente baratas (ARAÚJO; MONTEIRO, 2007; BOWLES et al., 2014; MENDES et al., 2015; BALOTA, 2017). Embora a maioria das enzimas do solo provenham de microrganismos, as raízes das plantas são uma importante fonte de enzimas extracelulares no solo.

Na relação íntima entre a planta e o microrganismo há trocas constantes de substâncias. Essa interação estimula a planta a secretar enzimas e exsudados e a microbiota do solo, a secretar enzimas (NIELSEN; WINDING, 2002; MARSCHNER, 2007; SLAUGHTER et al., 2021). O cultivo e a forma como manejamos o ambiente afetam as propriedades/atividades microbiológicas e bioquímicas do solo, afetando diretamente a atividade das enzimas do solo (ACOSTA-MARTINEZ; TABATABAI, 2001; KUMAR; VARMA, 2011; BALOTA, 2017). O cultivo influencia o nível dos nutrientes no solo e a disponibilidade destes, bem como a distribuição da matéria orgânica no perfil do solo (KANDELER et al., 1999; SINGH; RENGEL, 2007; ZHAO et al., 2015), o conteúdo de água e oxigênio (CURCI et al., 1997; UNGER; BLANCO-CANQUI, 2012), além de inúmeros outros parâmetros do solo diretamente relacionados a microbiota do solo a influenciando.

Dentre as enzimas secretadas pelas plantas e pela microbiota do solo, a Arilsulfatase, B-glucosidase, fosfatase ácida, urease e as hidrolases gerais do solo que clivam o diacetato fluoresceína são as mais utilizadas para mensuração de comportamento de manejos e mudanças ambientais no solo (ARAÚJO; MONTEIRO, 2007; USDA, 2010; SHI, 2010; BALOTA, 2017).

A enzima fosfatase ácida é uma das várias enzimas do grupo das fosfatases monoesterases que catalisam a hidrólise do fosfato ésteres (HPO_4^{2-}). São enzimas com relativa amplitude de ação no ambiente, sendo assim capazes de atuar em diferentes substratos estruturalmente relacionados a fosfato, mas com taxas de ação variáveis (ALEF; NANNIPIERI, 1995; DICK et al., 1996; DENG, 2021). As fosfatases recebem denominação de acordo com o pH que atuam (ácidas ou básicas) (DICK et al., 1996; ACOSTA-MARTINEZ; TABAITABAI, 2011; DENG, 2021). Do grupo das fosfomonoesterases, a fosfatase ácida é a mais utilizada em pesquisas (TABAITABAI, 1994; ALEF; NANNIPIERI, 1995) e é a enzima produzida pelos principais grupos de microrganismos do solo, incluindo bactérias e fungos (ACOSTA-MARTINEZ; TABAITABAI, 2011). Repetidas adubações com fosforo, inibem a sua atividade (TABAITABAI, 1994; DICK et al., 1996). A determinação da sua atividade em

laboratório é feita utilizando p-nitrofenil-fosfato-disódio como substrato e quantificando-se por colorimetria o p-nitrofenol resultante (DICK et al., 1996; DENG, 2021).

A quebra de polímeros de glicose é mediada por enzimas provenientes de microrganismos, animais e plantas. A B-glucosidase, uma das enzimas mais predominantes em solos, catalisa a hidrólise do dissacarídeo alfa-D-glucopiranosídeo gerando resíduos de glicose (TABAITABAI, 1994; ALEF; NANNIPIERI, 1995; DENG; POPOVA, 2011; TATE, 2021). A determinação da sua atividade em laboratório é feita utilizando p-nitrofenil-B-D-glucosídeo como substrato e quantificando-se por colorimetria o p-nitrofenol (DICK et al., 1996).

As sulfatases catalisam a hidrólise de ésteres orgânicos de sulfato e são classificadas de acordo com o tipo de éster que quebram. Dentro do grupo das sulfatases, são incluídas as arilsulfatases, alcalinosulfatases, glucosulfatases, dentre outras (TABAITABAI, 1994; KLOSE et al., 2011), as quais são produzidas por fungos ou bactérias (ALEF; NANNIPIERI, 1995; DICK et al., 1996; KLOSE et al., 2011). A arilsulfatase é responsável pela grande maioria das quebras de estruturas de enxofre no solo, gerando sulfatos (SO_4^{2-}), produto prontamente utilizável pelas plantas e microrganismos para sua nutrição (TABAITABAI, 1994; DICK et al., 1996; GUPTA; GERMIDA, 2021). A atividade da arilsulfatase diminuiu com profundidade do solo e é influenciada pelo teor de C orgânico do solo (COT), e pela total capacidade de troca de N e cátion (ALEF; NANNIPIERI, 1995; KLOSE et al., 2011; TATE, 2021). A determinação da sua atividade em laboratório é feita utilizando p-nitrofenil-B-D-sulfato de potássio como substrato e quantificando-se por colorimetria o p-nitrofenol (DICK et al., 1996).

A hidrolase do diacetato fluoresceína (FDA) tem potencial de demonstrar a atividade enzimática do solo e os efeitos de diferentes mudanças, quaisquer que sejam (DICK et al., 1996). O fato se deve ao substrato diacetato de fluoresceína ser quebrado por diversas enzimas como proteases, lipases, esterases etc. Soma-se o fato de ter sido relacionada com ações de bactérias, fungos, decompositores, protozoários, inclusive algumas plantas (DICK et al., 1996; PROSSER et al., 2011). O ferro e o alumínio são fatores de interferência no processo (PROSSER et al., 2011). A determinação da sua atividade é feita em laboratório utilizando a diacetato de fluoresceína como substrato. O substrato utilizado tem características apolares o que facilita o transito deste através da membrana plasmática das células chegando ao seu

interior. O substrato ao ser metabolizado deixa as células e o ambiente ao redor destas fluorescente (DICK et al., 1996; PROSSER et al., 2011). A atividade enzimática é medida por espectrofotometria, usando uma curva de diacetato de fluoresceína estabilizadas bioquimicamente, como padrão (DICK et al., 1996).

A urease é a enzima que catalisa a hidrólise da ureia em CO_2 e NH_3 , sendo amplamente distribuída na natureza e já foi detectada em microrganismos, plantas e animais (DICK et al., 1996; PROSSER et al., 2011). O método proposto por Tabatabai (1994) é baseado na quantificação de amônio (NH_4^+) liberado durante o ensaio, o qual é quantificado por colorimetria. Este método demonstrou ser aplicável a solos que fixam NH_4 , embora a atividade da urease possa ser confundida quando há aplicação de fertilizantes contendo NH_4 (DICK et al., 1996; PROSSER et al., 2011). Apesar disso, é possível separar o efeito de solos corrigidos com resíduos vegetais, fertilizantes nitrogenados ou esterco animal (MYROLD, 2021). A urease pode interagir com a matéria orgânica e as argilas presentes no solo, principalmente as com carga, sendo que as mesmas podem manter sua atividade sem perder sua função, conservadas nesse ambiente, levando à necessidade de uma análise criteriosa do ambiente amostrado, uma vez que podendo haver mudanças em poucos metros de distância. A enzima por se encontrar quase sempre associada com as argilas demonstrar que seus principais produtores são bactérias devido ao tamanho e localização das enzimas junto as estruturas inorgânicas das argilas (KANDELER, et al., 2011).

A atividade da urease é utilizada para prever mineralizações de N no solo e no perfil (profundidade), e para avaliar o efeito da inserção de matéria orgânica em geral proveniente do esterco bovino, lodo de esgoto dentre outros resíduos (KLOSE; TABATABAI, 2000). Não apenas a urease mas todas as enzimas ligadas ao ciclo do N podem ter sua atividade afetada pelas mudanças climáticas (sazonais ou globais), pela aplicação de defensivos, pela adição de fontes de N (ureia, principalmente) e por fim pelo pH (HASAN, 2000; PACHECO; COLLA, 2019).

De forma geral, a atividade de todas as enzimas citadas é afetada por elementos do ambiente. Temperaturas abaixo de 10°C e acima de 35°C limitam a atividade enzimática (DICK et al., 1996; HAIDER; SCHAFFER, 2009) porém Tabatabai (1994) relata que o intervalo de ação das enzimas do solo é de 10°C a 50°C .

A umidade excessiva nos solos também é relatada por Tabatabai (1994) e Haider e Schaffer (2009) como limitante para as atividades enzimáticas no solo. O pH

do solo (equilíbrio de H^+) é outro grande elemento de interação no solo, sendo que há enzimas que não apresentam atividade em ambiente ácido ou alcalino (TABAITABAI, 1994; DICK et al., 1996) ou tem a mesma reduzida ou aumentada nessas condições. As enzimas ligadas ao ciclo do C, como as B-glucosidases, por exemplo, tem sua atividade reduzida em pH abaixo de 3 (DENG; POPOVA, 2011).

Os metais pesados como o alumínio e alguns nutrientes do solo, como ferro, cobre, manganês, magnésio e boro são relatados como sendo responsáveis por formação de cofatores inativadores da ação da enzima ou criação de desequilíbrios eletroquímicos, defavoráveis a ação das enzimas do solo (TABAITABAI, 1994; DICK et al., 1996; DENG; POPOVA, 2011). Desta forma solos com problemas de contaminação ambiental ou mesmo excesso de alguns nutrientes (toxidez) ou acidez podem vir a gerar um ambiente desfavorável a atuação das enzimas no solo.

Normalmente, a atividade enzimática da camada superficial de um solo sem cobertura vegetal é maior do que a da mesma camada em solos cultivados, por um período de tempo até que as fontes de C se esgotem, decaindo após. A atividade também é reduzida em profundidade, já que há menor oxigenação e inserção de matéria orgânica em solos mais profundos (BANDICK; DICK, 1999). A matéria orgânica é mais bem distribuída no perfil de solos sob cultivo convencional comparado aos solos com plantio com reduzido revolvimento. Dessa forma, no cultivo convencional as perdas de C para a atmosfera são aceleradas devido a maior exposição da matéria orgânica aos microrganismos e o momentâneo aumento dos indicadores microbiológicos do solo os quais decaem rapidamente com a redução da matéria orgânica no sistema (UNGER; BLANCO-CANQUI, 2012; LOEPPMANN et al., 2016).

A sequência de adubos verdes implementada também influencia positivamente a microbiota do solo do solo no sistema, sendo que sistemas de rotação de culturas, que ao longo do tempo proporcionam maior diversidade de plantas do que os sistemas de monocultura, proporcionando grande parte das vezes um efeito positivo nas atividades enzimáticas do solo (DICK, 1984; MBUTHIA et al., 2015; NIVELLE et al., 2016). Esse efeito segundo Mu-Chun et al. (2012) e Rincon-Florez et al. (2016) pode ser devido à estimulação de microrganismos na rizosfera e condições físicas melhoradas dos solos na rotação de culturas, respectivamente, onde ambos apontam à alta taxa entrada de matéria orgânica e também a diversidade desta depositadas no solo, particularmente quando as rotações contêm espécies de leguminosas, como

pontos centrais presentes na rotação de culturas. A monocultura por sua vez, causa diversos danos ao ambiente, principalmente pela constante deposição do mesmo padrão de matéria orgânica no solo.

O modelo de cultivo adotado é importante na atividade microbiana e bioquímica do solo uma vez que esse influencia diretamente a quantidade e a qualidade do material vegetal deixado a campo (RAO et al., 2014; MENDES et al., 2015). Além disso, é sabido que as culturas selecionam as bactérias e fungos do solo. Diante disso, a comunidade de microrganismos é alterada com a mudança das culturas (MARSCHNER, 2007; NEUMANN, 2007).

4.3.1.2 Biomassa microbiana do solo

Outro indicador do ambiente do solo é a biomassa microbiana e suas frações mensuráveis (C, N e P) (SIQUEIRA; MOREIRA, 2006; BALOTA, 2017). A biomassa microbiana do solo está entre os atributos biológicos com resultados mais significativos para o desenvolvimento de estudos em sistemas produtivos, promovendo ótimas respostas para demonstração da qualidade do ambiente e mudanças de manejo de solo, pois representa diretamente os ciclos do C, N e fósforo, tendo neste componente do solo mais um compartimento de reserva de nutrientes (a própria biomassa) a qual detém em sua composição nutrientes que são liberados após a sua morte (SOUZA et al., 2010).

A quantificação da biomassa microbiana tem se mostrado eficiente para detectar alterações no solo decorrentes do sistema de manejo que não foram identificadas pelos teores de matéria orgânica (MATSUOKA et al. 2003; LOPES et. al. 2013). A mudança da cobertura do solo (BOWLES; ACOSTA-MARTINEZ et al., 2014; MENDES et al., 2015; BRENNAN E ACOSTA-MARTINEZ et al., 2018), a aplicação de fertilizantes e corretivos (MBUTHIA et. al., 2015; CHEN et al., 2020), alterações físicas do solo (LI et al., 2018) e a poluição (FREY et al., 2006), induziram alterações na biomassa microbiana do solo.

Apesar da quantificação da biomassa microbiana permitir a compreensão do comportamento da ciclagem de nutrientes no solo, essa não permite indicar se há aumento ou diminuição da MOS com exatidão a qualquer tempo. Sendo assim, a comparação da biomassa microbiana com uma variável relativa, que demonstra mudanças ambientais de atividade em si desta biomassa, como a relação promovida

pelo quociente microbiano (qM), o qual fornece uma medida da quantidade de biomassa viva presente na MOS por estar associada a uma outra variável de mensuração da microbiologia do solo, a RBS (MATSUOKA, 2003).

O índice de quociente microbiano ou qM é obtido através da correlação de cálculos entre o CBM e o COT indicando qual é o percentual do C do solo equivalente ou referente a biomassa microbiana (SPARLING, 1992). Desta forma o quociente microbiano possibilita avaliar a quantidade de C imobilizado pela biomassa microbiana (SILVA, 2010), gerando inclusive um dado da qualidade nutricional da matéria orgânica por demonstrar ciclagem de nutrientes imediata realizada pela microbiota do solo (GAMA-RODRIGUES; GAMA-RODRIGUES, 2008).

Portanto, se a biomassa microbiana estiver sob qualquer condição de estresse a capacidade de utilização do COT fica diminuída, representando então diminuição do quociente medido no ambiente. Se houver alteração da condição de estresse para uma condição favorável haverá maior imobilização de CBM resultando em um aumento do índice do qM mesmo se os teores de COT permanecerem inalterados. Portanto, a obtenção de índices de CBM e qM são imprescindíveis para determinar a qualidade biológica do solo (ALVES, 2014).

4.3.1.3 Respiração basal do solo (RBS) e quociente metabólico (qCO₂)

Há formas indiretas de medição da biomassa microbiana, sendo a mais utilizado a avaliação da RBS, a qual mede a emissão de CO₂ por parte da biomassa microbiana (SIQUEIRA; MOREIRA, 2006). Bunemann et al. (2018) relatam que grande parte dos países utilizam a biomassa microbiana e a RBS como indicadores da qualidade do solo do ponto de vista biológico do solo, juntamente com algumas enzimas (fosfatase ácida e alcalina, arilsulfatase, B-glucosidase, dentre outras) a depender do país.

A avaliação da RBS se apresenta como um dos métodos mais simples de realização de análise da microbiologia do solo e um dos mais antigos aplicados para a área. Contudo esta metodologia gera resultados distorcidos quando há alta quantidade de matéria orgânica presente (SIQUEIRA; MOREIRA, 2006; QIN et al., 2010), apesar de não haver uma porcentagem de C no solo considerada inadequada a sua realização. Apesar dessa ressalva, o método é muito acessível e sensível a variações nas culturas (QIN et al., 2010; BORASE et al., 2020), no conteúdo de

matéria orgânica em profundidade (MBUTHIA et al., 2015; LOEPPMANN et al., 2016) e no sistema de cultivo (NUNES et al., 2018). Stone (2010) considera a RBS o indicador microbiológico do solo mais responsivo às mudanças das plantas de cobertura usadas na adubação verde.

Altas taxas de RBS representam alta decomposição dos componentes orgânicos do solo e disponibilidade de nutrientes. Entretanto, altas taxas de RBS também podem indicar decomposição da matéria orgânica estável no solo, e consequente alteração nos processos de agregação, capacidade de troca de cátions e capacidade de retenção de água, entre outros (RESCK et al., 2009). Desta forma, para avaliação da atividade metabólica dos microrganismos do solo utilizando a RBS é importante observá-la associada a outros indicadores, como o quociente metabólico que mede a taxa de RBS por unidade de biomassa microbiana (MATSUOKA, 2003).

O quociente metabólico é considerado um indicador de estresse microbiano, onde o baixo índice deste reflete um ambiente mais estável e valores elevados representam ecossistemas submetidos às situações de estresse. Castillo e Joergensen (2001) compararam solos sob cultivo convencional e direto (sem revolvimento), utilizando fertilizantes orgânicos e rotação de culturas com coberturas de solo, obtivendo um índice de qCO_2 maior no cultivo convencional e redução de qCO_2 no cultivo ecológico. Contudo é preciso lembrar que apenas de 15 a 30% da biomassa microbiana do solo é metabolicamente ativa, sendo que a interpretação dos dados de qCO_2 pode causar interpretações equivocadas pois esse índice representa a atividade microbiana em relação a todo o C presente na biomassa microbiana (MATSUOKA, 2006).

Estudos a partir de experiências de campo a longo prazo mostraram que rotações de culturas com entradas de C mais elevadas induzem o incremento da biomassa microbiana e as taxas de RBS (FRIEDEL et al., 1996; BUNNEMANN et al., 2018).

Balota et al. (2014) observou com a mudança de uso do solo, diferentes adubos verdes, em um sistema de rotações de cultura alterações na biomassa microbiana do solo (C e N) e RBS o, além de outros índices gerais que indicam comportamento da biomassa microbiana do solo, como polissacarídeos, relacionando estes índices a C o solo e relação C/N das culturas. Varela et al. (2014) também observaram mudanças na biomassa microbiana, principalmente com o aumento da cobertura do solo devido a diferentes manejos de cobertura em SPD.

As análises químicas e físicas do solo associadas a análise de enzimas do solo, biomassa microbiana e RBS permitem avaliar o solo de forma múltipla e integrada, e assim estabelecer práticas de manejo que visem a preservação do ambiente e a manutenção da produção agrícola (LOPES et al., 2013; MENDES et al., 2015).

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DO EXPERIMENTO

O presente estudo foi realizado em experimento implantado em 2017 na Estação Experimental do Polo Regional de Pesquisa do IDR-Paraná, em Ponta Grossa, Paraná, Brasil (Figura 1), cujas coordenadas geográficas são 25° 09' 38" S de latitude e 50° 09' 23" O de longitude, com altitude aproximada de 835m em relação ao nível do mar.

O experimento situa-se na região dos Campos Gerais no Paraná, cuja composição florística predominante são campos nativos com a presença de arbustos, com predomínio de gramíneas e capoeiras, entremeados por capões da Floresta Ombrófila Mista Estacional Semi-Decidual, ocupando as partes mais baixas da paisagem e a mata ciliar.

O clima da região, de acordo com a classificação de Köppen, é do tipo Cfb, temperado úmido mesotérmico, com temperatura média anual de 18°C e pluviosidade média de 1500 mm ano⁻¹ (IDR-Paraná, 2022). Os índices pluviométricos ocorridos no período do experimento se encontram no Anexo A.

O solo da área experimental é classificado como um Latossolo Vermelho distrófico, textura argilosa, situado em relevo suave ondulado, com declividade de 3%, com presença de terraciamento de base larga (curva em nível) para contenção de erosão inclusive entre blocos.

5.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS

O delineamento experimental utilizado foi em blocos ao acaso, com seis tratamentos e quatro repetições (Tabela 1). Os seis tratamentos consistiram de uma sucessão de culturas (testemunha) e cinco rotações de culturas, propostas para ciclos de 3 anos e conduzidas sob plantio direto (Quadro 1). As parcelas tinham dimensão de 10m de largura x 30m de comprimento (300 m²), espaçadas entre si por 8m no comprimento para facilitar a manobra das máquinas e 2m na largura (croqui no Anexo II). Cada parcela apresentou uma bordadura de 2m em seu entorno, sem corredores internos, sendo que o experimento todo apresentava 16728m².

Figura 1 – Imagem aérea do experimento situado na Estação Experimental do Polo Regional de Pesquisa do IDR - Paraná em Ponta Grossa, PR.



Fonte: Google Maps (2019).

*Em vermelho está destacada a área do experimento e na parte superior da imagem pode-se observar área de floresta onde as amostras referência foram retiradas.

O experimento foi concebido para ser um estudo de longo prazo onde as rotações de culturas foram planejadas desde o primeiro ciclo para um período de três anos. Ao final de cada ciclo de 3 anos, as rotações de culturas poderão ser redefinidas de acordo com a avaliação dos resultados e demandas regionais emergentes ou ainda para uma melhor acomodação operacional, visando um experimento de longa duração com resultados que tragam soluções para os agricultores. O primeiro ciclo de rotações de culturas abrangeu o período de 2017/18 a 2019/20 e um novo ciclo iniciou-se no inverno de 2019 e deve se estender até o verão de 2022/23 (Quadro 1). Neste experimento foram feitos pequenos ajustes nas rotações de culturas para o segundo ciclo de três anos, visando principalmente melhor fluxo operacional, mas sem alterar a proposta de cada tratamento a ser explicado mais afrente.

Para o presente estudo foram considerados os principais sistemas de produção de grãos utilizados na região dos Campos Gerais, geralmente caracterizados por sucessões de culturas ou rotações com pouca diversidade de espécies, e foram propostas outras rotações de culturas com maior diversidade de espécies, associando espécies de interesse econômico com adubos verdes em cultivo solteiro ou consorciado.

Quadro 1 - Tratamentos compostos por uma sucessão e cinco rotações de culturas para o primeiro e segundo ciclo de três anos proposto no experimento (as cores informam os períodos avaliados):

Ciclos	1						2					
ROTAÇÕES	ANO 1 – 2017/2018		ANO 2 – 2018/2019		ANO 3 – 2019/20		ANO 1 – 2020/2021		ANO 2 – 2021/2022		ANO 3 – 2022/2023	
	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão
Rotação I (Testemunha/ Sucessão)	Trigo	Soja	Trigo	Soja	Trigo	Soja	Trigo	Soja	Trigo	Soja	Trigo	Soja
Rotação II (Produtor)	Aveia preta	Milho	Trigo	Soja	Trigo	Soja	Aveia Preta	Milho	Trigo	Soja	Trigo	Soja
Rotação III (Grãos)	Canola	Milho	Trigo	Soja	Cevada	Soja	Canola	Milho	Trigo	Soja	Cevada	Soja
Rotação IV (Grãos/Fitomassa)	Aveia branca	Feijão/ Trigo Mourisco	Tremoço azul	Milho	Triticale	Soja	Tremoço + Ervilhaca	Milho	Aveia Branca	Feijão / Trigo mourisco	Triticale	Soja
Rotação V (Forrageiras Inverno)	Aveia + Azevêm	Milho	Aveia + Azevêm	Milho	Aveia + Azevêm	Soja	Ervilha + Centeio + Nabo	Milho	Trigo	Feijão / Trigo Mourisco	Trigo	Soja
Rotação VI (Fitomassa Inverno)	Aveia Preta + Ervilhaca + Nabo	Milho	Aveia Preta + Ervilhaca + Centeio	Feijão/ Trigo Mourisco	Triticale + Aveia + Centeio	Soja	Aveia preta + Ervilhaca + Nabo	Milho	Triticale + Centeio +Ervilha forrageira	Feijão/ Trigo mourisco	Triticale, Aveia, Centeio	Soja

Fonte: Projeto Sistemas de Produção e Rotação de Culturas em Plantio Direto na Região Centro Sul do Paraná – Dra Lutécia Canalli.

Tabela 1 – Sequência aleatória das parcelas (repetições) no experimento de Rotações de Culturas.

TRATAMENTOS	BLOCO 1	BLOCO 2	BLOCO 3	BLOCO 4
Rotação I (Testemunha/Sucessão)	4	9	13	24
Rotação II	2	11	17	22
Rotação III	1	12	18	21
Rotação IV	6	10	15	23
Rotação V	5	8	16	20
Rotação VI	3	7	14	19

Fonte: Projeto Sistemas de Produção e Rotação de Culturas em Plantio Direto na Região Centro Sul do Paraná – Dra Lutécia Canalli

Os tratamentos consistiram de uma sucessão de culturas (testemunha ou ausência de rotação) e cinco rotações de culturas sob plantio direto, em ciclos de três anos, conforme apresentado nas Tabelas 2 e 3. Os tratamentos foram: 1) Rotação I - consiste no cultivo de trigo (*Triticum aestivum*) no inverno e soja (*Glycine max*) no verão continuamente, o que caracteriza uma sucessão de culturas por não apresentar diversidade de espécies, sendo considerado como o tratamento testemunha. Este é o sistema de produção mais comum na região entre os produtores de grãos; 2) Rotação II - caracterizada pela inclusão de milho (*Zea mays*) a cada dois verões com soja, e antecedendo o milho, entra a aveia preta (*Avena strigosa*) para cobertura do solo no inverno ao invés do trigo. Esta rotação é utilizada pelos agricultores que já percebem a importância de incluir outras culturas no sistema de produção para buscar maior equilíbrio, porém ainda está longe de uma diversificação de culturas adequada; 3) Rotação III – da mesma forma que a rotação I, propõe culturas comerciais no inverno e no verão, porém de forma diversificada, sendo canola (*Brassica napus*) e milho, trigo e soja, cevada (*Hordeum vulgare*) e soja, canola e milho. Essa rotação foi proposta para promover benefícios ao solo através da diversidade de cultivos, sem comprometer o retorno econômico no inverno e no verão; 4) Rotação IV – aveia branca (*Avena sativa*) no inverno seguida por feijão (*Phaseolus vulgaris*) no verão e trigo mourisco (*Fagopyrum esculentum*) no verão/outono no primeiro ano, consórcio de tremoço azul (*Lupinus angustifolius*) + ervilhaca peluda (*Vicia villosa*) para cobertura do solo e fixação de nitrogênio (N) no segundo inverno, com o objetivo de favorecer a cultura do milho no verão, no terceiro ano, tritcale (*Tritico secale rimpau*) no inverno e soja no verão, e no quarto ano, tremoço branco (*Lupinus albus*) + ervilhaca peluda no inverno para potencializar o suprimento de N para o milho no verão, visando melhor produtividade deste. Esta rotação propõe diversificação de culturas associada ao uso

de adubos verdes nos intervalos entre cultivos comerciais, visando melhoria do solo associada ao retorno financeiro para o produtor; 5) Rotação V – caracterizada pelo cultivo das forrageiras aveia preta + azevém (*Lolium multiflorum*) nos invernos, e a sequência milho, milho e soja no verão até o terceiro ano, e no quarto ano foi cultivada a ervilhaca peluda antecedendo o milho, visando suprimento de N e melhor resultado produtivo para o milho. Esta rotação é muito utilizada por produtores que necessitam suprimento de forragem para o gado no inverno, o que também é comum na região por ser uma importante bacia leiteira. Neste estudo, o consórcio de forrageiras foi manejado para formar cobertura no solo; 6) Rotação VI – caracterizada pelo uso de consórcios de adubos verdes no inverno, sendo aveia preta + ervilhaca peluda + nabo forrageiro (*Raphanus sativus*) no inverno, milho no verão no primeiro ano, aveia preta + ervilhaca peluda + centeio (*Secale cereale*) no inverno, feijão no verão e Trigo mourisco no verão/outono no segundo ano, triticale + aveia preta + centeio no inverno e soja no verão no terceiro ano e, aveia preta + ervilhaca peluda no inverno e milho no verão no quarto ano. Esta rotação foi proposta para intensificar a produção de fitomassa, visando aumentar a matéria orgânica e melhorar os atributos do solo (químicos, físicos e biológicos), além de suprir N por meio da fixação biológica pelas Fabáceas e, proteger o solo por longo prazo, pela alta produção de fitomassa das Poáceas.

As culturas foram todas semeadas seguindo as recomendações regionais de zoneamento agrícola do MAPA (Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento), dentro da faixa ou períodos estipulados para cada cultura. O manejo das culturas (espaçamento, densidade de semeadura, época de plantio, adubação, controle de pragas, doenças e plantas daninhas) foram realizados de acordo com as recomendações técnicas do IAPAR e da EMBRAPA obtidas de diversas publicações destas instituições para cada cultura com base nas análises de solo anuais e necessidades da cultura para atender as produtividades esperadas.

Os adubos verdes foram semeados sem fertilização e não receberam tratamentos culturais, sendo manejados no período de floração plena com rolo faixa e/ou dessecantes e seus resíduos foram deixados na superfície do solo, visando formação de cobertura ao solo para o SPD.

5.3 METODOLOGIA DE AMOSTRAGEM

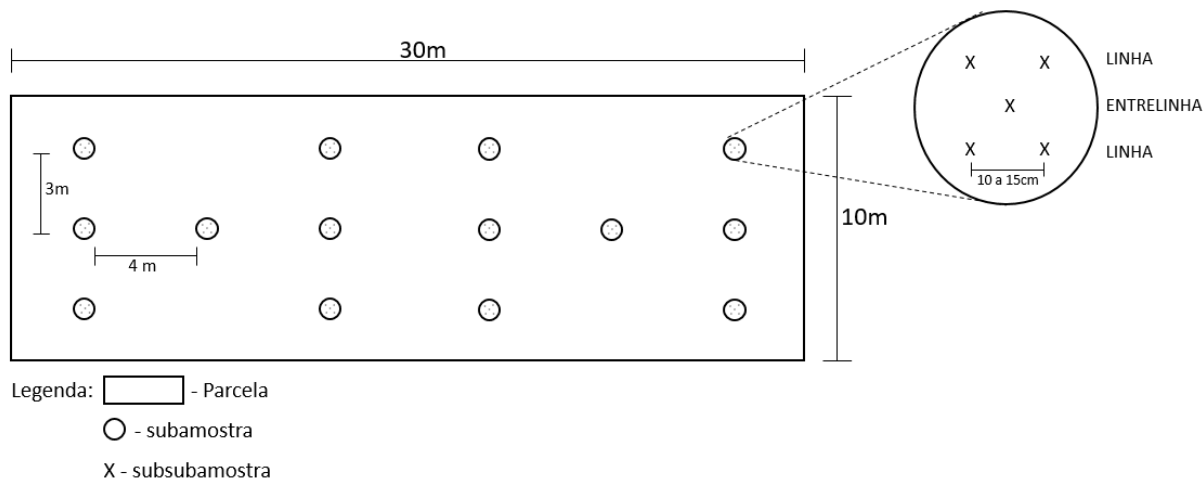
Antes do início do experimento, foram coletadas 4 amostras em cada bloco, para a análise química e física. Os resultados estão no Anexo III deste trabalho tabelas e organizados de acordo com o tipo de análise. Essas amostras também foram usadas para a determinação do C orgânico particulado (COP) ou lábil e o C associado aos minerais (COAM), sendo determinado o estoque de C no solo a partir do fracionamento da MOS. Os valores obtidos nestas coletas iniciais foram considerados o marco zero do experimento. A partir das análises químicas do solo e caracterização inicial da área quanto à fertilidade química, o solo foi corrigido com a realização de uma calagem com 3,5 ton tendo sido incorporado ao solo nesta fase inicial. O experimento teve início com as culturas propostas nas rotações semeadas no inverno de 2017 (primeiro ciclo).

Após a implantação do experimento as coletas de solo para todas as análises foram realizadas durante os cultivos de verão de 2018-19, 2019-20 e 2020-21, na fase de pleno florescimento das culturas, buscando observar os efeitos das sequências de culturas nos sistemas de rotações. As coletas foram realizadas para as culturas de soja, milho e no feijão do consórcio de verão, todas na mesma data visando homogeneidade ambiental.

As amostras de solo para as análises químicas de rotina, nitrato, amônia, C orgânico total (COT), estoque de C e das suas frações, atividade enzimática, o C da biomassa microbiana (CBM) e o N da biomassa microbiana (NBM), respiração basal do solo (RBS), quocientes microbiano e metabólico, foram coletadas na camada de 0 a 10 cm de profundidade. Foi coletada uma amostra composta por parcela do experimento (24 parcelas), gerando 24 amostras passíveis de análise numa área de 180m² excluindo-se a bordadura geral de 2m. Cada amostra composta foi gerada a partir de 14 sub-amostras distribuídas como se observa na Figura 2, e cada sub-amostra foi gerada a partir de 5 subsubamostras (Figura 2). As subsubamostras foram coletadas na entrelinha e linha da cultura, 10 a 15 cm distantes um ponto do outro, totalizando 70 subsubamostras, estando indicadas no desenho por meio da simbologia (X). Também foi amostrada área de mata nativa (referência) próxima ao local estudado (menos de 100 metros) na mesma profundidade descritas para as culturas em rotação, mas em sistema de quadruplicada de amostra com a mesma quantidade de sub-amostras em área pré-estabelecida, sendo está área foi mantida

em todas as coletas para a mata (marcação/delimitação). O local pode ser observado na Figura 1 acima do experimento.

Figura 2 – Organização da amostragem realizada no experimento para obter todas as amostras utilizada.



Fonte: O Autor

O solo das subsubamostras foi homogeneizado em baldes e logo após uma fração foi embalada em potes plásticos com tampa rosqueável (amostra composta). Os 24 potes foram acondicionados em caixas de isopor com gelo para o transporte ao laboratório. Depois os mesmos permaneceram em freezer modo geladeira com temperatura entre 3° a 8 °C com umidade de campo até que todas as análises propostas fossem realizadas. As análises de CBM e NBM, RBS, nitrato e amônia do solo foram realizadas imediatamente ou dentro do prazo de 10 dias após a coleta.

5.4 ANÁLISE ENZIMÁTICA DO SOLO

As atividades das seguintes enzimas foram determinadas: Arilsulfatase, B-Glucosidase, Fosfatase Ácida, Hidrolase do Diacetato (FDA), e Urease. As amostras de todas as parcelas foram analisadas simultaneamente e na impossibilidade de realizar o processamento completo, foram analisadas pelo menos todas as amostras de um bloco. Para a realização das análises enzimáticas, as amostras foram peneiradas a 2 mm e homogeneizadas novamente para retirada das alíquotas, sendo o solo rapidamente devolvido para a refrigeração posteriormente. Cabe salientar aqui que todas as análises foram feitas sem secagem da amostra, sendo preferido o método de solo resfriado.

A atividade da enzima arilsulfatase foi determinada de acordo com a metodologia descrita por Tabatabai e Bremmer (1970) IN: Alef e Nannipieri (1995), baseada na determinação do p-nitrofenol liberado após incubação de 1g da amostra de solo por 1 hora a 37°C em estufa com substrato p-nitrofenil sulfato de potássio e 4ml de tampão acetato. Após incubação foi adicionado na mistura 1ml de cloreto de cálcio e 4 ml de hidróxido de sódio, ambos a 0,5 molar. Após a mistura a amostra foi agitada rapidamente e filtrada em papel watman 1, sendo imediatamente realizada leitura no espectrofotômetro a 400 nm. As leituras das amostras passaram por cálculos em função da concentração de p-nitrofenol encontrado a partir de curva padrão gerada em diferentes concentrações (0 a 12 ppm).

A atividade da enzima B-glucosidade foi determinada de acordo com a metodologia descrita por Tabatabai (1982) adaptada por Eivazi e Tabatabai (1988) IN: Alef e Nannipieri (1995), tendo mesmo procedimento metodológico que a determinação da enzima arilsulfatase, alterando-se apenas o substrato de incubação, o qual foi usado p-nitrofenil B-glicosideo, a solução tampão a qual se utilizou a solução estoque MUB a pH 6,0 e 4 ml de tris-hidroxiaminometano no lugar do hidróxido de sódio na interrupção da incubação. Já a atividade da enzima fosfatase ácida foi determinada de acordo com a metodologia descrita por Tabatabai e Bremmer (1969) e adaptada por Eivazi e Tabatabai (1977), tendo mesmo procedimento metodológico que a determinação da enzima arilsulfatase, alterando-se apenas o substrato de incubação, o qual foi usado p-nitrofenil fosfato de sódio e a solução tampão, a qual se utilizou a solução MUB a pH 5,5.

A enzima FDA foi realizada de acordo com metodologia descrita por Dick et. al, (1996) IN: Doran et. al, (1996), baseada na reação do substrato da FDA pelas células microbianas de 5g de solo após incubação sob agitação de 20 minutos em solução tampão fosfato em temperatura ambiente. A incubação foi interrompida pela adição de 20 ml de acetona a solução, sendo logo após realizada centrifugação a 1807 RCF seguida de filtragem da solução em papel watman 1. A liberação de corante fluoresceína teve sua determinação através de espectrofotometria a 490 mn da solução filtrada. As leituras das amostras passaram por cálculos em função da concentração de diacetato de fluoresceína encontrado a partir de curva padrão gerada em diferentes concentrações (0 a 200 uL).

A atividade da enzima urease foi determinada de acordo com a metodologia descrita por Kandeler e Gerber (1988) IN: Alef e Nannipieri (1995) baseada na

determinação do N-NH₄ (N amoniacal) liberado após incubação de 5g da amostra de solo por 2 hora a 37°C em estufa previamente adicionado 2,5 ml ureia a 80 milimol (mM), 20 ml de solução tampão borato pH 10, sendo após o período de incubação de 2 horas adicionado 30 ml de KCl 2 M visando parada da reação. Após parada foi retirada uma alíquota de 1,5 ml a qual foi centrifugada a 9146 RCF. Após a centrifugação foi adicionado solução a base de dicloroisocianurico, nitroprussiato 0,1%, ácido salicílico a 5% e 6 ml de água destilada. A mistura ficou em repouso por 1 hora e em seguida foi realizada a leitura no espectrofotômetro a 690 nm. As leituras das amostras passaram por cálculos em função da concentração de N-NH₄ (N amoniacal) encontrado a partir de curva padrão produzida com NH₄SO₄ em diferentes concentrações (0 a 10 ppm) utilizando fatores propostos pelos autores acima citados.

5.5 DETERMINAÇÃO DO CARBONO E NITROGÊNIO DA BIOMASSA MICROBIANA DO SOLO, RESPIRAÇÃO BASAL DO SOLO, QUOCIENTE METABÓLICO E QUOCIENTE MICROBIANO.

A CBM e NBM do solo foram avaliados segundo Vance et al. (1987), usando a técnica de fumigação-extração. Vinte gramas de solo foram incubados a vácuo (em dissecador) com clorofórmio para lise dos microrganismos do solo (amostras fumigadas). Como branco amostral (controle), 20 gramas de solo não foram submetidas a fumigação. Em ambas as amostras (fumigada e não fumigada) foi adicionado 80 ml de sulfato de potássio 0,5 M, e em seguida foi realizada a agitação por 1 h a 250 rpm em mesa agitadora horizontal e centrifugação por 5 min a 537 RCF gerando extrato de solo onde foram determinados C e N.

Os extratos de solo obtidos foram digeridos em ácido sulfúrico (concentração) com ajuda de bloco digestor a 335°C. Após a digestão o nitrogênio foi determinado pelo método de espectrofotometria de azul salicílico (MIYAZAWA et al., 1992), da seguinte forma: 1,0 ml do extrato digerido fumigado ou não fumigado (ou solução padrão de amônio) foi adicionado a um tubo de ensaio de 30 ml, e posteriormente foi adicionado 6,0 mL de água deionizada, 1,0 mL da solução a (ácido salicílico 5%), 1,0 mL da solução b (nitroprussiato 0,1%) e 1,0 mL da solução c (hipoclorito de sódio 0,15%). Após 60 minutos, foi efetuada a leitura no espectrofotômetro a 680nm.

A determinação do CBM foi realizada segundo Walkley e Black (1934) modificado por Pavan et al. (1992). Nessa técnica, o C do solo é oxidado por uma

solução oxidante (dicromato de potássio) em meio ácido e a dosagem do C é feita posteriormente por meio da titulação do dicromato remanescente da oxidação utilizando uma solução de sulfato ferroso amoniacal em meio ácido, empregando-se como indicador difenilamina.

Os resultados de CBM e NBM serão expressos em μg de C g^{-1} e μg N g^{-1} de solo seco⁻¹ respectivamente.

A RBS foi determinada adaptando-se o método proposto por Jenkinson e Powlson (1976). O gás carbônico liberado a partir da RBS das amostras de solo (50g de cada) foi captado por hidróxido de sódio 1 M (10 ml) após um período de 7 dias de incubação em recipiente vedado. Depois desse período o hidróxido de sódio foi titulado com ácido clorídrico. Os resultados são expressos em mg C kg^{-1} de solo por hora.

O quociente metabólico ($q\text{CO}_2$) foi calculado segundo Anderson e Domsch (1993) a partir da razão entre a taxa de respiração microbiana ou respiração basal do solo (RBS) já corrigida para a liberação em 1 dia e a CBM como pode ser visto na formula abaixo (Equação 1). Os resultados estão expressos em mg de C- CO_2 mg Cmic^{-1} .

$$q\text{CO}_2 = \text{RM}/\text{CBM} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

$q\text{CO}_2$ = quociente metabólico (mg C- CO_2 mg Cmic^{-1});

RBS = respiração microbiana (mg C- CO_2 kg^{-1} h^{-1});

CBM = C da biomassa microbiana (mg C kg^{-1}).

O quociente microbiano ($q\text{M}$) foi calculado de acordo com Sparling (1992), a partir da razão entre o CBM e o C orgânico total (COT) como pode ser visto na fórmula abaixo (Equação 2). O resultado é expresso em %.

$$q\text{M} = (\text{CBM}/\text{COT})/10 \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

$q\text{M}$ = quociente microbiano (%);

CBM = C da biomassa microbiana (mg C kg^{-1});

COT = C orgânico total (g kg^{-1}).

5.6 ANÁLISE DE NITRATO E AMÔNIO NO SOLO

Uma alíquota de 2,5 gramas de solo foi colocado em tubo de centrifuga de 100 mL e posteriormente foram adicionados 25 ml de K_2SO_4 0,1 N + H_2SO_4 0,1 N. Após agitação por 1 horas a 250 rpm e os tubos foram centrifugados por 5 min a 537 RCF. Seguindo o método de determinação por espectrofotometria de azul salicílico (MIYAZAWA et al., 1992), duas porções de 1,0 ml de extrato (solução padrão de amônio ou branco) para 2 tubos de ensaio de 30 ml, onde foi adicionando em 1 deles apenas 0,1 g de Zn granulado metálico (em pó de 2 a 8 mm de diâmetro do Zn metálico). Ambos os tubos foram deixados 12h incubando para a completa reação do zinco com o extrato. Nos tubos sem o zinco metálico foi determinada a concentração de amônio presente e nos tubos com zinco metálico foi determinada a concentração de nitrato + amônio. Para quantificação no nitrato e amônio foram adicionados a 1 ml dos extratos de solo (obtidos da reação ou não com o zinco em tubo de ensaio), 6,0 mL de água deionizada, 1,0 mL da solução a (ácido salicílico 5%), 1,0 mL da solução b (nitroprussiato 0,1%) e 1,0 mL da solução c (hipoclorito de sódio 0,15%). Após 60 minutos, foi efetuada a leitura no espectrofotômetro a 680nm. A curva de calibração foi construída utilizando sulfato de amônio nas concentrações de 0,5 mg/L a 8 mg/L. A quantidade de nitrato presente no solo foi determinada pela diferença entre a concentração das amostras com zinco e sem zinco. Os resultados são expressos em ambos os casos em mg de amônio ou nitrato por kg de solo.

5.7 ANÁLISES QUÍMICAS DO SOLO

Amostras de solo foram secas por 72 horas a 60°C, peneiradas a 2 mm após trituração. Os seguintes parâmetros foram analisados: acidez ativa, acidez potencial (alumínio e hidrogênio), alumínio trocavel (alumínio), fósforo, potássio, cálcio, magnésio, COT (item 5.7), soma de bases, capacidade de troca de cátions efetiva e total, saturação de bases (V%) e saturação de alumínio (Al%). As unidades de cada parâmetro seguem a metodologia descrita abaixo e as determinações do CELA-PR (Comissão Estadual de Laboratórios de Análise Agronômicas) para emissão de laudos de análises de solo de rotina para o estado.

Para as determinações acima foram adotadas as metodologias propostas por Pavan et. al. (1992). A medição da acidez ativa foi feita pela medida do pH em cloreto

de cálcio e a acidez potencial, em cloreto de cálcio através da solução SMP. O alumínio trocável (Al^{+3}) foi determinada utilizando cloreto de potássio (1 mol) como extrator e hidróxido de sódio (0,02 mol) na titulação. Para a determinação de fósforo e potássio utilizou-se extrator mehlich 3, sendo que o potássio foi quantificado por fotometria de chama a partir do extrato. O fósforo foi determinado a partir de solução de molibdato de amônio com ácido ascórbico no extrato e posterior determinação da absorbância a 630 nm. A quantificação do cálcio e magnésio foi feita após extração utilizando solução de cloreto de potássio (1 mol) e titulação com EDTA (0,02 mol). A soma de bases, capacidade de troca de cátions, saturação de bases e de alumínio foram determinadas a partir de cálculos descritos em Pavan et. al. (1992).

5.8 AVALIAÇÃO DO CARBONO E DO ESTOQUE DE CARBONO NO SOLO

O fracionamento granulométrico das amostras de solo foi realizado de acordo com metodologia descrita por Sá (2001) para obtenção do C orgânico particulado (COP, fração $> 53\mu\text{m}$) e C associado aos minerais (COAM, fração $< 53\mu\text{m}$) nas amostras integrais coletadas.

A determinação do COT nas amostras integrais de solo e do C das frações granulométricas das amostras de solo após fracionamento foi realizado por combustão úmida seguindo Walkley e Black (1934) modificado por Pavan et. al. (1992). Os teores das frações granulométricas não foram utilizados neste trabalho, apenas para fins de cálculo dos estoques destas frações.

Os estoques de C para as amostras integrais foram quantificados através da fórmula abaixo (Equação 3) utilizando os dados do conteúdo COT em kg Mg^{-1} , densidade do solo (DS) em Mg m^{-3} e do volume da profundidade de amostragem (VPA) em m^3 . Os resultados finais são expressos em Mg ha^{-1} para cada profundidade amostrada, conforme a seguir:

$$\text{Estoque de C (Mg ha}^{-1}\text{)} = (\text{COT} \times \text{DS} \times \text{VPA}) / 1000 \quad (\text{Equação 3})$$

A partir dos valores do estoque de C calculados para as amostras integrais foi determinado o estoque de C para as frações granulométricas citadas acima (COP e COAM), considerando a porcentagem correspondente a cada fração.

A densidade utilizada no experimento foi determinada através de coleta de amostras indeformadas (aneis de metal) aos quais passaram pela determinação de macroporosidade e microporosidade (não utilizada neste trabalho) e através de cálculos se obteve a densidade segundo Embrapa (1997).

5.9 AVALIAÇÕES DAS CULTURAS

As coletas para avaliação das culturas foram feitas na safra de inverno e verão nos seguintes anos 2018-19, 2019-20 e 2020-21. Nas safras de inverno foram avaliadas a massa seca do material produzido pelas mesmas, sendo coletadas quando adubos verdes pouco antes de serem manejadas para serem deixadas rente ao solo. Nas culturas produtivas também foram medidas a massa seca das culturas no ponto de máxima produção de massa verde. Para a determinação da massa seca, as amostras foram secas em estufa de circulação forçada de ar a 60°C por 72 horas.

Nas safras de verão foram realizadas análises da massa seca e produtividade (kg/ha) após correção da umidade dos grãos, em todos os anos. Em adição, no ciclo de 2019-20 foi determinado também o índice produtivo e peso de mil grãos para a cultura da soja.

Para avaliação da massa seca do feijão, da soja, do milho e do trigo mourisco foram coletadas plantas de 1 metro linear da parcela, em 4 diferentes locais. A produtividade de grãos nas parcelas foi determinada em, excluindo-se a bordadura da parcela, e utilizando-se colheita mecanizada com colhedora de parcela. Após determinação na área útil das parcelas, os resultados foram extrapolados para 1 hectare via cálculos.

5.10 ANÁLISE DOS DADOS

Os dados foram submetidos aos testes de homogeneidade e normalidade e quando atendidas as pressuposições foram submetidos à análise de variância. Verificando-se a significância na análise de variância, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Também foram realizadas análises multivariadas de componentes principais entre os atributos biológicos e químicos do solo e os produtivos das diferentes rotações de culturas. Todas as correlações possíveis foram testadas visando formar interações entre os dados. Gráficos foram montados com os

resultados obtidos para análises do solo e das culturas produtivas de verão dos anos analisados. Além disso, tabelas foram montadas para demonstração dos dados obtidos nas análises dos testes de comparação de médias.

Em um segundo momento do trabalho, os dados com análise de variância consideradas adequadas individualmente, tiveram análise de box plot realizada e avaliada, para os 3 anos de coleta em sequência, de forma a interagir os 3 anos de análise de cada um dos dados, assim visando principalmente comparar os anos dentro de cada dado analisado (comportamento). Após avaliação dos box plot com melhor dispersão dos dados e a presença de variação dos dados dentro dos 3 anos da pesquisa, gráficos de regressão foram montados e tiveram suas curvas ajustadas para demonstração do comportamento dos dados dentre os anos e os diferentes tratamento.

De forma isolada, três análises estatísticas específicas foram realizadas, para massa seca e produtividade apenas dos sistemas de produção com a cultura do milho implantada na safra 2020-21, verificando-se análise de variância e quando encontrada diferença significativa as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($p > 0,05$), focando assim nas rotações com a mesma cultura.

Análises estatísticas clássicas não foram aplicadas aos dados de produtividade, massa seca nas safras 2018-19 e 2020-21 uma vez que as rotações apresentaram culturas diferentes. O mesmo se aplica com os dados da floresta que não foram analisados conjuntamente com os dados das rotações analisadas, sendo usado assim como valor de referência.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a realização do experimento a campo com os diferentes sistemas de manejo das culturas (rotações) e a realização das avaliações de fitomassa (massa seca), produtividade, atributos químicos do solo como C e suas frações e N, análises microbiológicas e enzimáticas do solo submetemos os diversos dados obtidos as análises estatísticas e tivemos os referidos resultados na sequência.

6.1 PRODUÇÃO DE FITOMASSA DAS CULTURAS DE INVERNO E VERÃO

A partir da análise da tabela 2, que mostra os valores de massa seca das culturas de inverno das safras 2018, 2019 e 2020 pode-se perceber de forma geral que os valores foram semelhantes nas seis rotações testadas.

O aporte de fitomassa tem relação direta com o desenvolvimento das culturas e este sofre influência direta das condições climáticas, principalmente umidade e temperatura. Isto explica resultados diferentes para a mesma cultura em anos diferentes. Assim, em 2018, a massa seca teve a maior produção para o consórcio aveia preta + azevém e a menor para o consórcio tritcale + centeio + ervilha forrageira. Em 2019 a produção de massa seca ficou próxima dos valores observados no ano anterior e posterior em todos os materiais, apesar das condições climáticas seca deste inverno. Neste ano todos os tratamentos eram gramíneas em cultivo solteiro ou em consórcios. A maior produção de massa seca foi para o trigo da rotação II (10184 kg ha^{-1}) e o menor para o tritcale (6803 kg ha^{-1}). No inverno de 2020 não houve diferença para massa seca entre as culturas.

Além do incremento de fitomassa, a qualidade desse material inserido pelas culturas deve ser considerada (FRANCHINI et al., 2011), uma vez que as leguminosas têm baixa relação C/N, o tempo de decomposição deste tipo de massa pelos microrganismos do solo é reduzido, liberando mais rapidamente seus nutrientes ao ambiente (Balota, 2017). Contudo, materiais de alta relação C/N são interessantes pela maior permanência no ambiente, assim auxiliando na conservação do solo (FRANCHINI et al., 2011; SIQUEIRA; MOREIRA, 2006; BALOTA, 2017).

Tabela 2 – Massa seca da parte aérea das referidas culturas de inverno das rotações de cultura nas safras de 2018, 2019 e 2020.

Rotação	2018		2019		2020	
	Cultura	Massa Seca	Cultura	Massa Seca	Cultura	Massa Seca
		Kg/hectare		Kg/hectare		Kg/hectare
I	Trigo	10396 ab	Trigo	9570 ab	Trigo	9992 ns
II	Trigo	10133 ab	Trigo	10184 a	Aveia Preta	9460
III	Trigo	10329 ab	Cevada	9088 ab	Canola	8166
IV	Tremoço + Ervilhaca	8922 ab	Triricale	6803 b	Tremoço + Ervilhaca	11440
V	Aveia + Azevem	10880 a	Aveia + Azevem	9992 ab	Ervilha + Centeio + Nabo	12351
VI	Triticale + Centeio + Ervilha Forrageira	8225 b	Triticale + Aveia + Centeio	8223 ab	Aveia Preta + Ervilha + Nabo	9599
CV%		10,21		16,28		19,88

Fonte: O Autor

Legenda: *Os valores seguidos de letras diferentes indicam diferenças entre os tratamentos em cada ano avaliado a partir do teste de Tukey ($p < 0,05$).

Tabela 3 – Massa seca da parte aérea das culturas de verão das rotações de cultura nas safras 2018-19, 2019-20 e 2020-21.

Rotação	2018-19		2019-20		2020-21	
	Cultura	Massa Seca	Cultura	Rotação	Cultura	Massa Seca
		Kg/há				Kg/ha
I	Soja	6404	Soja	5192 ns	Soja	6858
II	Soja	6505	Soja	4735	Milho	9268
III	Soja	6264	Soja	5178	Milho	12434
IV	Milho	15535	Soja	5427	Milho	16594
V	Milho	12596	Soja	5707	Milho	13336
VI	Feijão/Mourisco	6997	Soja	5746	Milho	15437
CV				14,44%		

Fonte: O Autor

Legenda: *Os valores seguidos de letras diferentes indicam diferenças entre os tratamentos em cada ano avaliado a partir do teste de Tukey ($p < 0,05$).

Apesar da menor quantidade numérica principalmente na safra 2018, do material aportado seco ao solo em relação as gramíneas, os consórcios com leguminas inclusas segundo Siqueira e Moreira (2006) e Balota (2017) promovem

maior atividade microbiana ao solo pela baixa relação C/N, principalmente se composta apenas por leguminosas.

As massas secas das culturas do verão 2018-19, 2019-20 e 2020-2021 do experimento também foram avaliadas (tabela 3).

Na safra de 2018-19, a rotação de culturas IV onde o milho foi antecedido de leguminosas (tremoço) a produção de massa seca foi 30,64%, maior que na rotação de culturas V, está última antecedita de adubação verde e culturas produtivas apenas pautadas em gramíneas. Os dados observados são confirmados por diversas pesquisas a exemplo das publicadas por Carvalho et al. (2004) e Braz et al. (2010), onde o milho apresentou maiores massas frescas e secas após leguminosas, demonstrando assim a importância das introduções dos adubos verdes no contexto das rotações para produtividade e produção de massa, principalmente quando a mesma introduzir N e as culturas posteriores exigirem altos índices do N, como já se conhece em relação a cultura do milho aqui observada.

Na rotação VI da safra 2018-19 onde teve o cultivo de 2 culturas durante o mesmo verão, houve um incremento de massa seca inseridas no sistema de produção, se comparado com resultados bibliográficos das culturas solteiras. A cultura do feijão desta época geralmente produz baixas quantidades de massa seca quando solteira, em torno de 2500 kg por hectare (CTSBF, 2012), sendo que neste arranjo as 2 culturas somadas apresentaram capacidade próxima de massa seca a cultura da soja. Tais medidas demonstram que podemos utilizar desta estratégia para conseguir além de maiores valores rentáveis (produtividade) maior conservação do sistema de produção.

A produção de massa seca da cultura da soja semeada em todas as rotações na safra 2019-20 não apresentou diferença entre os tratamentos. Embora não havendo diferença significativa, a soja semeada após os consórcios de adubos verdes mostrou tendência de aumentos que variaram de 5% a 10% sobre os resultados de soja obtidos sobre trigo, cevada e triticale.

Na massa seca apenas das culturas de milho da safra 2020-21 (Tabela 4), observou-se diferença significativa, onde as rotações que tiveram consorcio de espécies de adubos verdes, principalmente a rotação VI, obtiveram resultados superiores as que tiveram cultivos produtivos no inverno (III) ou adubação verde em poucos momentos da sequência de rotação de culturas (II). O fato observado já foi descrito por diversos autores, como Franchini et al. (2011) e Conceição et. al. (2021),

onde é atribuído a inserção de materiais vegetais (matéria orgânica de alta qualidade) no solo do sistema de produção e também a presença de leguminosas nos consórcios de espécies de adubos verdes ou cultivo solteiro delas como adubos verdes, promovendo e auxiliando na fertilidade do solo (inserção de N).

Tabela 4 – Massa seca da parte aérea dos tratamentos com a cultura de milho implantado no verão, safra 2020-21, nas rotações de cultura do experimento.

Rotação	Cultura	Massa Seca
		Kg/hectare
Rotação II	Milho	9268 c
Rotação III	Milho	12434 bc
Rotação IV	Milho	16594 a
Rotação V	Milho	13336 ab
Rotação VI	Milho	15437 ab
CV%		13,19%

Fonte: O Autor

Legenda: * Os valores seguidos de letras diferentes diferem entre si a partir do teste de Tukey com f de 0,05

6.2 PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS

A partir da análise da produtividade das culturas de verão das rotações (Tabela 5 e 7) foi possível verificar que a grande maioria foi próxima ou acima das médias estaduais. Na safra 2018-19, a produtividade alcançada pelo cultivo sequencial do feijão e mourisco, na rotação VI, foi 19,70% e 44,5% acima, respectivamente, da média regional para o Centro-Sul do Paraná e da média estadual (IDR-Paraná, 2020; CONAB, 2019). Na rotação VI o trigo mourisco na sequência do feijão obteve com produtividade média de 2503 kg/ha, estando quase 1000 kg acima da média de produtividade registrada por Silva et al. (2002) no Paraná, gerando uma produção média geral de aproximadamente 5050 kg/ha de grãos nesta rotação. Estudos sobre os efeitos no sistema de produção de 2 safras em um mesmo período de cultivo ou as chamadas terceiras safras precisam de mais atenção e pesquisas principalmente se tratando dos temas abordados neste trabalho e outros como doenças e pragas.

As rotações com a cultura da soja tiveram produções médias no ano de 2018-19 com pouca diferença numérica em si, porém a média das 3 rotações ficou aproximadamente 15,4% abaixo da média estadual (CONAB, 2021). Já a produtividade do milho nas rotações IV e V foram superiores à média estadual

segundo CONAB (2021). Contudo, levando-se em consideração a média nas regiões dos Campos Gerais que está em torno de 8800 kg/ha, a rotação V encontra-se dentro da média e a rotação IV, bem acima da média.

Tabela 5 – Produtividade das culturas de verão das rotações de cultura nas safras 2018-19, 2019-20 e 2020-21.

Rotação	2018-19		2019-20		2020-21	
	Cultura	Produtividade	Cultura	Produtividade	Cultura	Produtividade
		Kg/hectare		Kg/hectare		Kg/hectare
I	Soja	3071	Soja	3202 ns	Soja	3334
II	Soja	3170	Soja	2992	Milho	8834
III	Soja	3199	Soja	3336	Milho	8024
IV	Milho	11719	Soja	3462	Milho	12124
V	Milho	8508	Soja	3640	Milho	10157
VI	Feijão/ Mour.	2873/2503	Soja	3736	Milho	11818
CV%				14,4%		

Fonte: O Autor

Legenda: * Os valores seguidos de letras diferentes diferem entre si a partir do teste de Tukey com f de 0,05.

Esta última observação possivelmente está ligada ao cultivo do milho nesta rotação IV após cobertura com leguminosas no inverno, cultivo tradicionalmente conhecidas pela inserção de N no sistema. Além disso, a existência de 3 safras antecessoras com gramíneas na rotação V, promoveu aporte de volume de massa ao solo, mas com alta relação C/N, reduzindo N no sistema. Experimentos conduzidos em diversas regiões do país, também demonstraram maior produtividade para o milho cultivado logo após uma leguminosa (CARVALHO et al. 2004; TORRES et al., 2005; MA; WU, 2016).

Na safra 2019-20 apesar das rotações apresentarem diferenças numéricas, essas não se estatisticamente significativas para a produtividade e peso de mil grãos da soja (tabela 6). Percebe-se nas rotações com inserção de adubos verdes, principalmente a VI aumentos de mais de 10% na produtividade sobre os resultados de soja obtidos nas rotações sem adubos verdes, Rotação I, II e III. Cabe aguardar a continuidade dos ciclos do experimento para novas avaliações e verificações com um sistema de produção mais consolidado, com mais de 10 anos implantação (LIANG et al., 2016).

Tabela 6 – Peso de mil grãos (PMS) das culturas de verão, safra 2019-20, nas rotações de culturas do experimento.

Rotação	Cultura	PMS
Rotação I	Soja	104,99 ns
Rotação II	Soja	103,18
Rotação III	Soja	108,91
Rotação IV	Soja	111,23
Rotação V	Soja	105,06
Rotação VI	Soja	112,14
CV%		4,7%

Fonte: O Autor

Legenda: * Os valores seguidos de letras diferentes diferem entre si a partir do teste de Tukey com f de 0,05

Na safra 2020-21 (Tabela 7) foi aplicada a análise estatística nos tratamentos que apresentaram a mesma cultura, o milho (rotações II a VI). É possível observar um nítido incremento de produtividade nas rotações com inserção de adubos verdes anualmente (IV, V e VI) frente as rotações III e II com ausência ou apenas 1 época de adubos verdes, respectivamente. Diversos autores observam aumento de produtividade do milho e de outras culturas quando o mesmo é realizado pós cultivo de adubos verdes na área (CARVALHO et al., 2004; TORRES et al., 2005; FRANCHINI et al., 2011; MA; WU (2016).

Tabela 7 – Produtividade dos tratamentos com a cultura de milho implantado no verão, safra 2020-21, nas rotações de cultura do experimento.

Rotação	Cultura	Produtividade
		Kg/hectare
Rotação II	Milho	8834 bc
Rotação III	Milho	8024 c
Rotação IV	Milho	12124 a
Rotação V	Milho	10157 ab
Rotação VI	Milho	11818 a
CV%		8,98%

Fonte: O Autor

Legenda: * Os valores seguidos de letras diferentes diferem entre si a partir do teste de Tukey com f de 0,05

6.3 ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO

Os resultados das análises de solo do ponto de vista químico, “análises de rotina” estão nas tabelas 8, 9 e 10 para as safras 2018-19, 2019-20 e 2020-21 respectivamente. Não houve diferença estatística na maioria dos índices químicos do solo analisados e os valores obtidos para a floresta, ambiente de referência, está na última linha das tabelas.

A similaridade química da solo frente as diferentes rotações de cultura comprovam a baixa sensibilidade dos dados químicos para a avaliação de sistema de produção a curto e até longo prazo (MATSUOKA et al., 2003; MENDES et al., 2003; BALOTA et al. 2004; HUNGRIA et al., 2009; PEIXOTO et al., 2010; LISBOA et al., 2012; BALOTA, 2017; MENDES et al., 2018; MENDES et al., 2021).

Os resultados obtidos nas análises de solo de rotina estão dentro das faixas altas e médias, segundo Manual de Fertilidade do Solo do Paraná (SBCS-NEPAR, 2017) para quase todos os nutrientes. Destaca-se nesta avaliação as faixas o alumínio de forma geral muito baixas, interessante ao sistema de produção a sua ausência e o V% que foram médios na safra 2019-20 estando abaixo dos 50% preconizado por diversos autores. Fósforo e potássio apresentaram níveis altos a muito alto em todos os momentos segundo o mesmo manual, apesar de estarem sendo constantemente repostos pela adubação das culturas produtivas.

Tabela 8 – Atributos químicos do solo sob diferentes rotações de culturas durante o verão na safra 2018-19, e na floresta, ambiente referência

Rotação	Ph	H+Al	Alumínio	Potássio	Fósforo	Cálcio	Magnésio	Soma de Bases	CTC	CTA	Sat. de Bases – V%	Sat. de Alumínio-m%
		cmol _c /dm ³	cmol _c /dm ³	cmol _c /dm ³	mg/dm ³	cmol _c /dm ³	cmol _c /dm ³	cmol _c /dm ³	cmol _c /dm ³	cmol _c /dm ³		
Rotação I	4,87ns	7,07 ns	0,68 sn	0,41 ns	19,78 ns	4,16 ns	2,77 ns	7,34 ns	13,78 ns	7,65 ns	48,43 ns	13,10 ns
Rotação II	4,86	6,83	0,62	0,48	20,53	3,90	2,59	7,00	13,36	7,28	49,14	8,98
Rotação III	4,90	6,82	0,56	0,42	22,86	4,08	2,75	7,28	13,72	7,58	51,97	4,69
Rotação IV	4,92	6,33	0,39	0,38	32,32	4,84	2,80	8,02	14,16	8,16	54,54	4,96
Rotação V	4,91	6,49	0,48	0,37	26,57	4,67	2,78	7,81	14,14	8,16	54,17	6,06
Rotação VI	4,79	6,64	0,56	0,39	38,27	4,58	2,72	7,69	14,12	8,00	52,41	7,23
CV%	3,52%	8,76%	30,53%	14,95%	35,14%	14,55%	12,94%	9,46%	4,89%	10,01%	9,33%	54,55%
Floresta	4,15	13,22	2,00	0,31	3,63	2,37	1,64	4,46	18,77	6,48	22,95	39,79

* Valores seguidos de letras iguais não diferem entre si a partir do teste de Tukey com f de 0,05. CTC: Capacidade de Troca de Cátions; CTA: Capacidade de Troca de Ânions.

Tabela 9 – Atributos químicos do solo sob diferentes rotações de culturas durante o verão na safra 2019-20, e na floresta, ambiente referência.

Rotação	pH	H+Al	Alumínio	Potássio	Fósforo	Cálcio	Magnésio	Soma de Bases	CTC	CTA	Sat. de Bases – V%	Sat. de Alumínio-m%
		cmol _c /dm ³	cmol _c /dm ³	cmol _c /dm ³	mg/dm ³	cmol _c /dm ³	cmol _c /dm ³	cmol _c /dm ³	cmol _c /dm ³	cmol _c /dm ³		
Rotação I	4,68ns	9,36 a	0,98 a	0,39 ns	18,09 ab	2,83 ns	1,48 ns	4,87 ns	13,97 ns	5,70 ns	34,62 ns	15,39 ns
Rotação II	4,68	9,10 ab	0,89 ab	0,39	20,96 a	3,12	1,53	5,13	13,87	5,75	36,84	11,27
Rotação III	4,66	8,97 bc	0,54 ab	0,40	15,14 b	3,36	1,57	5,23	13,89	5,93	37,54	12,29
Rotação IV	4,66	8,77 c	0,52 b	0,47	17,45 ab	3,70	1,51	5,33	14,19	6,04	37,55	11,87
Rotação V	4,61	8,41 ab	0,80 ab	0,42	15,59 b	3,14	1,21	4,94	13,68	5,67	35,97	13,52
Rotação VI	4,61	8,12 bc	0,68 ab	0,43	16,64 ab	3,46	1,36	4,89	13,98	5,83	34,87	16,86
CV%	1,33%	4,61%	26,63%	14,54%	12,95%	11,3%	12,17%	10,81%	3,07%	7,67%	9,1%	24,87%
Floresta	4,15	14,22	2,34	0,28	2,75	2,31	1,41	4,12	17,52	6,36	23,01	38,04

* Valores seguidos de letras iguais não diferem entre si a partir do teste de Tukey com f de 0,05. CTC: Capacidade de Troca de Cátions; CTA: Capacidade de Troca de Ânions.

Tabela 10 – Atributos químicos do solo sob diferentes rotações de culturas durante o verão na safra 2020-21, e na floresta, ambiente referência.

Rotação	pH	H+Al	Alumínio	Potássio	Fósforo	Cálcio	Magnésio	Soma de Bases	CTC	CTA	Sat. de Bases – V%	Sat. de Alumínio-m%
		cmol _c /dm ³	cmol _c /dm ³	cmol _c /dm ³	mg/dm ³	cmol _c /dm ³	cmol _c /dm ³	cmol _c /dm ³	cmol _c /dm ³	cmol _c /dm ³		
Rotação I	4,88ns	7,68 ns	0,37 ns	0,53 ns	22,58 ns	5,47 ns	2,51 ns	8,58 ns	16,26 ns	8,95 ns	52,83 ns	4,28 ns
Rotação II	4,91	7,20	0,39	0,49	19,31	5,27	2,41	8,25	15,45	8,64	53,49	4,59
Rotação III	4,97	7,09	0,30	0,50	19,92	5,71	2,66	8,95	16,04	9,25	55,81	3,39
Rotação IV	4,83	7,51	0,34	0,57	19,86	5,84	2,56	9,04	16,57	9,38	54,58	3,65
Rotação V	4,89	7,48	0,40	0,45	21,82	5,55	2,42	8,50	15,98	8,90	53,28	3,75
Rotação VI	4,76	8,24	0,44	0,50	22,06	5,00	2,52	8,10	16,34	8,54	49,58	5,28
CV%	2,73%	7,25%	32,7%	18,03%	11,71%	9,27%	12,89%	7,55%	3%	6,19%	6,27%	35,48%
Floresta	4,21	13,09	2,51	0,24	2,47	2,17	1,70	4,10	16,77	6,29	23,52	39,99

Fonte: O Autor

Legenda: * Os valores seguidos de letras diferentes diferem entre si a partir do teste de Tukey com f de 0,05. CTC: Capacidade de Troca de Cátions; CTA: Capacidade de Troca de Ânions.

Os valores observados de alumínio trocável e acidez potencial apresentaram diferença significativa, mas apenas na safra 2019-20, sendo que nas demais safras, incluindo a 2020-21 não há este mesmo comportamento. Isso pode estar mais relacionado a uma questão ligada a metodologia aplicada para realização da determinação (algum erro experimental) do que realmente efeitos das rotações. Assim cabe uma observação mais profunda de tais dados nas próximas avaliações do experimento ao longo do tempo para verificação de aumentos em determinados cultivos dos teores de alumínio e acidez potencial.

Os resultados observados demonstram que a acidez potencial e alumínio foram maiores algumas das rotações sem inserção de adubos verdes, fato que vai contra o comumente conhecido e já comprovado efeito das inserções de matéria orgânica no sistema reduzindo acidez e liberando alumínio no solo (TEDESCO et al., 2008). Baldock e Broos (2012) afirmam que a matéria orgânica pode atuar com efeito tampão no solo, podendo estar tal fato relacionado aos dados observados e ainda a intensificação com o recorrente uso de fertilizantes minerais nas rotações intensificadas (sem uso de adubos verdes) afetado os teores de alumínio e acidez potencial dos solos.

6.4 CARBONO NO SOLO

Os resultados das análises de C orgânico total (COT), estoque de C orgânico total (EstCOT), estoque de C da fração particulada (EstCOP) e estoque de C da fração associada aos minerais (EstCOAM) das safras 2018-19, 2019-20 e 2020-21 estão na tabela 11. De forma geral, não houve diferença significativa para nenhuma das 4 variáveis ligadas ao C no experimento.

Apesar de não haver diferença significativa nos dados, numericamente podemos observar em alguns dos dados tendências que mais afrente podem vir a se tornar diferenças significativas e mais solidas. Um exemplo desta tendência é o COT onde podemos observar que em todos os anos de experimento a rotação I, caracterizada pela ausência de adubos verdes e sempre a mesma inserção de material vegetal obteve numericamente os menores resultados em relação as rotações com maior inserção de matéria orgânica via adubos verdes (V e VI), sendo o fato melhor observado nas safras 2018-19 e 2020-21.

Tabela 11 – Avaliações do Carbono do solo sob rotações de cultura, durante a cultura de verão nas safras 2018-19, 2019-20 e 2020-21, e na floresta, ambiente referência.

Rotação	2018-19				2019-20				2020-21			
	COT	EstCOT	EstCOP	EstCOAM	COT	EstCOT	EstCOP	EstCOAM	COT	EstCOT	EstCOP	EstCOAM
	g/dm ³		Mg/há		g/dm ³		Mg/ha		g/dm ³		Mg/ha	
I	26,77 ns	31,51 ns	14,00 ns	17,51 ns	29,01 ns	33,15 ns	15,61 ns	17,54 ns	35,70 ns	32,40 ns	14,85 ns	17,54 ns
II	27,14	30,57	13,14	17,42	31,69	34,75	16,02	17,73	38,17	33,69	15,70	17,99
III	27,71	30,40	13,28	17,13	30,76	32,71	15,93	16,78	38,18	32,76	15,15	17,61
IV	27,76	30,77	14,51	16,26	29,77	32,14	15,33	16,81	36,40	31,29	14,72	16,57
V	27,75	31,18	14,53	16,65	31,31	34,22	16,24	17,98	37,84	33,29	15,73	17,57
VI	27,84	32,08	15,97	16,10	32,08	35,99	17,44	18,55	38,01	34,28	16,97	17,31
CV%	2,98%	5,69%	9,38%	6,95%	7,3%	8,72%	12,9%	10,19%	5,72%	8,02%	10,2%	10,97%
Floresta	38,65	39,42	18,98	20,44	48,50	41,61	20,97	20,65	44,38	41,69	20,82	20,95

Fonte: O Autor

Legenda: * Os valores seguidos de letras diferentes diferem entre si a partir do teste de Tukey com f de 0,05.

COT: C Orgânico Total; EstCOT: Estoque de C Orgânico Total; EstCOP: Estoque de C da Fração Particulada; EstCOAM: Estoque de C da Fração Associada aos Minerais

Os valores observados indicam uma tendência de acúmulo de matéria orgânica e C nas rotações com uso de adubos verdes. Diversos autores como Bollinger et al. (2006), Pedro et al. (2010), NUNES et al. (2018), Conceição et al., (2021) observaram aumentos de C (COT e/ou estoques de C) nos solos quando do uso de adubação verde em vários sistemas de produção incluindo sistema rotacionados em SPD ressaltando os efeitos dos adubos verdes e das leguminosas em algum deles. Contudo, Costa et al. (2008), Souza et al. (2009), Sá et al. (2013) e Lal (2015) salientam a demora para o aumento do C no solo, com mais de 5 a 10 anos de implantação das mudanças de manejo, indicando que existe a necessidade de continuar as observações nos próximos anos e ciclos das rotações de cultura, para confirmar este início de tendência de aumento de C

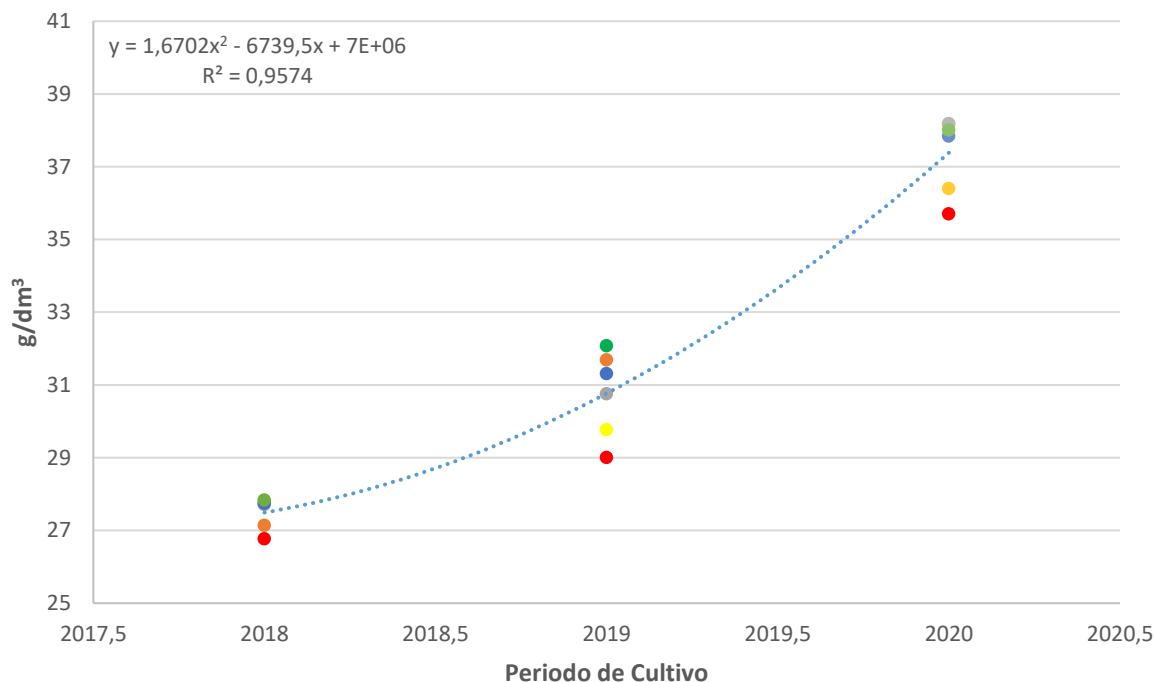
O EstCOT e das frações mesmo as tendências numéricas não se consolidam, sendo que o mesmo efeito de demora para mudanças no COT se observa segundo vários dos autores citados anteriormente para os estoques de C. Utilizando o C orgânico das frações e não os estoques, Carmo et al. (2012), também não obteve resultados significativos, sendo que o experimento foi realizado de forma pontual no tempo do sistema de produção, demonstrando a lentidão das mudanças a nível das frações do C.

Cabe salientar que o sistema rotação de culturas está no começo do primeiro ciclo de 3 anos de experimento recém completados (4 anos atualmente) e como observado em COT a matéria orgânica e o C, incluindo suas frações, ainda não apresentaram estatisticamente diferenças. Salton et al. (2005) coloca a demora a serem modificados pelo sistema de manejo as quantidades de C e suas frações no ambiente agrícola, citando que a fração do C particulado é o primeiro a ser alterado, juntamente com o COT, assim se fazendo necessário maior acompanhamento do sistema para demonstração/confirmações futuras das tendências já observadas.

Quando se observa a curva de regressão no gráfico abaixo (Figura 3), ao longo do tempo de experimento houve a demonstração que apesar dos dados individualmente ano a ano não terem apresentado diferença significativa existe um incremento ano a ano de forma generalizada do COT dentro dos anos de aplicação das rotações, promovendo assim variação entre os 3 anos analisados. Desta forma podemos perceber que ocorre ano a ano incremento de C no sistema, principalmente nas rotações com adubos verdes presentes, o que contribui de diversas formas para fertilidade do solo segundo Pedro et al. (2010), Nunes et al. (2018), Conceição et al.

(2021) e corrobora com outros dados que demonstram incremento ano a ano que veremos a frente.

Figura 3 – Curva de regressão ajustada para interação dos tratamentos nos anos de avaliação (safras 2018-19, 2019-20, 2020-21) para cCarbono orgânico total.



Fonte: O Autor

Legenda: Rotação I: Pontos em Vermelho; Rotação II: Pontos em Laranja; Rotação III: Pontos em Cinza; Rotação IV: Pontos em Amarelo; Rotação V: Pontos em Azuis; Rotação VI: Pontos em Verde

O COT, EstCOT e EstCOP no solo da área de floresta foi entre 25% a 45% maior que o valor no solo das rotações de culturas, apesar de não ter havido diferença estatística, consequentemente demonstra uma quantidade acumulada muito maior de matéria orgânica e C devido a maior adição de resíduos, associado a menor exposição solar e amplitude térmica no ambiente preservado em relação ao agrícola, o que eleva o teor de C no ambiente, fato já observado por diversos autores (GAMA-RODRIGUES; GAMA-RODRIGUES, 2008). O mesmo ocorrendo para na fração COAM, onde o solo da floresta apresentou os maiores valores de EstCOAM que as demais rotações, fato relacionado a estabilidade da matéria orgânica em solo que não sofre alterações por manejo para cultivo, o que favorece o processo de estabilização da matéria orgânica ao longo do tempo.

6.5 NITROGÊNIO NO SOLO

Nas avaliações relacionadas ao N (nitrato e amônio) não foi observada diferença significativa nas safras 2019-20 e 2020-21, porém foram observadas diferenças para o nitrato na safra 2028/19 (Tabela 12).

Para o nitrato na safra 2018-19 a rotação VI apresentou o solo com os maiores teores, sendo inclusive bem superior a imediatamente inferior, a rotação IV, e inclusive superior a floresta. Esse resultado possivelmente é devido ao maior aporte de N nesta rotação devido a, utilização do consórcio de adubos verdes, incluindo gramíneas e leguminosas, sendo que estas últimas por ocasião da decomposição liberaram nitrato e amônio no solo (AITA; GIOACOMINI, 2007; CANTARELLA et al.; 2008, CONCEIÇÃO et al., 2019; CONCEIÇÃO et al., 2021).

Tabela 12 – Nitrato e Amônio, safra 2018-19, nas rotações de culturas do experimento e na floresta, ambiente referência.

	2018-19		2019-20		2020-21	
Rotação	Amônio	Nitrato	Amônio	Nitrato	Amônio	Nitrato
mg/kg de solo						
I	12,00 ns	9,00 b	14,88 ns	18,45 ns	16,73 ns	13,79 ns
II	12,10	10,51 b	14,66	16,73	17,48	12,19
III	11,80	11,98 b	14,41	16,28	17,38	10,22
IV	12,25	12,63 ab	14,71	16,65	17,28	12,97
V	11,74	10,06 b	14,62	19,29	17,95	14,98
VI	12,22	18,33 a	15,45	21,28	17,62	14,81
CV%	7,01%	21,7%	8,11%	19,59%	5,81%	27,91%
Floresta	15,10	15,90	48,72	29,94	53,58	24,70

Fonte: O Autor

Legenda: * Os valores seguidos de letras diferentes diferem entre si a partir do teste de Tukey com f de 0,05.

Outra explicação para o comportamento do nitrato na rotação VI é a cultura do feijão estar implantada nesta safra no momento da coleta. O feijão proporciona maior aporte de N no solo devido a aplicação de ureia como fonte de N para complementar sua incapacidade de suprir totalmente seu N através da fixação de N e assim gerar maior produtividade. A adubação nitrogenada com ureia na cultura do feijão pode ter promovido aumento de nitrato. A ureia ao se decompor pela ação da microbiota do

solo promove a formação de amônio e nitrato os quais podem ser perdidos (lixiviação e volatilização) ou permanecer no solo como nitrato (TASCA et al., 2011).

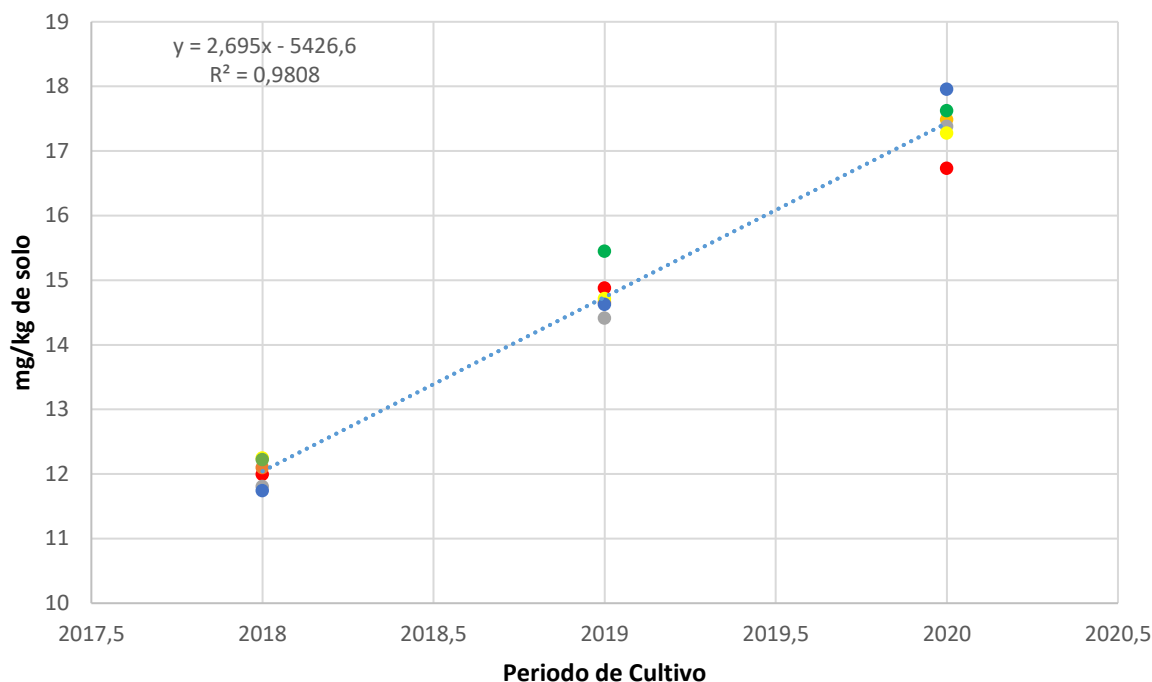
Resultados com comportamento semelhante foram encontrados na mesma região por Neto et al., (2010) com aumento de nitrato na sequência de leguminosas, no caso a soja, com presença de adubação verde em um dos momentos da rotação. O mesmo efeito foi observado por Xing et al. (2022) em diferentes sequencias de cultivo variando leguminosas e gramíneas e seu consórcio e monocultura. Já Junior et al. (2019) não encontraram diferença nos teores de nitrato e amônio no solo cultivado com soja antecedido por gramíneas, leguminosas e trigo, considerando apenas um momento de análise da rotação aplicada, o que cabe em parte dentro dos resultados obtidos aqui, contudo o próprio autor comenta da necessidade de mais tempo de observações para maior solidez dos dados.

Não houve diferença significativa para nitrato na safra 2019-20, porém também aqui é possível observar a mesma tendência do ano de 2018-19, onde a rotação VI apresentou valores absolutos para nitrato mais altos que as demais rotações. Na safra 2020-21 não houve diferença significativa entre as rotações de culturas. Tais resultados indicam a necessidade de observações de mais longo prazo sobre nitrato para verificar se este comportamento se aplica e ou se acentua, gerando diferenças mais evidentes entre as rotações de culturas.

A visualização dos dados muda quando se observa a curva de regressão no gráfico abaixo (Figura 4), onde temos a demonstração que apesar dos dados individualmente ano a ano não ter apresentado diferença significativa existe uma variação das quantidades com incremento ano a ano de forma generalizada do amônio dentro dos anos de aplicação das rotações. Desta forma pode-se perceber que ocorre ano a ano incremento de amônio no sistema o que contribui de diversas formas para fertilidade do solo segundo vários autores e corrobora com outros dados que demonstram incremento ano a ano que veremos afrente na análise sequencia dos anos para o amônio.

Em todas as safras os dados da mata nativa, usado como referência da vegetação natural na região, mostraram altas taxas para nitrato como para amônio, inclusive superiores a maioria dos tratamentos. Este fato está relacionado a alta taxa de decomposição dos restos vegetais da floresta, sistema em equilíbrio com relação a entradas e saídas, os quais liberam grandes taxas de amônio e nitrato no ambiente. (SIQUEIRA; MOREIRA, 2006; ROSCOE et al., 2006).

Figura 4 – Curva de regressão ajustada para interação dos tratamentos nos anos de avaliação (safras 2018-19, 2019-20, 2020-21) para amônio.



Fonte: O Autor

Legenda: Rotação I: Pontos em Vermelho; Rotação II: Pontos em Laranja; Rotação III: Pontos em Cinza; Rotação IV: Pontos em Amarelo; Rotação V: Pontos em Azuis; Rotação VI: Pontos em Verde

6.6 INDICADORES MICROBIOLÓGICOS DO SOLO

Os valores obtidos para os atributos microbiológicos clássicos, Respiração basal do Solo (RBS), C da Biomassa Microbiana (CBM), N da Biomassa Microbiana (NBM), Quociente Microbiano (qM) e Quociente Metabólico (qCO₂), nas três safras avaliadas, estão presentes na Tabela 13.

De forma geral, as rotações com inserção de adubos verdes apresentaram os maiores valores. Além disso, desses cinco atributos, o único que apresentou diferença estatisticamente significativa entre as rotações nos 3 anos avaliados, foi a RBS. Diante disso, podemos indicar a RBS como o mais sensível ao manejo empregado nesse trabalho dentre os atributos microbiológicos clássicos.

Na safra 2018-19 as rotações IV, V e VI foram superiores as demais para RBS. O cultivo de consórcios de adubos verdes nestas rotações no inverno de 2018 trouxe maior diversidade a estes sistemas de produção, o que pode ter afetado positivamente a RBS. Na safra 2019-20 a rotação V apresentou o maior valor para RBS, este

resultado pode estar ligado ao cultivo do consórcio da aveia preta + azevém nesta rotação, o qual trouxe grande aporte de matéria orgânica.

O comportamento da RBS é resultado do aporte em quantidade e com qualidade de matéria orgânica ao sistema. Diversos autores encontraram resultados semelhantes quando da inserção de matéria orgânica ao sistema, principalmente através de adubos verdes ou pelo não revolvimento do solo (inserção de palhada no sistema no sistema SPD) (HUNGRIA et al., 2009; LISBOA et al., 2012; BALOTA et al., 2014; BALOTA, 2017; NUNES et al., 2018).

As rotações I e II apresentaram os menores valores para RBS e outros atributos avaliados, possivelmente pela falta de diversidade de culturas nestas duas rotações. Na rotação II tem-se ainda maior presença de gramíneas na sequência de culturas, as quais apresentam alta relação C/N, o que consequentemente reduz a velocidade de decomposição e a RBS (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006; BALOTA, 2017). Na rotação I ocorre também a exaustão do sistema com o cultivo constante das mesmas culturas (rotação testemunha), implicando em pouca diversidade de cultivos.

Na safra 2020-21 a rotação IV apresentou o maior valor de RBS, fato este que pode ser atribuído ao cultivo do consórcio de leguminosas como cobertura no inverno de 2020. O consórcio das leguminosas, tremoço branco e ervilhaca peluda, aportou grande quantidade de material de alta qualidade ao ambiente, com baixa relação C/N, acelerando o processo de decomposição e consequentemente aumentando a RBS. Comportamento este também observado por outros autores em estudos semelhantes (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006; BALOTA, 2017; TATO, 2021).

A CBM apresentou diferença significativa entre as rotações apenas na primeira safra (2018-19). Observou-se que a rotação VI apresentou o maior valor, e a rotação III, o menor valor em relação as demais. Já quando observamos as demais safras percebe-se tendências numéricas, mas que precisam de mais tempo de estudo e avaliações para confirmarem-se, sendo que na safra 2019-20 temos valores numéricos nítidos da CBM superior nas rotações com inserção de adubos verdes, mas o mesmo não se repete na safra 2020-21.

Balota (2017) em diversos ensaios e compilações de dados de outros autores demonstrou a influência positiva da utilização de adubações verdes no ambiente de produção em diferentes regiões do Brasil, promovendo o aumento do CBM após o seu cultivo, sendo o efeito intensificado pela presença de leguminosas. No mesmo sentido Mu-Chun et al. (2012) e Acosta-Martinez e Brennan (2018) em pesquisas com

diferentes sequências de culturas em diferentes anos, destacaram a promoção da CBM na presença de leguminosas no ambiente, incluindo adubos verdes.

Na safra 2020-21 apesar de não ter havido significância entre as rotações para CBM, observou-se tendência de maior CBM na rotação III, com a presença da canola no inverno de 2020, antecedendo o milho. A canola, uma brassica, tem fortemente induzido alterações na microbiota do solo, promovendo grande aumento de atividade microbiana ligada ao ciclo do C principalmente (MBUTHIA et al., 2015; CONCEIÇÃO et al., 2021). A dispersão da rotação III em relação as demais, pode ser verificada também na análise de regressão (Figura 5A). De forma geral a CBM apresentou uma queda em seus valores na safra 2019-20 em relação à safra 2018-19 e um R^2 acima de 92%. A curva de regressão dos anos de avaliação das rotações para CBM (Figura 5A) mostra uma maior dispersão dos dados nas safras 2018-19 e 2019-20, havendo apenas um ponto em cada safra fora do grupamento das rotações, com baixo valor, ambos da rotação III, e uma concentração dos valores na safra 2020-21, sendo que neste último ano temos um crescimento bastante forte, um dos maiores observados neste estudo.

Quando observamos a NBM, também não há diferenças significativas entre os tratamentos, porém novamente se percebe tendência de maiores valores em todos as safras para as rotações com inserção de adubos verdes e os menores valores para a rotação I (testemunha) e a rotação II, ambas com menor diversidade de cultivos. Além disso, a curva de regressão dos anos mostra variação ano a ano com incremento desse parâmetro apesar da dispersão de dados visualizada na análise singular dos dados ano a ano (Figura 5C).

Borase et. al. (2020) em ensaios com rotações, onde culturas e adubos verdes antecederam o milho, mostraram que a CBM e NBM aumentaram substancialmente nos tratamentos com adubos verdes nos sistemas de produção. Isso explica a tendência em números absolutos do mais baixo desempenho da CBM e NBM da rotação I e II, as quais apresentam ausência de adubação verde e extração contínua de nutrientes pelo cultivo sequencial de mesmas culturas continuamente e, pouca diversificação.

O solo sob floresta, apresentou os maiores valores de RBS e CBM e NBM quando comparada com as rotações em todos os anos avaliados, assim como reportado por Silva et al. (2010) e Selbach et al. (2012). Isso se deve, segundo os autores, a alta atividade microbiana no ambiente natural com alta taxa de ciclagem de

nutrientes. Contudo Mendes et. al. (2015) sugerem que a RBS nos ambientes de floresta precisa ser mais bem avaliada, já que em muitos ambientes naturais a atividade microbiana é reduzida devido à complexidade do material a ser decomposto.

O quociente microbiano (qM) e o quociente metabólico (qCO₂) apresentaram diferença significativa apenas na primeira safra (2018-19), sendo qM superior na rotação VI e inferior na rotação III. A presença do consórcio de adubos verdes na safra 2018-19 na rotação IV possivelmente forneceu C e ambiente adequado a vida microbiana. Por outro lado, na rotação III, não foram adicionados adubos verdes na sequência de cultivos. Esse resultado destaca a sensibilidade do quociente microbiano para observação das mobilizações do C no ambiente, já reportada por Dadalto et al., (2015). Silva et al., (2010) também destaca a sensibilidade do quociente microbiano ao observar e comparar ambientes nativos, florestais e de produção agrícola diferenciados. Apesar deste comportamento na primeira safra avaliadas, nas demais o quociente microbiano não apresentou diferença significativa, sendo necessária a continuidade das pesquisas para verificação por um período maior.

O quociente metabólico apresenta de forma geral resultados que não segue a tendência observada em outros dados microbiológicos básicos como as biomassas e a RBS, sendo que o quociente metabólico teve na primeira safra avaliada a rotação III, a ausente de adubos verdes, com o maior resultado e as rotações I e II com os menores junto com a rotação VI. O comportamento numérico permanece na safra 2019-20, mas sem diferença significativa. Contudo tal comportamento visualizado nas primeiras safras não se repete na safra 2020-21, onde os valores numéricos mudaram completamente. Silva et al. (2010) relata que o quociente metabólico apresentou maiores resultados nos ambientes preservados e menor em ambientes com perturbação. Desta forma o quociente metabólico como microbiano precisam de maiores avaliações ao longo do tempo para determinação de padrões de comportamento.

Borase et. al. (2020) pesquisando rotações de cultura com sistema com adubos verdes e sem adubos verdes, além da presença e ausência de adubação e leguminosas também teve resultados para quociente metabólico com comportamento , diferente dos demais indicadores microbiológicos avaliados, sendo que o autor comenta do sistema radicular sendo um fator influente, além da quantidade de material vegetal produzido e inserido no solo pelas leguminosas como possível um fator que afete o quociente metabólico e seus resultados.

Tabela 13 – Respiração basal do solo (RBS) e Carbono da Biomassa Microbiana (CBM), Nitrogênio da Biomassa Microbiana N (NBM), Quociente Microbiano (qM) e Quociente Metabólico (qCO₂) nas safras 2018-19, 2019-20, 2020-21 nas rotações de cultura do experimento e na floresta, ambiente referência.

	2018-19					2019-20					2020-21				
Rotação	RBS*	CBM	NBM	qM	qCO ₂	RBS	CBM	NBM	Qm	qCO ₂	RBS	CBM	NBM	qM	qCO ₂
I	0,42 b**	269,74 ab	70,05 a	1,01 ab	1,64 b	0,47 c	232,82 a	81,58 a	0,76 a	2,15 a	0,6628 c	528,30 a	90,63 a	1,48 a	1,48 a
II	0,44 b	243,67 ab	63,21 a	0,90 ab	1,91 b	0,45 c	233,28 a	89,52 a	0,70 a	2,05 a	0,6752 c	521,04 a	89,79 a	1,37 a	1,54 a
III	0,58 ab	194,74 b	65,98 a	0,70 b	3,68 a	0,49 bc	173,44 a	98,02 a	0,94 a	4,01 a	0,6920 c	601,53 a	93,22 a	1,58 a	1,17 a
IV	0,71 a	306,25 ab	85,18 a	1,11 ab	2,39 ab	0,54 b	271,05 a	94,98 a	0,65 a	2,04 a	0,753 b	527,58 a	100,60 a	1,45 a	1,56 a
V	0,74 a	268,58 ab	79,74 a	0,97 ab	2,98 ab	0,64 a	254,10 a	98,41 a	0,84 a	2,76 a	0,7442 b	521,25 a	118,98 a	1,38 a	1,44 a
VI	0,71 a	329,69 a	92,32 a	1,19 a	2,11 b	0,54 b	312,77 a	96,38 a	0,92 a	1,77 a	0,8089 a	593,68 a	117,47 a	1,56 a	1,38 a
CV%	13,97%	19,6%	20,89%	20,26%	25,7%	5,2%	22,51%	8,99%	17,06%	44,87%	8,84%	16,54%	16,21%	15,97%	26,83%
Floresta	0,94	782,14	193,89	2,08	1,69	1,05	692,99	219,95	1,48	2,02	1,19	880,71	185,78	2,01	1,40

Fonte: O Autor

Legenda: * Unidade da Respiração: mg de C kg.hora; C da Biomassa Microbiana C: ug de C.g solo seco; N da Biomassa Microbiana: ug de N.g solo seco; Quociente Microbiano e Quociente Metabólico: %

** Os valores seguidos de letras diferentes em cada coluna diferem entre si a partir do teste de Tukey com f de 0,05

Tabela 14 – Atividade das enzimas Arilsulfatase, B-Glucosidase, Fosfatase Ácida e Hidrolase do Diacetato Fluoresceína (FDA), Urease nas safras 2018-19, 2019-20, 2020-21 nas rotações de cultura do experimento e na floresta, ambiente referência.

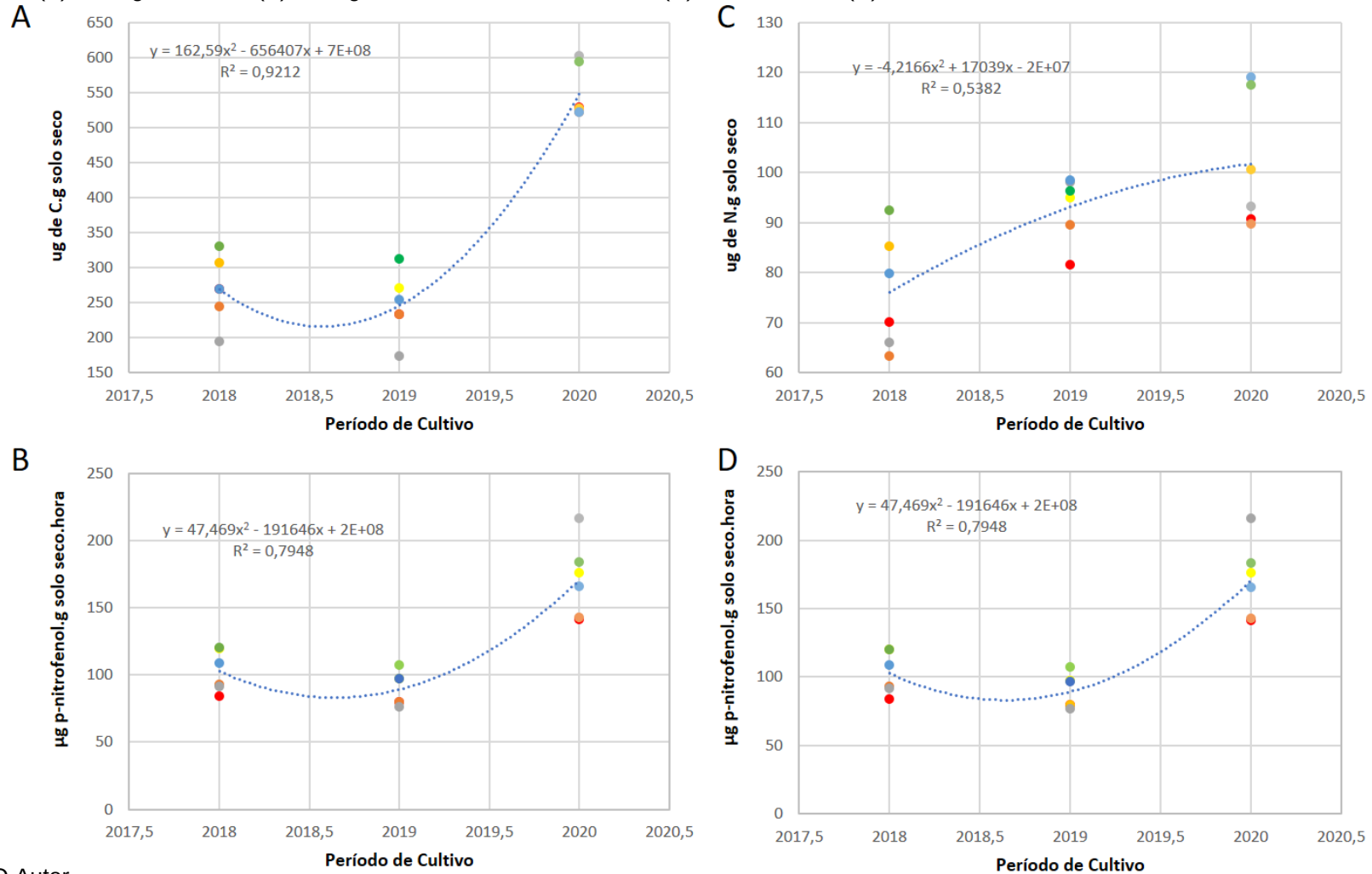
2018-19					2019-20					2020-21				
Rotação	Arilsulfat.*	B-Glucos.	FDA	Fosfat. Ác.	Arilsulfat.	B-Glucos.	FDA	Fosfat. Ác.	Urease	Arilsulfat.	B-Glucos.	FDA	Fosfat. Ác.	Urease
I	20,02 a**	83,80 c	186,72 a	255,88 ab	30,35 a	79,41 a	162,82 a	198,49 cd	11,61 b	34,36 a	141,23 b	163,03 a	287,73 b	22,09 a
II	20,31 a	92,59 c	179,00 a	264,00 ab	27,94 a	79,53 a	161,77 a	174,98 d	10,77 c	32,85 a	142,64 b	166,46 a	303,31 ab	21,87 a
III	22,84 a	91,47 c	180,19 a	248,12 b	26,46 a	76,22 a	162,24 a	213,38 bc	11,32 b	32,58 a	216,11 a	161,08 a	307,38 ab	24,41 a
IV	25,03 a	119,56 b	191,61 a	279,03 ab	35,52 a	97,09 a	179,41 a	233,20 bc	14,95 a	41,31 a	176,08 ab	180,93 a	324,56 ab	25,21 a
V	22,60 a	108,28 ab	182,10 a	282,77 ab	32,24 a	96,71 a	168,80 a	241,96 ab	14,56 a	37,10 a	165,69 ab	176,15 a	317,48 ab	24,45 a
VI	23,09 a	120,22 a	204,33 a	314,99 a	31,76 a	106,80 a	181,35 a	271,90 a	14,83 a	36,88 a	183,46 ab	175,20 a	355,45 a	24,48 a
CV%	15,97%	16,88%	6,33%	9,8%	15,18%	17,44%	6,64%	7,18%	16,18%	14,95%	12,88%	6,82%	7,63%	8,46
Floresta	48,64	129,76	243,95	357,74	46,24	195,36	239,06	0322,71	32,26	58,04	183,40	243,89	515,08	43,95

Fonte: O Autor

Legenda: * Unidade das enzimas Arilsulfatase, B-Glucosidase e Fosfatase Ácida: μg p-nitrofenol.g solo seco.hora; Unidade da enzima FDA: μg de FDA Hidrolisado.g solo seco.hora; Unidade da enzima Urease: μg $\text{NH}_4\text{-N}$.g solo seco.hora.

** Os valores seguidos de letras diferentes em cada coluna diferem entre si a partir do teste de Tukey com f de 0,05.

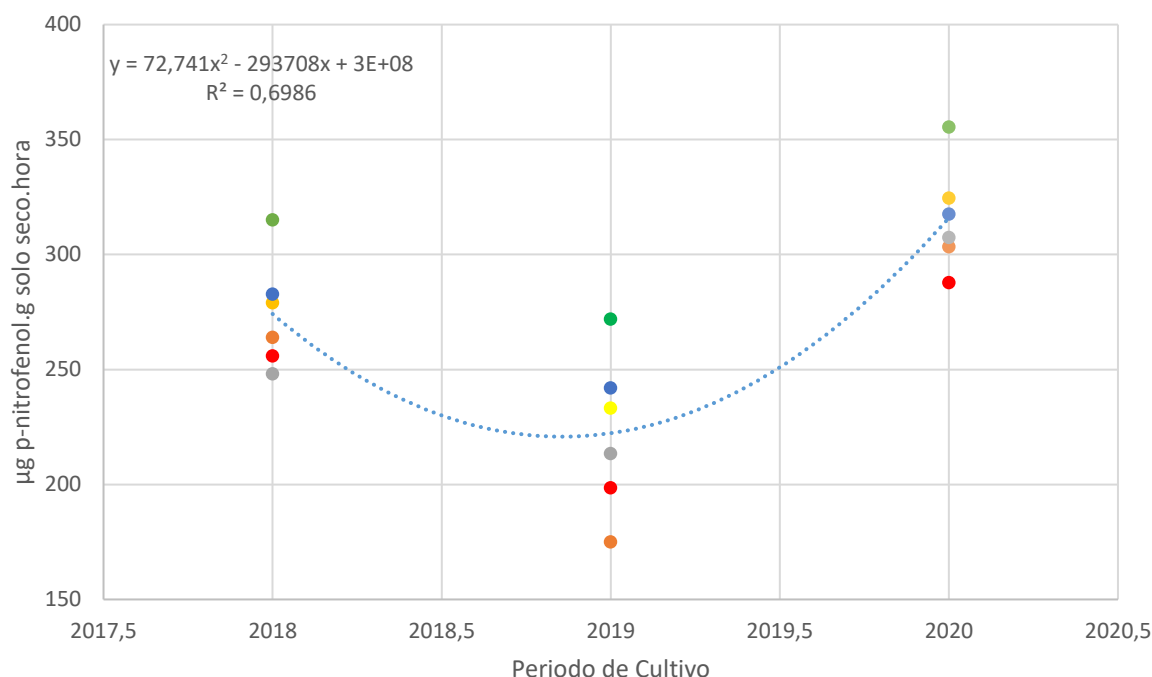
Figura 5 – Curvas de regressão ajustadas para interação dos tratamentos nos anos de avaliação (safras 2018-19, 2019-20, 2020-21) para Carbono da biomassa microbiana (A), beta glucosidase (B), Nitrogênio da biomassa microbiana (C) e arilsulfatase (D).



Fonte: O Autor

Rotação I: Pontos em Vermelho; Rotação II: Pontos em Laranja; Rotação III: Pontos em Cinza; Rotação IV: Pontos em Amarelo; Rotação V: Pontos em Azuis; Rotação VI: Pontos em Verde

Figura 6 – Curvas de regressão ajustada para interação dos tratamentos nos anos de avaliação (safras 2018-19, 2019-20, 2020-21) para fosfatase ácida.



Fonte: O Autor

Rotação I: Pontos em Vermelho; Rotação II: Pontos em Laranja; Rotação III: Pontos em Cinza; Rotação IV: Pontos em Amarelo; Rotação V: Pontos em Azuis; Rotação VI: Pontos em Verde

Os valores obtidos para a atividade das enzimas arilsulfatase, beta glucosidase, fosfatase ácida, hidrolase do diacetato (FDA) e urease nas três safras avaliadas, estão presentes na tabela 14.

A atividade da enzima arilsulfatase e FDA não apresentou diferença significativa entre os tratamentos em nenhuma das safras, enquanto a atividade da fosfatase ácida apresentou diferença significativa em todas as safras e pôr fim a atividade da beta glucosidase apresentou diferença significativa nas safras 2018-19 e 2020-21 e por fim, a da urease apenas em 2019-20.

Na safra 2018-19 a beta glucosidase apresentou a maior atividade na rotação VI enquanto as rotações sem inserção contínua de adubos verdes (I, II e III) com os menores valores. Mesmo comportamento se mantém na safra 2019-20, porém sem diferença estatística. Já na safra, 2020-21, a maior atividade para a enzima Beta glucosidase foi na rotação III e os menores resultados foram para as rotações II e I, respectivamente.

O fato desta mudança na última safra analisada vem de encontro ao observado por Mbuthia et al. (2015) e Conceição et al. (2021) que mostram os valores de beta

glucosidase sendo afetados pela presença de Brassicas, canola, o mesmo ocorrendo para outros indicadores microbianos do solo, como já visualizado em CBM neste trabalho.

McDaniel et al. (2014) obteve resultados semelhantes aos observados nas duas primeiras safras deste experimento, onde a beta glucosidase apresentou maiores valores nas rotações com inserção de adubos verdes na sequência de cultivo. Acosta-Martinez e Brennan (2018) e Borase et al., (2020) alterando conjuntamente manejos e rotações, obtiveram resultados que comprovam que as rotações com adubos verdes e leguminosas induzem o aumento da atividade da enzima beta glucosidase. Estes estudos citados acima encontraram valores da beta glucosidase semelhantes aos obtidos no presente estudo para as safras 2018-19 e 2019-20, porém na safra 2020-21 tivemos resultados da atividade da beta glucosidase bem acima dos visualizados em trabalhos semelhantes, com valores chegando a 200 μg p-nitrofenol por grama de solo seco por hora.

A atividade da beta glucosidase está diretamente relacionada a transformação do C no ambiente, responsável pela quebra direta das ligações carbônicas da estrutura da matéria orgânica, sendo que os aumentos nas quantidades de matéria orgânica no sistema de produção irão aumentar o substrato para tal ação enzimática automaticamente, gerando maior atividade da enzima e da microbiota que a utiliza (SHI, 2021; FUHRMANN; ZUBERER, 2021). Nannipieri et al. (2012) também coloca a qualidade da matéria orgânica como ponto importante para a atividade de beta glucosidase, destacando a sua correlação com o ciclo do N e as enzimas celulosidase que precisam de energia e relação C/N baixa para que a celulose seja inicialmente quebrada gerando o substrato para a beta glucosidase. Desta forma a presença de leguminosas ou material de alta relação C/N podem vir a afetar a nossa beta glucosidase como foi verificado nesta pesquisa.

Na figura 5B observa-se o gráfico de regressão dos anos de avaliação das rotações de culturas para B-Glucosidase teve variação observada entre os anos do experimento. Há uma leve queda entre o primeiro ano de avaliação (safra 2018-19) e o segundo ano (safra 2019-20), seguido de um grande crescimento no terceiro ano de avaliação (safra 2020-21), devido principalmente no último ano pela rotação III que tem em sua composição brassicas antecedendo a cultura de verão (milho). Segundo Mbuthia et al. (2015) e Conceição et al. (2021) materiais de origem deste grupo vegetal promovem um aumento intenso de atividade de enzimas e índices de ciclagem de

nutrientes ligados a C, N e enxofre. O perfil observado para a atividade de beta glucosidase se assemelha ao da CBM (Figura 5A), ambos atributos relacionados ao ciclo do C.

Ao avaliar o comportamento da B-Glucosidase entre os anos temos que chama a atenção a redução entre o primeiro e segundo ano, quando em várias outras variáveis a serem discutidas a frente que estão em crescimento contínuo sendo que este fato neste ano pode ser explicado devido à forte redução de chuvas no verão de 2019-20, com uma seca histórica na região centro-sul do Brasil, e que pode ter de certa forma afetado a vida microbiana e a atividade das enzimas. Outra explicação possivelmente complementar que pode ser citada é fato das culturas antecessoras de inverno ser em todas as rotações por coincidência gramíneas com material vegetal de alta relação C/N que reduz N no sistema, o que consequentemente reduz a atividade e a celeridade da vida do solo, condição potencializada nas rotações com pouco ou sem adubos verdes leguminosas, as quais tiveram os menores resultados de acordo com as análises individuais para a beta glucosidase. Siqueira e Moreira (2006) e Balota (2017) relatam que a atividade da microbiota do solo em materiais com maior relação C/N tendem a ser mais lentas e prolongadas pela redução na taxa de decomposição.

A enzima fosfatase ácida apresentou nas três safras a maior atividade na rotação VI e os menores valores variaram entre as safras, sendo na safra 2018-19 a rotação III, na safra 2019-20, a rotação II e na safra 2020-21, a rotação I.

Borase et al. (2020) em experimento com diferentes rotações de cultura e manejos do solo verificou diferença significativa na atividade da enzima fosfatase ácida nas rotações com inserção de adubos verdes contendo leguminosas, como o presente trabalho também observou, na rotação VI, onde a maior atividade geral presente no solo devido ao material com relação C/N intermediária. Lisboa et al. 2012 e Bini et al. (2014) avaliando sistemas rotacionados também obtiveram comportamento semelhante para a fosfatase ácida, onde as rotações com adubos verdes mostraram os maiores valores. Ambos afirmaram que nos manejos com maior utilização do solo por culturas produtivas apresentaram menor atividade da enzima, superados apenas pelos solos com maiores perturbações (revolvimento). Contudo os autores destacam a fosfatase ácida como uma das enzimas com menor sensibilidade para demonstrar alterações em função de mudanças no sistema de rotação. Cabe

salientar que a atividade da enzima em seu estudo, foi bem menor que a observada no presente estudo.

Gessieler e Scow (2014) citam que a adição de fertilizantes aos solos é fator preponderante para maior atividade da enzima fosfatase ácida, sendo que neste experimento houve efeito contrário, onde as culturas com maiores adubações demonstraram os menores valores, no caso adubação tanto no inverno como no verão com culturas comerciais em ambos os momentos. Os autores também destacam que altos índices de fósforo no solo reduz a atividade da enzima fosfatase. Fato este que não de correu neste experimento, estando os índices em nível médio no solo segundo SBCS-NEPAR (2017).

A curva de regressão dos anos de avaliação das rotações de culturas para fosfatase ácida (Figura 6) apresentou um comportamento semelhante ao observado para B-glucosidase e CBM, mas com dados bem mais dispersos dentro do mesmo ano de avaliação (principalmente no ano 2019-20) e um R^2 baixo, menor que 70%. Percebe-se para a fosfatase ácida uma queda maior entre os anos 2018-19 e 2019-20, podendo a dispersão dos dados ser a razão que influenciou na análise e neste comportamento. O comportamento da fosfatase ácida pode estar relacionado novamente a questões climáticas, fato que diversos autores comentam ser extremamente influente sobre a vida microbiana, principalmente com relação a água no solo.

A atividade de urease apresentou diferença significativa entre as rotações apenas na safra 2019-20, sendo que todas as rotações com adubação verde continuamente apresentaram valores superiores às rotações sem adubos verdes de forma mais constante. A mais baixa atividade foi observada na rotação II, o que possivelmente ocorreu pela reduzida diversidade de culturas nesta rotação e pela alta retirada de N do sistema pelas plantas, pois houve a presença constante do trigo e também algumas safras com milho. Apesar de não ter havido diferença estatística significativa entre as rotações na safra 2020-21, foi possível observar a mesma tendência dos resultados obtidos em 2019-20. Diversos autores considerarem que a aplicação de fertilizantes como a ureia no sistema aumenta a atividade da urease, o mesmo que ocorre com a fosfatase ácida e alcalina e adubação fosfatada (MENDES et. al., 2009; NANNIPIERI et al., 2012; GESSIELER; SCOW, 2014), sendo que isso não foi observado neste trabalho onde as rotações com maior inserção de adubação

fosfatada e ureia (cultivos produtivos no verão e inverno) apresentaram os menores valores.

Apesar da forte relação demonstrada por diversos autores da urease com adubação nitrogenada a base de ureia, amplamente utilizada no ambiente agrícola, Trasar-Cepeda et. al. (2008) e Yang et al. (2006) demonstraram relação entre urease e diferentes plantas de coberturas de solo e a qualidade e quantidade de matéria orgânica aportada, onde leguminosas tendem a afetar positivamente a atividade da enzima, seguindo o comportamento observado neste experimento. Os resultados obtidos aqui ganham força quando observamos que os adubos verdes são cultivados sem adição de fertilizantes e que na safra 2019-20 houve no verão apenas a soja cultura na qual não é aplicado fertilizante a base de N nem na base e nem em cobertura

Nivelle et al. (2016) comparou os sistemas de manejo do solo convencional e direto e diferentes coberturas ao longo de 5 anos e obteve resultados semelhantes aos observados neste estudo, onde a presença de adubos verdes, com destaque para as leguminosas resultaram em uma maior atividade da urease, principalmente quando em SPD. O constante uso de rotações com milho e trigo tiveram resultados intermediários frente aos tratamentos com revolvimento do solo. Os mesmos efeitos foram encontrados por Lisboa et al. (2012) em argissolo e rotações de cultura utilizando leguminosas semelhante as usadas nas rotações IV a VI (ervilha forrageira e aveia em consórcio) e pousio, além de culturas produtivas como milho e soja. Já Mu-Chun et al. (2012) obtiveram valores para atividade de urease similares em experimentos em que utilizou monoculturas, rotações apenas com culturas produtivas e rotações com culturas produtivas e plantas de cobertura (consorciadas ou solteiras), contudo os autores realizaram o estudo em apenas dois anos

A atividade de beta glucosidase e urease foram mais altas no ambiente de referência, a floresta, em relação as rotações, assim como visto em outros trabalhos (SIQUEIRA; MOREIRA, 2006; MENDES et. al., 2009; NANNIPIERI et al., 2012; GESSIELER; SCOW, 2014; BALOTA, 2017; MENDES et al., 2018). O fato se deve a constante ciclagem de nutrientes dos sistemas preservados e a sua grande biomassa microbiana (tanto em diversidade como em abundância) realizando atividades diversas no ambiente.

Apesar de não ter havido diferença estatística significativa na atividade das enzimas arilsulfatase e FDA entre as rotações, percebe-se uma tendência de maior

valor nas rotações com adubos verdes inseridos continuamente (rotações IV, V e VI). A curva de regressão da variação dos anos de avaliação do experimento mostra um incremento da atividade da arilsulfatase apesar da dispersão de dados (Figura 5D) ao longo dos 3 períodos avaliados. Isto nos permite acreditar que em um prazo maior de tempo do experimento será possível obter diferenças significativas principalmente para a arilsulfatase.

Vários autores como Siqueira e Moreira (2006), Mendes et.al. (2015) e Balota (2017) mencionam que as enzimas no solo são diretamente afetadas pelo aporte de material vegetal, provenientes de adubações verdes e restos culturais, os quais proporcionam a ativação da microbiota. Sinsabaugh (2010) associa diretamente a qualidade e quantidade da matéria orgânica à atividade microbiana, destacando que a relação C/N afeta diretamente a atividade das enzimas.

Dias et al. (2018) e Barbieri et al. (2019), analisando várias rotações e seus efeitos sobre a diversidade microbiana do solo concluíram que o CBM e a atividade de FDA convergem. Uma maior atividade da FDA, está associada a valores superiores do CBMe índice de shanon em rotações com a presença de adubos verdes nos períodos de inverno (DIAS et al., 2018; BARBIERI et al., 2019).

A adubação verde composta por leguminosas apresenta altos teores de N pela fixação biológica gerando resíduos com baixa relações C/N, e também teores maiores de enxofre, pois ambos os nutrientes fazem parte de estruturas bioquímicos correlacionados, levando ao aumento da atividade de enzimas relacionadas ao ciclo do enxofre, dentre elas a arilsulfatase. Borase et. al. (2020), Balota et al. (2014b) e Lisboa et al. (2012) em estudos semelhantes observaram que rotações com a presença de adubos verdes com leguminosas apresentaram uma maior atividade da enzima arilsulfatase do que a detectada nos demais tratamentos, assim como observado no presente estudo. Matsuoka et al. (2003) e Lopes et. al. (2013) destacam a arilsulfatase como forte indicador de mudanças de manejo do solo, tanto do ponto de vista do uso de plantas de cobertura como de manejos de perturbação do solo, encontrando em seus estudos valores bem acima dos reportados para o presente estudo, chegando a ser duas vezes maiores

6.7 ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS DAS AVALIAÇÕES

Foi realizada a análise de componente principais (PCA) das safras 2018-19, 2019-20 e 2020-21. Todos os indicadores microbiológicos (básicos e enzimáticos), de C e de N e a produtividade das culturas foram colocados na análise de PCA, com exceção da urease devido ao fato dela ter sido analisada em apenas em 2 safras. A análise química do solo também não foi colocada na PCA devido a sua grande quantidade de dados e baixa resposta na análise de variância (muitos dados com diferença não significativa).

Na Figura 7 da PCA da safra 2018-19 observa-se que o primeiro componente principal (PC1) representou 29,33% e o segundo componente principal (PC2) representou 19,45% da variância dos dados originais do experimento. Desta forma as duas componentes principais juntas (PC1 e PC2) representam cerca de 48,78% da variância original total dos dados analisados.

Quatro comportamentos bastante distintos na análise são observados, além de um comportamento intermediário, a RBS. Contudo antes dos grupamentos, temos de relatar que nesta PCA em geral existe as indicações das rotações com grande separação, a qualé entre os dois grandes grupos, os com uso contínuo de adubos verdes e os com pouca inserção ou nenhum uso de adubos verdes no ciclo, sendo que todos os pontos das rotações I, II e III estão na PC1 negativa e os pontos das rotações IV, V e VI estão na PC1 positiva, independente da PC2. A distribuição dos dados mostra que a maioria dos dados está junto às rotações com uso mais contínuo de adubos verdes solteiros ou em consórcio e poucos dados junto as rotações com pouca inserção ou em uso de adubos verdes.

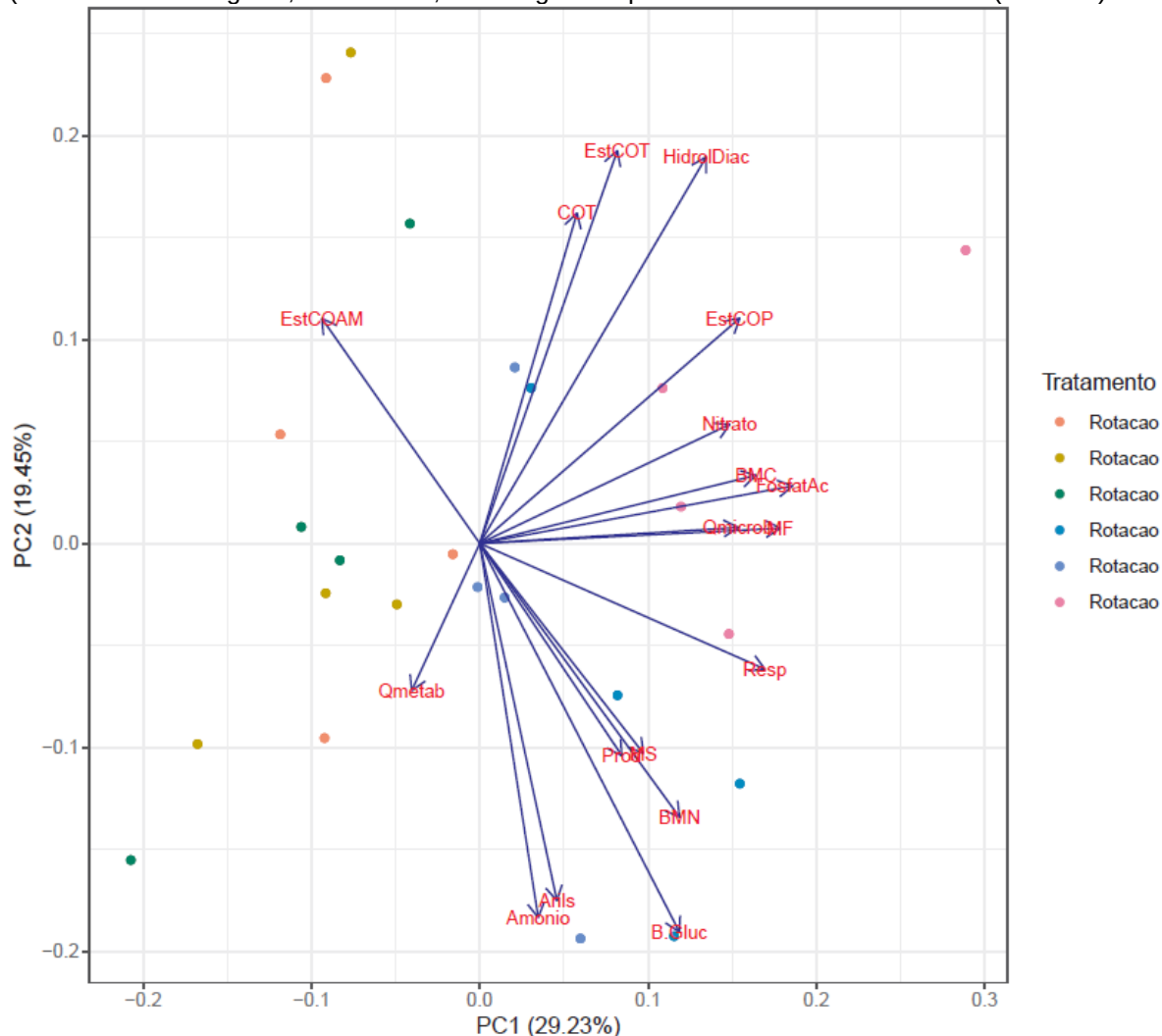
Temos uma primeira área de índices de dados bastante isolada de indicações de rotações de cultura, na PC1 positiva, entre 0,05 e 0,15 e entre 0,15 e 0,2 na PC2 positiva. A área concentra pouco mais de 16,5% dos dados analisados no experimento (3 de 18 dados) e tem itens dos dados microbiológicos (FDA) e também itens ligados ao grupo do C (COT e EstCOT) todos diretamente associados por terem o mesmo sinal e sentido das componentes.

Temos uma segunda área de índices próximas as indicações da rotação IV (3 dos 4 pontos), composta por um número um pouco maior de índices (5 de 18 dados), totalizando quase 28% dos dados, tendo os dados da fosfatase ácida, C da biomassa

microbiana (CBM), quociente microbiano, nitrato e EstCOP. Este grupo está na PC1 positiva, entre 0,1 e 0,2 e entre 0,0 e 0,1 da PC2.

Seguindo um sentido de componente diferente temos um terceiro grupo operando nos quadrantes negativos de PC2, mas com várias indicações das rotações IV e V próximos (3 e 2 respectivamente), tendo o maior número de dados agrupados, 6 de 18 dados, assim sendo pouco mais de 33% dos dados. Estes dados estão posicionados na PC1 entre 0 e 0,15 e negativos na PC2 entre -0,1 e -0,2, estando contidos na PC2 com uma relevância de 19,45% de explicação dos dados.

Figura 7 – Biplot referente a Análise de Componentes Principais (PCA) dos dados da safra de verão (índices microbiológicos, de carbono, de nitrogênio e produtivos do 1º ano de cultivo (2018-19):



Fonte: O Autor

* As siglas sobre posta são QMicrobiano (Qmicro) e Massa Fresca (MF) e também Produtividade (Prod) e Massa Seca (MS).

Por fim, temos o quarto grupo, formado por conveniência apesar das componentes estarem bastante distantes, mas ambas em direção contrária a maioria dos dados, quase sozinhos, com sinal inverso, sendo o EstCOAM e o quociente metabólico. Estes dois dados estão apontando para o hemisfério negativo da PC1 onde estão as rotações sem inserção contínua de adubos verdes.

O comportamento da PCA confirma o que foi observado nas análises individuais dos vários dados, no qual as rotações IV V e VI por aportarem grande volume de matéria orgânica diversificada, incluindo leguminosas no sistema de produção aumentaram a ciclagem de N e S e C no solo, e automaticamente interferiram nos parâmetros diretamente ligados a eles, afetando positivamente a atividade enzimática do solo, sendo que também influenciaram os dados produtivos. A maioria, 15 de 17 dados, apresentaram os valores dos índices analisados individualmente convergentes na análise PCA para as indicações destas rotações acima citadas.

Balota et al. (2014a) em estudo realizado com plantas de cobertura em rotação com soja e milho no longo prazo (23 anos em SPD com rotação de culturas) com inserção de adubos verdes obteve o mesmo comportamento, no qual os indicadores microbiológicos (CBM, RBS e enzimas), além de quociente metabólico e NBM tiveram suas maiores taxas nas rotações com presença de adubos verdes e leguminosas.

Borase et al. (2020) analisando diferentes rotações com a presença ou não de leguminosas, além do uso de fertilizantes, obteve resultados semelhantes onde a inserção de material fonte de matéria orgânica no sistema promoveu as enzimas do solo e demais índices. O autor também informa que o uso contínuo de fertilizantes minerais no ambiente agrícola pode ser prejudicial a vida no solo, fato que as rotações extrativistas do experimento (I, II e III), com maior número de cultivos com finalidade de produção de grãos, demonstram na PCA que estão com seus dados distribuídos fora do alinhamento dos índices de qualidade do solo estudados. Soma-se a isso pouca ou ausência da inserção de material vegetal diferenciado e adubos verdes.

Vários são os autores com trabalho semelhantes que demonstram o quanto a inserção de material vegetal de qualidade e em quantidade é positiva, atuando de forma a promover a microbiologia do solo e a ciclagem de nutrientes (índices de qualidade do solo), como as pesquisas de Barbieri et al. (2019), Dias et al. (2018), Acosta-Martinez e Brenner (2018), Nivelles et al. (2016), Mendes et al. (2015), McDaniel et al. (2014).

Os dados fora da região positiva de PC1 nesta PCA, formado pelo estoque de C associado aos minerais (EstCOAM) e quociente metabólicos, estão em sentido contrário a todos os demais dados de PC1 e próximo a indicadores das rotações sem adubos verdes constantemente no sistema produtivo, precisam de atenção nas próximas análises na continuidade do experimento, pois o COAM é a forma mais recalcitrante da matéria orgânica, sendo a menos afetada pela inserção de matéria orgânica no sistema, mas com o tempo de recuperação do solo e/ou adequação do uso ao longo de maiores períodos de tempo tem a tendência de acúmulo C (SOUZA et al., 2009; SÁ et al., 2013). Este comportamento do COAM explica o não alinhamento com as duas outras regiões que estão ligadas a inserção de matéria orgânica pelas rotações. Contudo a aproximação com rotações de baixa inserção de matéria orgânica é um ponto a ser verificado no comportamento dos próximos anos de análise.

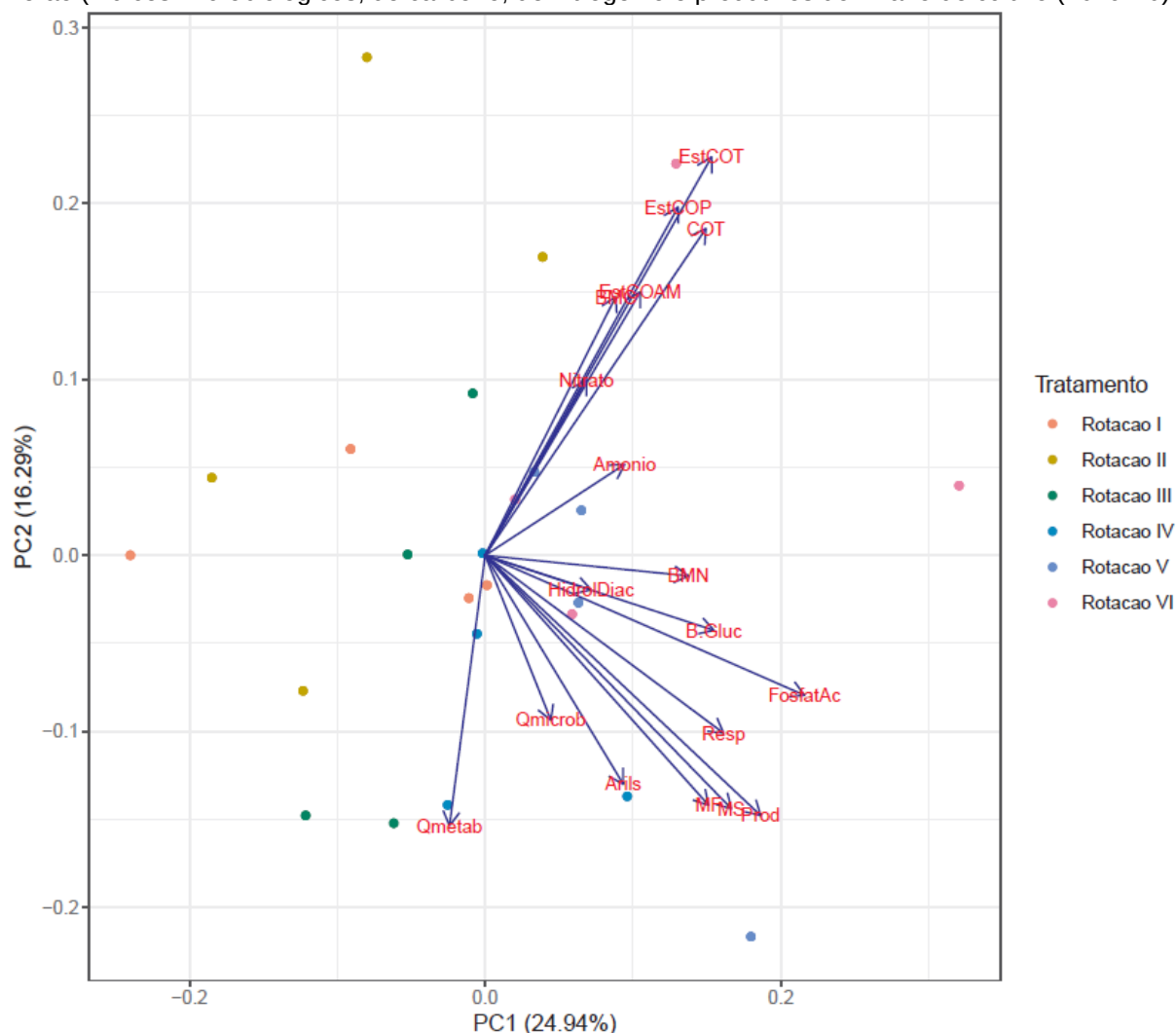
O comportamento do quociente metabólico nesta PCA decorre dos valores mais altos indicarem aos ambientes mais degradados segundo sua forma de escala, isso devido a sua forma de cálculo, a qual promove que quanto maior o dado mais temos um solo inadequado ou estressado (CASTILLO; JOERGENSEN, 2001).

Na Figura 8 no gráfico da PCA da safra 2019-20, observa-se que o primeiro componente principal (PC1) representou 24,94% e o segundo componente principal (PC2) representou 16,92% da variância dos dados originais do experimento. Desta forma as duas componentes principais (PC1 e PC2) representam cerca de 41,86% da variância original total dos dados analisados. Percebe-se um decréscimo de quase 4% em média em ambas as PCs, havendo desta forma uma redução na explicação dos dados em relação ao avaliado na safra 2018-19.

Ao analisar os dados identificou-se três comportamentos bastante distintos nesta PCA. Contudo antes dos grupamentos, temos de relatar que nesta PCA temos uma situação muito semelhante em relação a PCA da safra 2018-19, onde as indicações das rotações estão bem separadas e a separação é entre os dois grandes grupos, os com uso contínuo de adubos verdes e os sem uso contínuo, sendo que quase todos os pontos das rotações I, II e III estão na PC1 negativa, com exceção de um da rotação II. Já os pontos das rotações IV, V e VI estão também quase todos na PC1 positiva, independente da PC2, assim gerando o mesmo comportamento, com metade de um lado e metade do outro. A semelhança entre as PCAs também está presente na distribuição dos dados novamente, onde a maioria dos dados juntos as rotações com maior inserção de adubos verdes no sistema.

Na primeira área de dados identificada estão quase todos os índices relacionados a C e N, composta por todos os estoques de C, inclusive do EstCOAM, o COT, a CBM (único dado microbiológico neste grupo) e relacionado ao N temos o nitrato e o amônio, sendo este último levemente distante dos demais (menos aglutinado e com intensidade de direção menor). Este grupo ele está entre o 0,05 e 0,15 da PC1 positiva e 0,05 e 0,25 da PC2 positiva, havendo aproximadamente 39% dos dados analisados no experimento (7 de 18). Junto a este grupo de índices houve pontos de diversas rotações, principalmente as com maior uso de adubos verdes, rotações IV, V e VI.

Figura 8 – Gráfico Biplot referente a Análise de Componentes Principais (PCA) dos dados da safra de verão (índices microbiológicos, de carbono, de nitrogênio e produtivos do 2º ano de cultivo (2019-20):



Fonte: O autor

*As setas que estão sobrepostas são C da Biomassa Microbiana (CBM) e Estoque de C da fração associada aos minerais (EstCOAM)

No outro grupo de índices uma situação um pouco mais dispersa, podendo haver a formação de dois grupos a depender da localização (qual PC os contem), mas por opção será tratado como um grupo só, sendo que nele houve todo o restante dos dados (em relação ao do grupo já mencionado) com exceção do quociente metabólico. Neste grupo está presente todas as enzimas analisadas, todos os dados produtivos analisados (massas e produtividade) e todos os dados microbiológicos básicos (com exceção da CBM que está no primeiro grupo). Devido a esta conjunção de quase todos os dados microbiológicos e 50% dos dados analisados (9 de 18) cabe a opção de tratá-los todos juntos.

Este grande grupo está em um quadrante com vários pontos de rotações ligadas ao maior uso de adubos verdes, rotações IV, V e VI, estando presentes 1, 2 e 1 respectivamente pontos de cada rotação, e apenas 1 de rotações com menor uso de adubos verdes (rotação I), sendo este ponto bem na divisa com o quadrante PC1 negativo.

Ao avaliar os dois grupos, que concentram 89% dos índices de dados analisados no experimento, estes estão próximos a 9 dos 12 pontos de rotações com adubos verdes e apenas próximos a 2 pontos das rotações com menor inserção de adubos verdes, estando todos os demais pontos das rotações I, II e III nos outros quadrantes de PC1 negativo, onde temos o terceiro e último grupo, formado por apenas um índice de dado, o quociente metabólico.

De forma geral a PCA da safra 2019-20 mantém o mesmo comportamento geral da safra 2018-19, contudo com uma diferença de formação de grupos (aglutinação de índices), onde índices que antes estava, em grupos diferentes, agora estão próximos, a exemplo da arilsulfatase e quociente microbiano e a enzima diacetato no mesmo sentido de outras enzimas como a beta glucosidase e fosfatase ácida.

Nesta PCA temos a aglutinação do EstCOAM, diferente do que ocorreu na safra 2018-19, quando o mesmo estava isolado. O fato pode estar associado a presença de mesma cultura de alta produtividade em todos os tratamentos (a soja) ou mesmo a ausência de chuvas no verão 2019 e 2020 (seca histórica na região Centro Sul do Brasil) que pode ter alterado o comportamento desta fração no sistema, apesar da mesma ser muito lenta em alterações, como já comentado na PCA da safra 2018-19 segundo autores como Souza et al. (2009) e Sá et al. (2013).

Desta forma o comportamento da PCA da safra 2019-20 confirma o que foi observado nas análises individuais dos dados, no qual as rotações IV V e VI por

aportarem grande volume de matéria orgânica diversificada no sistema de produção aumentaram a ciclagem de nutrientes no sistema, afetando positivamente índices que indicam tais ações, como a atividade enzimática do solo, C no sistema e os índices produtivos.

Bini et al. (2013) em pesquisa com solos em SPD e convencional na presença de coberturas verdes no inverno ou o pousio, observaram modificações nas atividades de diversos índices microbiológicos no SPD com a presença de adubos verdes, sendo que a análise de PCA do experimento também indicou que o quadrante com os pontos na presença de adubos verdes teve os índices de dados microbiológicos e de análise de C e N juntamente a eles, fato também observado no presente estudo, demonstrado pela PCA da safra 2019-20.

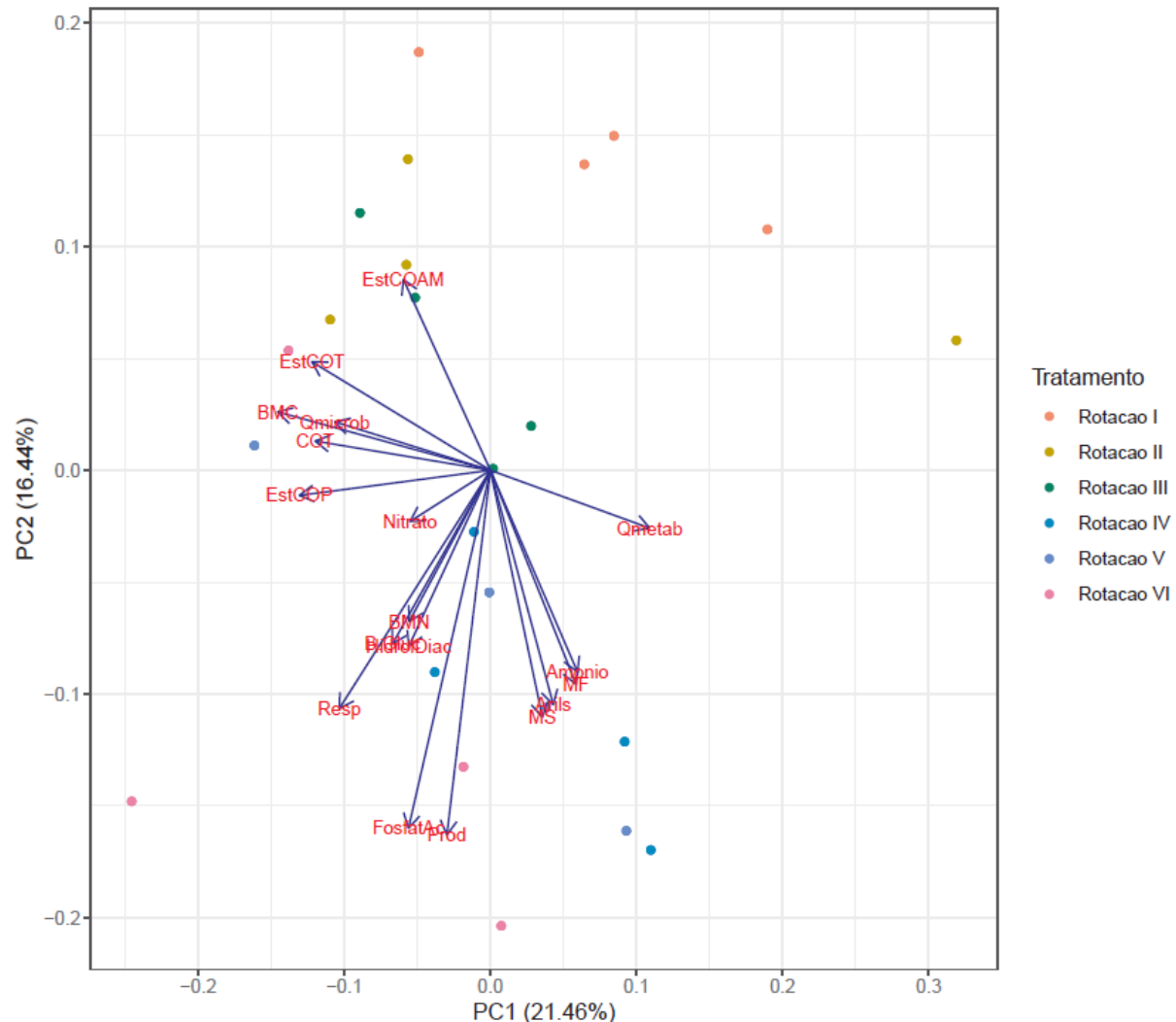
Zheng et al. (2018) comparando os sistemas convencional e SPD com rotação de culturas utilizando leguminosas obteve resultados onde os índices relativos a C e N e microbiológicos do solo (enzimas e biomassas) foram maiores no tratamento com SPD e rotação de culturas com leguminosa (ervilha), havendo também maior proliferação de bactérias ligadas a decomposição no sistema (ciclagem de nutrientes). Resultado semelhante ao encontrado na PCA da safra 2019-20.

No gráfico da PCA da safra 2020-21 (Figura 9), observa-se que o primeiro componente principal (PC1) representou 21.46% e o segundo componente principal (PC2) representou 16,44% da variância dos dados originais do experimento. Desta forma juntas as duas componentes principais (PC1 e PC2) representam cerca de 37,90% da variância original total dos dados analisados. Percebe-se um decréscimo de quase 4% na PC2 em relação à safra 2019-20, havendo de forma geral uma redução na explicação dos dados em relação as PCAs avaliadas na safra 2018-19 e 2019-20.

Percebe-se três comportamentos bastante distintos de grupamento dos dados nesta PCA, seguindo comportamento semelhante em composição e comportamento de PCAs já comentadas. O comportamento semelhante permanece também em relação a separação dos pontos das rotações, onde está todos os pontos das rotações I, II e III estão na PC2 positiva e quase todos os pontos das rotações IV, V e VI estão na PC2 negativa, independente da PC1, apenas um ponto das rotações V e da VI estão na PC2 positiva, assim gerando o mesmo comportamento, com metade das rotações de um lado (com adubos verdes continuamente) e metade do outro (sem adubação verde continuamente). A maioria dos dados estão juntos as rotações com

maior uso de adubos verdes e poucos dados estão juntos as rotações com maior uso de adubos verdes, havendo poucas exceções, e estas sendo relativas a pontos indicativos de rotações próximos ao centro da PCA.

Figura 9 – Gráfico Biplot referente a Análise de Componentes Principais (PCA) dos dados da safra de verão (índices microbiológicos, de carbono, de nitrogênio e produtivos do 2º ano de cultivo (2019-20):



Fonte: O Autor

*As signas que estão sobre posta são Hidrolase do Diaceato (HidroDiace) e também Beta Glucosidase (B.Gluc) E Arilsulfatase (Arils) e Massa Seca (MS)

Ao avaliar a PCA existe um primeiro grupo de índices de dados com quase todos os índices relacionados a C e N, onde temos o conteúdo e o estoque de C total (EstCOT) e o estoque de C da fração particulada (EstCOP), a CBM, o quociente microbiano e o nitrato, sendo este último levemente distante dos demais (menos aglutinado e com intensidade de direção menor). Este grupo ele está entre o -0,05 e -

0,15 da PC1 negativa e -0,05 e +0,05 da PC2, sendo 1/3 dos dados analisados no experimento (6 de 18) estão presentes neste grupo.

Contudo semelhante ao observado no primeiro grupo discutido na PCA da safra 2018-19, este grupo tem próximos aos seus índices poucos pontos de rotações, apenas um de cada uma das rotações VI V e II, sendo assim um grupo mais isolado, mas ainda presente a separação clara entre os hemisférios, um com as rotações com maior uso de adubos verdes e outro com rotações com pouco ou nenhum uso de adubos verdes.

No outro grupo de índices de dados capaz de ser identificado, houve uma situação novamente de um grupo disperso, mas todos localizados/contidos na PC1 com 21,46% de explicação de seus dados, sendo que nele temos as enzimas do solo, os dados produtivos (massas e produtividade) e todos os dados microbiológicos básicos (com exceção da BMC e quociente microbiano que estão no primeiro grupo). Devido a esta conjunção de quase todos os dados microbiológicos e mais de 55% dos dados analisados (10 de 18) cabe a opção de tratá-los todos juntos, apesar de estarem nitidamente em quadrantes diferentes, -0,1 a 0,1 da PC1 e -0,05 a -0,2 na PC2.

Este grande grupo está em dois quadrantes (hemisfério negativo de PC1) com muitos pontos de rotações ligadas a uso de adubação verde, rotações IV, V e VI, estando presentes 4, 3 e 3 respectivamente pontos de cada rotação, e sem nenhum ponto de rotações com poucas épocas ou sem uso de adubos verdes.

Por fim, há o terceiro grupo nesta PCA, muito semelhante ao visualizado na PCAs da safra 2018-19, formado por comportamentos isolados e distantes, o EstCOAM e o quociente metabólico, onde ambas estão indo contrárias a maioria dos dados, quase sozinhos, e apontando para rotações com pouca ou sem inserção de adubos verdes (rotações I, II e III).

De forma geral a PCA da safra 2020-21 mantém o mesmo comportamento geral da safra 2018-19 e 2019-20, havendo novamente formação de grupos com alguns índices de dados diferentes, mas bastante semelhante ao observado na PCA da safra 2019-20, com um grande grupo detendo aos índices microbiológicos e produtivos e alguns ligados ao N e outro grupo com todos os dados de C e boa parte dos relacionados a N. Contudo cabe salientar a grande mudança de orientação dos hemisférios, onde antes havia a separação no eixo PC1 entre o negativo e o positivo das posições das rotações com e sem adubos verdes e nesta PCA tivemos a PC2 realizando esta separação em seus hemisférios negativos e positivos. Por fim existe a

semelhança do isolamento do quociente metabólico e do EstCOAM nesta PCA, já visualizada na PCA da safra 2018-19, apesar de próximo a alguns grupos, mas direcionado a rotações com pouca inserção ou sem adubos verdes.

Assim a PCA da safra 2020-21 se soma aos comportamentos conexos visualizados entre as PCAs das safras anteriormente avaliadas, confirmando o comportamento das demais PCAs e também o que foi observado nas análises individuais dos dados no experimento, no qual as rotações IV, V e VI por aportarem grande volume de matéria orgânica diversificada (incluindo leguminosas e diferentes grupos vegetais) no sistema de produção aumentaram a ciclagem de nutrientes no sistema, afetando positivamente índices que indicam esta ciclagem, como a atividade enzimática do solo, C e N no sistema, além de indicar efeitos positivos sobre os índices produtivos relacionados a estas rotações.

Por fim, acreditamos ser recomendável estudos de longo prazo, com rotação de culturas e uso de adubos verdes nos sistemas produtivos em sistema de SPD, para obter resultados mais expressivos e conclusivos com relação aos indicadores microbiológicos do solo, referendando recomendações aos produtores rurais mais assertivas de manejo de seus sistemas de produção. Soma-se a tal fato que muitos dados apenas com 3 anos de medição e 4 de implantação do experimento não apresentaram diferença significativa ou apenas demonstram tendência para um X ou Y comportamento. Contudo dados microbiológicos com este pouco tempo já apresentaram sensibilidade como pode ser visto no presente trabalho.

7 CONCLUSÕES

As enzimas fosfatase ácida, beta glucosidase e urease foram as enzimas do solo que tiveram resultados significativos entre os tratamentos, demonstrando que as rotações com inserção de matéria orgânica no solo com uso de adubos verdes foram as com maiores valores nestes indicadores, (rotações IV, V e VI). Cabe destacar que as outras enzimas apresentaram tendências de diferença, como as enzimas hidrolase do diacetato e arilsulfatase, seguindo as mesmas rotações já mencionadas.

A RBS, CBM e NBM foram indicadores microbiológicos do solo que tiveram resultados significativos entre os tratamentos, demonstrando que as rotações com inserção de matéria orgânica no solo com uso de adubos verdes foram as com maiores valores nestes indicadores, (rotações IV, V e VI).

Já os estoques de carbono, quer seja o total ou das frações (EstCOP e EstCOAM) não demonstram diferença significativa em relação as diferentes rotações. Contudo o C orgânico total apresenta tendência de diferença cabendo futuras avaliações para confirmação da ocorrência.

O amônio não demonstrou diferença em relação as diferentes rotações, sendo que o nitrato precisa de futuras verificações para determinação de possíveis tendências de diferenças verificadas.

Observa-se de forma geral nas avaliações realizadas no experimento que os indicadores químicos do solo (análise de rotina, C e N) são menos sensíveis que a maioria dos indicadores microbiológicos do solo, como as biomassas, RBS e enzimas do solo, na demonstração de mudanças de manejo nos sistemas agrícolas.

Pode-se observar que as rotações com gramíneas e consorcio de espécies de adubos verdes no inverno foram as que mais deixaram palhada no sistema. As maiores produtividades também foram obtidas quando se teve uso de consorcio de adubos verdes, principalmente com a presença de leguminosas, podendo ser observado nas análises isoladas, onde na safra 2020-21 as rotações com a cultura de milho com adubos verdes no inverno com resultados superiores, rotação IV, V e VI.

Quando observado os 3 anos de análise em sequência observa-se que as enzimas betas glucosidase, atilsulfatase e fosfatase ácida, as biomassas de C e N, o amônio e o C orgânico total apresentaram variação entre os anos de experimento, tendo incremento no fim do terceiro ano em relação ao ano inicial.

REFERÊNCIAS

- ACOSTA-MARTINEZ, V.; TABATABAI, M. A. Tillage and residue management effects on arylamidase activity in soils. **Biology and Fertility Soils**, v. 34, n. 1, p. 21-24, 2001. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s003740100349#citeas>. Acesso em: 01 abr. 2023.
- ACOSTA-MARTÍNEZ, V.; TABATABAI, M. A. Phosphorus cycle enzymes. In: DICK, R. P. **Methods of soil enzymology**, 9. ed. Madison: Soil Science Society of America, p. 161-183, 2011. Disponível em: <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2136/sssabookser9.c8>. Acesso em: 01 abr. 2023.
- AGUIAR, M. I. **Qualidade física do solo em sistemas agroflorestais**. 2008. 89 f. Dissertação (Mestrado em Fertilidade do solo e nutrição de plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008. Disponível em: <https://bibliotecasemiarios.ufv.br/handle/123456789/2412>. Acesso em: 01 abr. 2023.
- AITA, C.; GIACOMINI, S. J. Matéria orgânica do solo, nitrogênio e enxofre nos diversos sistemas de exploração agrícola. In: YAMADA, T.; STIPP, S. R.; VITTI, A. G. C. **Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira**, Piracicaba: IPNI - International Plant Nutrition Institute 2007, p. 1-35.
- ALEF, K.; NANNIPIERI, P. **Methods in applied soil Microbiology and biochemistry**. Academic Press. San Diego: Harcourt Brace & Company, 1995. 576p.
- ALVES, M. S. S. **Uso de indicadores biológicos para avaliação da qualidade do solo sob cultivo de culturas agroenergéticas em Pedro Afonso**, Tocantins. 2014. 80f. Dissertação (Mestrado em Agroenergia) – Universidade Federal do Tocantins, Programa de Pós-Graduação em Agroenergia, Palmas, 2014. Disponível em: <http://umbu.uft.edu.br/handle/11612/567>. Acesso em: 01 abr. 2023.
- ANDERSON, T.; DOMSCH, K. H. The metabolic quotient for CO₂ (qCO₂) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 25, n. 3, p. 393-395, 1993. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0038071793901407>. Acesso em: 01 abr. 2023.
- ARAÚJO, A. S. F.; MONTEIRO, R. T. R. Indicadores Biológicos de Qualidade do Solo. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 23, n. 3, p. 66-75, 2007. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/6684/4403>. Acesso em: 01 abr. 2023.
- BAKER, C. J.; RIBEIRO, F.; SAXTON, K. E. Residue Handling. In: BAKER, C.J. SAXTON, K. E., **No-Tillage Seeding in Conservation Agriculture**. 2. ed. Roma: FAO - International and Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2006. p. 134-158. Disponível em: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/abs/10.1079/9781845931162.0134>. Acesso em: 01 abr. 2023.

BALOTA, E. L.; COLOZZI FILHO, A.; ANDRADE, D. S.; DICK, R. P. Long-term tillage and crop rotation effects on microbial biomass and C and N mineralization in a Brazilian Oxisol. **Soil and Tillage Research**, v. 77, n. 2, p. 137-145, 2004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167198703002526>. Acesso em: 01 abr. 2023.

BALOTA, E. L.; CALEGARI, A.; NAKATANI, A. S.; COYNE, M. S. Benefits of winter cover crops and no-tillage for microbial parameters in a Brazilian Oxisol: A long-term study. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 197, p. 31–40, dez. 2014a. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S01678809140-03703>. Acesso em: 05 abr. 2023.

BALOTA, E. L.; YADA, I. F.; AMARAL, H.; NAKATANI, A. S.; DICK, R. P.; COYNE, M. S. Long-term land use influences soil microbial biomass P and S, phosphatase and arylsulfatase activities, and S mineralization in a Brazilian oxisol. **Land Degradation & Development**, v. 25, n. 4, p. 397-406, 2014b. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S01678809140-03703>. Acesso em: 05 abr. 2023.

BALOTA, E. L. **Manejo e qualidade biológica do solo**. Londrina: Mecenass, 2017, p. 288. Disponível em: <http://www.editoramecenass.com.br/wp-content/uploads/2017/10/Sumario-Manejo-e-Qualidade-Biol%C3%B3gica-do-Solo.pdf>. Acesso em: 05 abr. 2023.

BALDOCK, J. A. Composition and cycling of organic carbon in soil. In: MARSCHNER, P.; RENGEL, Z. **Nutrient cycling in terrestrial ecosystems**. Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. p. 1-27. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/JeffreyBaldock/publication/226951073_Composition_and_Cycling_of_Organic_Carbon_in_Soil/links/553b07c30cf245bdd7645ecd/Composition-and-Cycling-of-Organic-Carbon-in-Soil.pdf. Acesso em: 05 abr. 2023.

BALDOCK, J. A.; E. BROSS, K. Soil organic matter. In: HUANG, P. M.; LI, Y. SUMNER, M. E. **Handbook of Soil Science**. 2. ed. Florida: CRC Press, 2012 p. 229.

BANDICK, A. K.; DICK, R. P. Field management effects on soil enzyme activities. Soil biology and biochemistry. **Elsevier**, v. 31, n. 11, p. 1471-1479, 1999. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038071799000516>. Acesso em: 05 abr. 2023.

BARBIERI, M.; DOSSIM, M. F.; DALLA NORA, D.; SANTOS, W. B.; BEVILACQUA, C. B.; ANDRADE, N.; BOENI, M.; DEUSCHLE, D.; JACQUES, R. J. S.; ANTONIOLLI, Z. I. Ensaio sobre a bioatividade do solo sob plantio direto em sucessão e rotação de culturas de inverno e verão. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 42, n. 1, p. 122-134, 2019. Disponível em: <https://revistas.rcaap.pt/rca/article/view/17025/13839>. Acesso em: 05 abr. 2023.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2.ed. Porto Alegre:

Metrópole, 2008. p. 7-18. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/28-8935344_Dinamica_e_funcao_da_materia_organica. Acesso em: 05 abr. 2023.

BINI, D.; SANTOS, C. A.; BERNAL, L. P. T.; ANDRADE, G.; NOGUEIRA, M. A. Identifying indicators of C and N cycling in a clayey Ultisol under different tillage and uses in winter. **Applied Soil Ecology**, v. 76, p. 95-101, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0929139314000055>. Acesso em: 05 abr. 2023.

BOLINDER, M. A.; ANGERS, D. A.; GIROUX, M.; LAVERDIÈRE, M. R. Estimating C inputs retained as soil organic matter from corn (*Zea mays* L.). **Plant Soil**, v. 215, p. 85–91, 1999. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1004765024-519>. Acesso em: 10 abr. 2023.

BOLLIGER, A.; MAGID, J.; AMADO, J. C. T.; SKÓRA NETO, F.; RIBEIRO, M. F. S., CALEGARI, A.; NEERGAARD, A. Taking stock of the Brazilian “zero-till revolution”: A review of landmark research and farmers' practice. **Advances in agronomy**, v. 91, p. 47-110, 2006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0065211306910025>. Acesso em: 10 abr. 2023.

BORASE, D. N.; NATH, C. P.; HAZRA, K. K.; SENTHILKUMAR, M.; SINGH, S. S.; PRAHARAJ, C. S.; SINGH, U.; KUMAR, N. Long-term impact of diversified crop rotations and nutrient management practices on soil microbial functions and soil enzymes activity. **Ecological Indicators**, v. 114, p. 106322, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1470160X20302594>. Acesso em: 10 abr. 2023.

BOWLES, T. M.; ACOSTA-MARTÍNEZ, V.; CALDERÓN, F.; JACKSON, L. E. Soil enzyme activities, microbial communities, and carbon and nitrogen availability in organic agroecosystems across an intensively-managed agricultural landscape. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 68, p. 252-262, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038071713003398>. Acesso em: 10 abr. 2023.

BRAZ, A. J. B. P.; KLIEMANN, H. J.; SILVEIRA, P. M. Produtividade de palhada de plantas de cobertura. In: SILVEIRA, P. M.; STONE, L. F. **Plantas de cobertura dos solos do Cerrado**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2010, p. 13-43.

BRENNAN, E. B.; ACOSTA-MARTINEZ, V. Soil microbial biomass and enzyme data after six years of cover crop and compost treatments in organic vegetable production. **Data in brief**, v. 21, p. 212-227, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352340918310886>. Acesso em: 10 abr. 2023.

BÜNEMANN, E. K.; BONGIORNO, G.; BAI, Z.; CREAMER, R. E.; DEYN, G.; GOEDE, R.; FLESKENS, L.; VIOLETTE GEISSEN, V.; KUYPER, T. W.; MÄDER, P.; PULLEMAN, M.; SUKKEL, W.; GROENIGEN, W. W.; BRUSSAARD L. Soil quality – A critical review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 120, p. 105–125, 2018. Disponível

em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038071718300294>. Acesso em: 10 abr. 2023.

CALEGARI, A. Perspectivas e estratégias para a sustentabilidade e o aumento da biodiversidade dos sistemas agrícolas com o uso de adubos verdes. In: FILHO, O. F. L.; AMBROSANO, E. J.; ROSSI, F.; CARLOS, J. A. D. **Adubação Verde e plantas de cobertura no Brasil: fundamentos e prática**. 1. ed. Brasília: Embrapa, 2014. p. 21-36.

CAMARGO, F. A. C.; GIANELLO, C.; TEDESCO, M. J.; VIDOR, C. Nitrogênio orgânico do solo. In: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2.ed. Porto Alegre: Gênese, 2008. p.117-137.

CANTARELLA, H.; MARCELINO, R. **Fontes alternativas de nitrogênio para a cultura do milho**. Informações Agrônomicas 122. Campinas: Instituto Agrônomico de Campinas, 2008. p. 12-14. Disponível em: [http://www.ipni.net/PUBLICATION/IA-BRASIL.NSF/0/BE6FE2DD8BE1F68E83257A90007D87B4/\\$FILE/Page12-14-122.pdf](http://www.ipni.net/PUBLICATION/IA-BRASIL.NSF/0/BE6FE2DD8BE1F68E83257A90007D87B4/$FILE/Page12-14-122.pdf). Acesso em: 15 abr. 2023.

CARMO, F. F.; FIGUEIREDO, C. C.; RAMOS, M. L. G.; VIVALDI, L. J.; ARAÚJO L. G. Frações granulométricas da matéria orgânica em Latossolo sob plantio direto com gramíneas. **Bioscience Journal**, v. 28, n. 3, p. 420-431, 2012. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/12351/9587>. Acesso em: 15 abr. 2023.

CARVALHO, M. A. C.; SORATTO, R. P.; ATHAYDE, M. L. F.; ARF, O.; SÁ, M. E. Produtividade do milho em sucessão a adubos verdes no sistema de plantio direto e convencional. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 39, n. 1, p. 47-53, 2004. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/WW9YFPrHF8BPmQxgqq6g3Xy/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 15 abr. 2023.

CASTILLO, X.; JOERGENSEN, R. G. Impact of ecological and conventional arable management systems on chemical and biological soil quality indices in Nicaragua. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 33, n. 12-13, p. 1591-1597, 2001. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S003807170100089X>. Acesso em: 15 abr. 2023.

CATTELAN, A. J.; GAUDÊNCIO, C. A.; SILVA, T. A. Sistemas de rotação de culturas em plantio direto e os microrganismos do solo, na cultura da soja, em Londrina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.21, p. 293-301, 1997. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/463246/1/id191270001.-pdf>. Acesso em: 15 abr. 2023.

CAZETTA, D. A.; FORNASIERI FILHO, D.; GIROTTI, F. Composição, produção de matéria seca e cobertura do solo em cultivo exclusivo e consorciado de milheto e crotalária. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 27, n. 4, p. 575-580, 2005. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/3030/303026560002.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2023.

CHANTIGNY, M. H. Dissolved and water-extractable organic matter in soils: a review on the influence of land use and management practices. **Geoderma**, v. 113, n. 3-4, p.

357-380, 2003. Disponível em: [sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016706102003701](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016706102003701). Acesso em: 15 abr. 2023.

CHEN, D.; DUAN, Y.; JIN, Y.; YANG, Y.; YUAN, L. Soil quality and microbiology in response to fertilizations in a paddy-upland rotation with multiple crops and frequent tillage. **Experimental Agriculture**, v. 56, n. 2, p. 227-238, 2020. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/journals/experimental-agriculture/article/abs/soil-quality-and-microbiology-in-response-to-fertilizations-in-a-paddyupland-rotation-with-multiple-crops-and-frequent-tillage/B6B41C0B7E8BB5C48B2F1A050D056C35>. Acesso em: 15 abr. 2023.

CLARK, A. **Managing cover crops profitably**. 3. ed. Beltsville: Sustainable Agriculture Network, 2007. 244 p. Disponível em: https://books.google.com.br/books?hl=ptBR&lr=&id=ahxLEpn6WYwC&oi=fnd&pg=PP2&dq=Managing+cover+crops+profitably&ots=aKBMm1rFQB&sig=9VXmN147PVwDBZM5UXGQ8j17rTc&redir_esc=y#v=onepage&q=Managing%20cover%20crops%20profitably&f=false. Acesso em: 20 abr. 2023.

COMISSÃO TÉCNICA SUL-BRASILEIRA DE FEIJÃO - CTSBF. Informações técnicas para o cultivo de feijão na Região Sul brasileira. 2. ed. Florianópolis: **Epagri**, 2012. 157p. Disponível em: http://docente.ifsc.edu.br/roberto.komatsu/MaterialDidatico/Agroecologia_4%C2%B0M%C3%B3duloGr%C3%A3os/Feijao/informacoes_tecnicas_cultivo_feijao.pdf. Acesso em: 20 abr. 2023.

CONCEIÇÃO, P. C.; AMADO, T. J. C.; MIELNICZUK, J.; SPAGNOLLO, E. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 5, p. 777-788, 2005. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/jSVckWPjwshTvmPKYDfdv9x/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 20 abr. 2023.

CONCEIÇÃO, P. C.; CANALLI, L. B. S.; ZIECH, A. R. D. Consórcio de Culturas. In: **Manual de Manejo e Conservação do Solo e da Água para o Estado do Paraná**, BERTOL, O. J.; COLOZZI-FILHO, A.; BARBOSA, G. M. C.; SANTOS, J. B.; GUIMARÃES, M. F. 1. Ed. Curitiba: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2019. p. 124-128.

CONCEIÇÃO, P. C.; CASSOL, C.; SARTOR, L. R.; CASALI, C. A.; MAZARO, S. M. Planta de Cobertura e Saúde do Solo. In: MEYER, M. C.; BUENI, A. F.; MAZARO, S. M.; SILVA, J. C. **Bioinsumos na cultura da soja**. Brasília: EMBRAPA, 2022. p.227-248. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/114441-4/1/-Cap-29-Bioinsumos-na-cultura-da-soja.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2023.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Perspectivas para a Agropecuária - Volume 9 - Safra 2021/2022** - Edição Grãos. Brasília: CONAB, 2021. 85 p. Disponível em: https://www.conab.gov.br/perspectivas-para-a-agropecuaria/item/download/43261_d5e11f110043a558c58406b643e0f6dd. Acesso em: 15 fev. 2022.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira - Volume 7 - Safra 2019/2020**. Primeiro Levantamento. Brasília:

CONAB, 2019. 114 p. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos/item/download/45051_a45dd0e7e0fe86-7dbcdadcf3bba85139. Acesso em: 12 maio 2020.

CORSTANJE, R.; REDDY, K. R.; PREGER, J. P.; NEWMAN, S.; OGRAM, A. V. Soil microbial eco-physiological response to nutrient enrichment in a sub-tropical wetland. **Ecological indicators**, v. 7, n. 2, p. 277-289, 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1470160X06000197>. Acesso em: 12 abr. 2023.

COSTA, F. S.; BAYER, C.; ZANATTA, J. A.; MIELNICZUK, J. Estoque de carbono orgânico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 1, p. 323-332, 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/yQBNjzjkXVPFXQ4JFYMxQ-kr/>. Acesso em: 12 abr. 2023.

CURCI, M.; PIZZIGALLO, M. D. R.; CRECCHIO, C.; MININNI, R.; RUGGIERO, P. Effects of conventional tillage on biochemical properties of soils. **Biology and Fertility of Soils**, v. 25, n. 1, p. 1-6, 1997. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s003740050271>. Acesso em: 12 abr. 2023.

DADALTO, J. P.; FERNANDES, H. C.; TEIXEIRA, M. M.; CECON, P. R.; MATOS, A. T. Sistema de preparo do solo e sua influência na atividade microbiana. **Engenharia Agrícola**, v. 35, n. 3, p. 506-513, 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/eagri/a/xpzpdpwWh9H5zQGr6tCt9vLw/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 12 abr. 2023.

DENG, S.; POPOVA, I. Carbohydrate hydrolases. In: **Methods of soil enzymology**. DICK, R. P. 9. ed. Madison: Soil Science Society of America, 2011. p. 185-209. Disponível em: https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=CpXcDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP9&dq=Methods+of+Soil+Enzymology&ots=vyfl3Yqhr_&sig=sEZY4rqUiTA3luZM0Y14we4CPlw#v=onepage&q=Methods%20of%20Soil%20Enzymology&f=false. Acesso em: 12 abr. 2023.

DENG, S. Phosphorus and selected metals and metalloids. In: GENTRY, T. J.; FUHRMANN, J. J.; ZUBERER, D. A. B. T. P. **Principles and applications of soil microbiology**. 3. ed. Amsterdam: Elsevier, 2021. p. 521-553. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128202029000198>. Acesso em: 12 abr. 2023.

DEEN, W.; MARTIN, R.; HOOKER, D.; GAUDIN, A. Crop rotation trends: past, present and future benefits and drivers. In: **Crop rotations: farming practices, monitoring and environmental benefits**. New York: Nova Science Publications, 2016. p. 35-50. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/321344765_Crop_rotation_trends_Past_present_and_future_benefits_and_drivers/citation/download. Acesso em: 12 abr. 2023.

DICK, W. A. Influence of long-term tillage and crop rotation combinations on soil enzyme activities. **Soil Science Society American Journal**, v. 48, n. 3, p. 569-574, 1984. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Warren->

Dick/publication/250126048_Influence_of_Long-Term_Tillage_and_Crop_Rotation_Combinations_on_Soil_Enzyme_Activities1/links/5877e74208aebf17d3bbc979/Influence-of-Long-Term-Tillage-and-Crop-Rotation-Combinations-on-Soil-Enzyme-Activities1.pdf. Acesso em: 20 abr. 2023.

DICK, R. P.; BREAKWELL, D. P.; TURCO, R. F. Soil enzyme activities and biodiversity measurements as integrative microbiological indicators. In: DORAN, J. W.; JONES, A. J. Methods for assessing soil quality. Madison: **Soil Science Society of America**, 1996. p. 247-272. Disponível em: <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2136/sssaspecpub49.c15>. Acesso em: 20 abr. 2023.

DICK, D. P.; NOVOTNY, E. H.; DIECKOW, J.; BAYER, C. Química da matéria orgânica do solo. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. **Química e mineralogia do solo**. Viçosa: SBCS, 2009. p. 1- 68.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, B. A.; STEWART, B. A. **Defining soil quality for a sustainable environment**. 35. ed. Madison, Soil Science Society of America, 1994. p.3-21. Disponível em: <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2136/sssaspecpub35.c1>. Acesso em: 20 abr. 2023.

EIVAZI, F.; TABATABAI, M. A. Glucosidases and galactosidases in soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 20, n. 5, p. 601-606, 1988. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0038071788901411>. Acesso em: 20 abr. 2023.

EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo. **Centro Nacional de Pesquisa de Solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1997. 212p.

ESPERANCINI, M. S. T. **Avaliação econômica de sistemas de sucessão de culturas sob condições de risco no estado de São Paulo, 2005**. 2006. Tese (Livre Docência) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu. Disponível em: <https://www.fca.unesp.br/Home/Instituicao/Departamentos/Gestaoetecnologia/teselivdoc.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2023.

FONTOURA, S. M. V.; VIEIRA, R. C. B.; BAYER, C.; VIERO, F.; ANGHINONI, I.; MORAES, R. P. **Fertilidade do solo e seu manejo em plantio direto no Centro-Sul do Paraná**. 3. ed. Guarapuava: Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária, 2015. 146 p.

FREY, B.; STEMMER, M.; WIDMER, F.; LUSTER, J.; SPERISEN, C. Microbial activity and community structure of a soil after heavy metal contamination in a model forest ecosystem. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 38, n. 7, p. 1745-1756, 2006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038071706000423>. Acesso em: 20 abr. 2023.

FRANCHINI, J. C.; COSTA, J. M.; DEBIASI, H.; TORRES, E. **Importância da rotação de culturas para a produção agrícola sustentável no Paraná**. Documentos 237. Londrina: Embrapa Soja, 2011. 52p. Disponível em:

<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/897259>. Acesso em: 20 abr. 2023.

FRANZLUEBBERS, A. J. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. **Soil and Tillage Research**. Amsterdam, v. 66, n. 2, p. 95–106, 2002. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167198702000181>. Acesso em: 20 abr. 2023.

FRANZLUEBBERS, A. J. Applied aspects of soil carbon. In: GENTRY, T. J.; FUHRMANN, J. J.; ZUBERER, D. A. B. T. P. **Principles and applications of soil microbiology**. 3. ed. Amsterdam: Elsevier, 2021. p. 363-384. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128202029000149>. Acesso em: 12 abr. 2023

FRIEDEL, J. K.; MUNCH, J. C.; FISCHER, W. R. Soil microbial properties and the assessment of available soil organic matter in a haplicluvisol after several years of different cultivation and crop rotation. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 28, n. 4-5, p. 479-488, 1996. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0038071795001883>. Acesso em: 25 abr. 2023

FUHRMANN, J. J.; ZUBERER, D. A. Carbon transformations and soil organic matter formation. In: GENTRY, T. J.; FUHRMANN, J. J.; ZUBERER, D. A. B. T. P. **Principles and applications of soil microbiology**. 3. ed. Amsterdam: Elsevier, 2021. p. 327-361. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128202029000149>. Acesso em: 12 abr. 2023.

GAMA-RODRIGUES, E. F.; GAMA-RODRIGUES, A. C. Biomassa microbiana e ciclagem de nutrientes. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2.ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p.159-170.

GEISSELER, D.; SCOW, K. M. Long-term effects of mineral fertilizers on soil microorganisms - A review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 75, p. 54-63, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038071714001187>. Acesso em: 12 abr. 2023.

GUIMARÃES, N.; GALLO, A. D. S.; FONTANETTI, A.; MENECHIN, S. P.; SOUZA, M. D.; MORINIGO, K. P.; SILVA, R. F. Biomassa e atividade microbiana do solo em diferentes sistemas de cultivo do cafeeiro. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 40, n. 1, p. 34-44, 2017. Disponível em: <https://revistas.rcaap.pt/rca/article/view/16425>. Acesso em: 25 abr. 2023.

GUPTA, V. V. S. R.; GERMIDA, James J. Microbial transformations of sulfur in soil. In: GENTRY, T. J.; FUHRMANN, J. J.; ZUBERER, D. A. B. T. P. **Principles and applications of soil microbiology**. 3. ed. Amsterdam: Elsevier, 2021. p. 489-522. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128202029000149>. Acesso em: 12 abr. 2023.

HAIDER, K.; SCHÄFFER, A. Turnover of nitrogen, phosphorus and sulfur in soils and sediments. In: HAIDER, K.; SCHÄFFER, A. **Soil Biochemistry**. 1. ed. Boca Raton: Science Publishers, 2009. p. 49-75. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9780367807047/soil-biochemistry-haider-andreas-sch%C3%A4ffer>. Acesso em: 30 abr. 2023.

HASAN, H. A. H. Ureolytic microorganisms and soil fertility: A review. **Communications in soil science and plant analysis**, v. 31, n. 15-16, p. 2565-2589, 2000. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/0010-3620009370609>. Acesso em: 30 abr. 2023.

HUNGRIA, M.; FRANCHINI, C.; BRANDÃO-JUNIOR, O.; KASCHUK, G.; SOUZA, R. A. Soil microbial activity and crop sustainability in a long-term experiment with three soil-tillage and two crop-rotation systems. **Applied Soil Ecology**, v. 42, n. 3, p. 288-296, 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0929139309001036>. Acesso em: 30 abr. 2023.

IDR-Paraná - Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná. **Projeto Feijão e Milho Centro-Sul – Safra 2020/2021**. 2020. Disponível em: <https://www.idrparana.pr.gov.br/Pagina/Centro-Sul-Feijao-e-Milho>. Acesso em: 16 maio 2022.

JANZEN, H. H.; KUCEY, R. M. N. C. N, and S mineralization of crop residues as influenced by crop species and nutrient regime. **Plant and soil**, v. 106, n. 1, p. 35-41, 1988. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02371192>. Acesso em: 30 abr. 2023.

JENKINSON, D. S.; POWLSON, D. S. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil—V: A method for measuring soil biomass. **Soil biology and Biochemistry**, v. 8, n. 3, p. 209-213, 1976. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0038071776900055>. Acesso em: 30 abr. 2023.

JUNIOR, A. A. B.; Yokoyama, A. H.; Ribeiro, R. H.; Franchini, J. C.; Debiasi, H.; Zucareli, C. Teores de nitrato e amônio no solo em função de culturas de entressafra da soja e adubação nitrogenada. **Colloquium Agrariae**. v. 15, n. 5, p. 77-87, 2019. Disponível em: <https://revistas.unoeste.br/index.php/ca/article/view/2817/2829>. Acesso em: 30 abr. 2023.

KANDELER, E.; TSCHERKO, D.; SPIEGEL, H. Long-term monitoring of microbial biomass, N mineralisation and enzyme activities of a Chernozem under different tillage management. **Biology and Fertility of Soils**, v. 28, n. 4, p. 343-351, 1999. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s003740050502>. Acesso em: 30 abr. 2023.

KANDELER, E.; POLL, C.; FRANKENBERGER JR., W. T.; TABATABAI, M. A. Nitrogen cycle enzymes. In: **Methods of soil enzymology**. DICK, R. P. 9. ed. Madison: Soil Science Society of America, 2011, p. 211-245. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=CpXcDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP9&dq=Methods+of+Soil+Enzymology&>

ots=vyfl3Yqhr_&sig=sEZy4rqUiTA3luZM0Y14we4CPlw#v=onepage&q=Methods%20of%20Soil%20Enzymology&f=false. Acesso em: 12 abr. 2023.

KASSAM, A.; BASCH, G.; FRIEDRICH, T.; SHAXSON, F.; GODDARD, T.; AMADO, T. J. C.; CRABTREE B.; HONGWEN, L.; MELLO, I.; PISANTE, M.; MKOMWA, S. Sustainable Soil Management Is More than What and How Crops Are Grown. In: LAL, R.; STEWART, B. A. **Principles of Sustainable Soil Management in Agroecosystems**. Boca Raton: CRC Press, 2013. p. 337. Disponível em: https://ibn.idsi.md/vizualizare_articol/147405. Acesso em: 30 abr. 2023.

KLOSE, S.; BILEN, S.; TABATABAI, M. A.; DICK, W. A. Sulfur cycle enzymes. In: **Methods of soil enzymology**. DICK, R. P. 9. ed. Madison: Soil Science Society of America, 2011. p. 125-159. Disponível em: https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=CpXcDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP9&dq=Methods+of+Soil+Enzymology&ots=vyfl3Yqhr_&sig=sEZy4rqUiTA3luZM0Y14we4CPlw#v=onepage&q=Methods%20of%20Soil%20Enzymology&f=false. Acesso em: 12 abr. 2023.

KLOSE, S.; TABATABAI, M. A. Urease activity of microbial biomass in soils as affected by cropping systems. **Biology and fertility of soils**, v. 31, n. 3, p. 191-199, 2000. Disponível em: https://ibn.idsi.md/vizualizare_articol/147405. Acesso em: 30 abr. 2023.

KLIEMANN, H. J.; BRAZ, A. J. B. P.; SILVEIRA, P. M. Decomposição de palhada de plantas de cobertura. In: SILVEIRA, P. M., STONE, L. F. **Plantas de cobertura dos solos do Cerrado**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2010. p. 13-43. Disponível em: <http://livimagens.sct.embrapa.br/amostras/00051970.pdf>. Acesso em: 30 abr. 2023.

KUMAR, S.; VARMA, A. Role of enzymes in maintaining soil health. In: SHUKLA, G.; VARMA, A. **Soil enzymology**. 22. ed. Berlim: Springer Heidelberg, 2010. p. 25-42. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-14225-3_2. Acesso em: 30 abr. 2023.

LAL, R. Sequestering carbon and increasing productivity by conservation agriculture. **Journal of soil and water conservation**, v. 70, n. 3, p. 55A-62A, 2015. Disponível em: <https://www.jswnonline.org/content/70/3/55A.short>. Acesso em: 30 abr. 2023.

LI, F.; XUE, C.; QIU, P.; LIU, Y.; SHI, J.; SHEN, B.; YANG, X.; SHEN, Q. Soil aggregate size mediates the responses of microbial communities to crop rotation. **European Journal of Soil Biology**, v. 88, p. 48-56, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S116455631830164X>. Acesso em: 30 abr. 2023.

LIANG, B. C.; ARUNA, H.; MA, B. L. Carbon footprints in crop rotation systems. In: MA, B. **Crop rotations farming practices, monitoring and environmental benefits**. New York: Nova Science Publishers, 2016. p. 157-176. Disponível em: <https://novapublishers.com/shop/crop-rotations-farming-practices-monitoring-and-environmental-benefits/>. Acesso em: 30 abr. 2023.

LISBOA, B. B.; VARGAS, L. K.; SILVEIRA, A. O.; MARTINS, A. F.; SELBACH, P. A. Indicadores microbianos de qualidade do solo em diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 1, p. 33-44, 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/BqfJddJP4fLkbCVdqPjyRZM/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 30 abr. 2023.

LISBOA, B. B.; VARGAS, L. K.; ABICHEQUER, A. D.; CAMARGO, F. A. O.; SELBACH, P. A. Biomassa microbiana, atividade e diversidade metabólica em um Argissolo sob diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v. 18, n. 2, p. 136-144, 2012. Disponível em: <http://revistapag.agricultura.rs.gov.br/ojs/index.php/revistapag/article/view/139>. Acesso em: 30 abr. 2023.

LOEPPMANN, S.; SEMENOV, M.; BLAGODATSKAYA, E.; KUZYAKOV, Y. Substrate quality affects microbial-and enzyme activities in rooted soil. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 179, n. 1, p. 39-47, 2016. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/jpln.201400518>. Acesso em: 30 abr. 2023.

LOPES, A. A. C.; SOUSA, D. M. G.; CHAER, G. M.; REIS JUNIOR, F. B.; GOEDERT, W.; MENDES, I. C. Interpretation of Microbial Soil Indicators as a Function of Crop Yield and Organic Carbon. **Soil Science Society of America Journal**, v. 77, n. 2, p. 461-472, 2013. Disponível em: <https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.2136/sssaj2012.0191>. Acesso em: 30 abr. 2023.

LOPES, A. A. C.; SOUSA, D. M. G.; REIS JÚNIOR, F. B.; FIGUEIREDO, C. C.; MALAQUIAS, J. V.; SOUZA, L. M.; MENDES, I. C. Temporal variation and critical limits of microbial indicators in oxisols in the Cerrado, Brazil. **Geoderma Regional**, v. 12, n. 1, p. 72-82, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S235200941730130X>. Acesso em: 30 abr. 2023.

MA, B. L.; WU, W. Crop productivity and environment impact in a maize-legume rotation system: A review. In: **Crop Rotations: Farming Practices, Monitoring and Environmental Benefits**. New York: Nova Science Publisher Inc., 2016. P. 1-13. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/326031951_Crop_productivity_and_environment_impact_in_a_maize-legume_rotation_system_A_review. Acesso em: 30 abr. 2023.

MARSCHNER, P. Plant-microbe interactions in the rhizosphere and nutrient cycling. In: MARSCHNER, P.; RENGEL, Z. **Nutrient cycling in terrestrial ecosystems**. Berlin: Springer Heidelberg, 2007. p. 159-182. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-540-68027-7#page=175>. Acesso em: 30 abr. 2023.

MATSUOKA, M.; MENDES, I.C.; LOUREIRO, M.F. Biomassa microbiana e atividade enzimática em solos sob vegetação nativa e sistemas agrícolas anuais e perenes na região de Primavera do Leste (MT). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 425-433, 2003. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/JcLp9YmwNS3k6KdwxbpFmw/?lang=pt>. Acesso em: 30 abr. 2023.

MATSUOKA, M. **Atributos biológicos de solos cultivados com videira na região da serra gaúcha**. 2006. Tese (Doutorado em Ciências do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/10089>. Acesso em: 20 abr. 2023.

MBUTHIA, L., ACOSTA-MARTINEZ, V., DEBRYUN, J., SCHAEFFER, S., TYLER, D., ODOI, E., MPHESHEA, M., WALKER, F., EASH, N. Long term tillage, cover crop, and fertilization effects on microbial community structure, activity: Implications for soil quality. **Soil Biology and Biochemistry**. v. 89., p. 24-34, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038071715002217>. Acesso em: 05 maio. 2023.

MCDANIEL, M. D.; TIEMANN, L. K.; GRANDY, A. S. Does agricultural crop diversity enhance soil microbial biomass and organic matter dynamics? A meta-analysis. **Ecological Applications**, v. 24, n. 3, p. 560-570, 2014. Disponível em: <https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1890/13-0616.1>. Acesso em: 05 maio. 2023.

MELLONI, R. Quantificação microbiana da qualidade do solo. In: SILVEIRA, A.P.D.; FREITAS, S. S. **Microbiota do solo e qualidade ambiental**. Campinas: São Paulo, 2007. p.193-210.

MENDES, I. C.; CUNHA, M. H.; REIS JUNIOR, F. B.; FERNANDES, M. F.; CHAER, G. M.; MERCANTE, F. M.; ZILLI, J. E. **Bioindicadores para avaliação da qualidade dos solos tropicais: utopia ou realidade?**. Documentos 246. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2009. 31p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/661591>. Acesso em: 05 maio. 2023.

MENDES, I. C.; SOUSA, D. M. G.; REIS-JUNIOR, F. B. Bioindicadores de qualidade de solo: dos laboratórios de pesquisa para o campo. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 32, n. 1/2, p. 185-203, 2015. Disponível em: <https://seer.sct.embrapa.br/index.php/cct/article/viewFile/23311/13164>. Acesso em: 05 maio. 2023.

MENDES, I. C.; SOUSA, D. M. G.; REIS-JUNIOR, F. B.; LOPES, A. A. C. **Bioanálise de solo: como acessar e interpretar a saúde do solo**. Circular Técnica 38. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2018. 23 p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1110832>. Acesso em: 05 maio. 2023.

MENDES, I. C., CHAER, G. M., REIS-JUNIOR, F. B., DANTAS, O. D., OLIVEIRA, M. I. L., LOPES, A. A. C., SOUZA, L. M. Saúde do solo, tecnologia BioAS e a sustentabilidade agrícola. In: MEYER, M. C.; BUENO, A. F.; MAZARO, S. M.; SILVA, J. C. **Bioinsumos na cultura da soja**. Brasília: EMBRAPA, 2022. p.249-267. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1143066-/bioinsumos-na-cultura-da-soja>. Acesso em: 20 abr. 2023.

MILINDRO, I. F.; RODRIGUES, R. A. A.; SANTOS, M. K. A.; SANTOS, V. B. Atributos químicos como indicadores de qualidade do solo sob manejo agroecológico. **Cadernos de Agroecologia**, Belém, v. 10, n. 3, p. 1-5, out. 2016. Disponível em: <https://revistas.aba-agroecologia.org.br/cad/article/view/18983>. Acesso em: 05 maio. 2023.

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M.A.; BLOCH, M.F. Análise química de tecido vegetal. Londrina: **Instituto Agrônômico do Paraná**, 1992. 17p. (IAPAR Circular, 74).

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

MU-CHUN, Y.; TING-TING, X.; PENG-HUI, S.; JIAN-JUI, D. Effects of different cropping patterns of soybean and maize seedlings on soil enzyme activities and MBC and MBN. **Journal of Northeast Agricultural University**, v. 19, n. 4, p. 42-47, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S10068104136-00495>. Acesso em: 05 maio. 2023.

MURPHY, B. W. Soil Organic Matter and Soil Function—Review of the Literature and Underlying Data. Australia, Canberra: **Department of the Environment**, p.155, 2014. Disponível em: https://ecaf.org/wp-content/uploads/2021/02/Soil_Organic_Matter-Brian_Murphy.pdf. Acesso em: 05 maio. 2023.

MYROLD, D. D. Transformations of nitrogen. In: GENTRY, T. J.; FUHRMANN, J. J.; ZUBERER, D. A. B. T. P. **Principles and applications of soil microbiology**. 3. ed. Amsterdam: Elsevier, 2021. p. 385-421. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B97801282029000149>. Acesso em: 12 abr. 2023.

NANNIPIERI, P.; GIAGNONI, L.; RENELLA, G.; PUGLISI, E.; CECCANTI, B.; MASCIANDARO, G.; FORNASIER, F.; MOSCATELLI, M. C.; MARINARI, S. Soil enzymology: classical and molecular approaches. **Biology and fertility of soils**, v. 48, n. 7, p. 743-762, 2012. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00374-012-0723-0>. Acesso em: 12 maio. 2023.

NIELSEN, M. N.; WINDING, A. **Microorganisms as indicators of soil health**. Roskilde: National Environmental Research Institute, 2002. 84 p. Disponível em: <https://www.sciencetheearth.com/uploads/2/4/6/5/24658156/microbes-indicator-soil-health.pdf>. Acesso em: 12 maio. 2023.

NIVELLE, E.; VERZEAUX, J.; HABBIB, H.; KUZYAKOV, Y.; DECOCQ, G.; ROGER, D.; LACOUX, J.; DUCLERCQ, J.; SPICHER, F.; NAVA-SAUCEDO, E. J.; CATTEROU, M.; DUBOIS F.; TETU, T. Functional response of soil microbial communities to tillage, cover crops and nitrogen fertilization. **Applied Soil ecology**, v. 108, p. 147-155, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0929139316-302190>. Acesso em: 12 maio. 2023.

NOVOTNY, E. H.; MARTIN-NETO, L. Propriedades coloidais da matéria orgânica. In: SANTOS, G. de A.; SILVA, L. S. da; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2.ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p. 27-43.

NUNES, M. R.; VAN ES, H. M.; SCHINDELBECK, R.; RISTOW, A. J.; RYAN, M. No-till and cropping system diversification improve soil health and crop yield. **Geoderma**, v. 328, p. 30-43, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016706118300077>. Acesso em: 12 maio. 2023.

PACHECO, V. L.; COLLA, L. M. A enzima urease e suas aplicações na agricultura e engenharia. **Revista CIATEC-UPF**, v. 11, n. 2, p. 1-21, 2019. Disponível em: <https://web.s.ebscohost.com/abstract?direct=true&profile=ehost&scope=site&authtype=crawler&jrnl=21764565&AN=138427208&h=nR%2fDhT%2fRJrwgQ%2fGuMJfnH5WSQ%2fPs%2fXVqD1z%2f3Mg2retLGCiNQtdmzCKM0pcO2r4cgxZK%2f9khSeqzIXjScqiYWw%3d%3d&crl=c&resultNs=AdminWebAuth&resultLocal=ErrCrINotAuth&crlh=ashurl=login.aspx%3fdirect%3dtrue%26profile%3dehost%26scope%3dsite%26authtype%3dcrawler%26jrnl%3d21764565%26AN%3d138427208>. Acesso em: 30 abr. 2023.

PAULETTI, V.; MOTTA, A. C. V.; MOREIRA, A.; COSTA, A.; CASSOL, L. C.; ZANÃO JÚNIOR, L. A.; BATISTA, M. A.; MÜLLER, M. M. L.; HAGER, N. (Ed.). **Manual de adubação e calagem para o Estado do Paraná**. Curitiba: SBCS: NEPAR, 2017. 482p.

PAVAN, M. A.; BLOCH, M. F. M.; ZEMPULSKI, H. C.; MYAZAWA, M.; AND ZOCOLER, D. C., 1992. **Manual de Análise Química de Solo e Controle de Qualidade**. Londrina: Instituto Agrônomo do Paraná - IAPAR, 40 p.

PEIXOTO, R. S.; CHAER, G. M.; FRANCO, N.; REIS JUNIOR, F. B. dos; MENDES, I. C.; ROSADO, A. S. A decade of land use contributes to changes in the chemistry, biochemistry and bacterial community structures of soils in the Cerrado. **Antonie van Leeuwenhoek**, v. 98, n. 3, p. 403-413, 2010. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10482-010-9454-0>. Acesso em: 12 maio. 2023.

PIAZZA, G.; PELLEGRINO, E.; MOSCATELLI, M. C.; ERCOLI, L. Long-term conservation tillage and nitrogen fertilization effects on soil aggregate distribution, nutrient stocks and enzymatic activities in bulk soil and occluded microaggregates. **Soil and Tillage Research**, v. 196, p. 104482, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S016719871930100X>. Acesso em: 12 maio. 2023.

PROSSER, J. A.; SPEIR, T. W.; STOTT, D. E. Soil oxidoreductases and FDA hydrolysis. In: **Methods of soil enzymology**. DICK, R. P. 9. ed. Madison: Soil Science Society of America, 2011. p. 103-124. Disponível em: https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=CpXcDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP9&dq=Methods+of+Soil+Enzymology&ots=vyfl3Yqhr_&sig=sEZy4rqUiTA3luZM0Y14we4CPlw#v=onepage&q=Methods%20of%20Soil%20Enzymology&f=false. Acesso em: 12 abr. 2023.

QIN, S.; HU, C.; HE, X.; DONG, W.; CUI, J.; WANG, Y. Soil organic carbon, nutrients and relevant enzyme activities in particle-size fractions under conservational versus traditional agricultural management. **Applied Soil Ecology**, v. 45, n. 3, p. 152-159, 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0929139310000491>. Acesso em: 12 maio. 2023.

RAO, M. A.; SCELZA, R.; ACEVEDO, F.; DIEZ, M.C.; GIANFREDA, L. Enzymes as useful tools for environmental purposes. **Chemosphere**, v. 107, p. 145–162, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653513017244>. Acesso em: 12 maio. 2023.

REICOSKY, D. C.; SAXTON, K. E. The Beneficts of No-Tillage. In: BAKER, C. J.; SAXTON, K. E. **No-Tillage Seeding in Conservation Agriculture**. 2. ed. Roma: FAO - International and Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2007 p. 11-20. Disponível em: <https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/50600000/Products-Reprints/2007/1381.pdf>. Acesso em: 12 maio. 2023.

RESCK, D. V. S.; FERREIRA, E. A. B.; FIGUEIREDO, C. C.; ZINN, Y. L., Dinâmica da Matéria Orgânica no Cerrado. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P. & CAMARGO, F. A. O., eds. **Fundamentos da matéria orgânica do solo ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2.ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p.159-170

RINCON-FLOREZ, V. A.; DANG, Y. P.; CRAWFORD, M. H.; SCHENK, P. M.; CARVALHAIS, L. C. Occasional tillage has no effect on soil microbial biomass, activity and composition in Vertisols under long-term no-till. **Biology and Fertility of Soils**, v. 52, n. 2, p. 191-202, 2016. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00374-015-1066-4>. Acesso em: 12 maio. 2023.

ROLDAN, A.; CARAVACA, F.; HERNÁNDEZ, M. T.; GARCÍA, C.; SÁNCHEZ-BRITO, S. No-tillage, crop residue addition, and legume cover cropping effects on soil quality characteristics under maize in Patzcuaro watershed (Mexico). **Soil Tillage Research**, v. 72, n. 1, p. 65-73, 2003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167198703000515>. Acesso em: 12 maio. 2023.

ROSCOE, R.; MADARI, B. E.; MACHADO, P. L. O. A. Fracionamento físico do solo na obtenção de compartimentos mensuráveis para uso em simuladores da dinâmica da matéria orgânica. In: ROSCOE, R.; MERCANTE, F.M.; SALTON, J.C. (Ed.). **Dinâmica da matéria orgânica do solo em sistemas conservacionistas: modelagem matemática e métodos auxiliares**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2006. p.107-132.

SÁ, João Carlos de Moraes. **Dinâmica da matéria orgânica do solo em sistemas de manejo convencional e plantio direto**. 2001. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas). Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11140/tde-20200111-152646/publico/SaJoaoCarlosMoraes.pdf>. Acesso em: 12 maio. 2023.

SÁ, J. C. M.; SANTOS, J. B.; LAL, R.; MORAES, A.; TIVET, F.; SÁ, M. F. F.; BRIEDIS, C.; FERREIRA A. O.; EURICH, G.; FARIAS, A.; FRIEDRICH, T. Soil-specific inventories of landscape carbon and nitrogen stocks under no-till and Native vegetation to estimate carbon offset in a subtropical ecosystem. **Soil Science Society of America Journal**, v. 77, n. 6, p. 2094-2110, 2013. Disponível em: <https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.2136/sssaj2013.01.0007>. Acesso em: 17 maio. 2023.

SÁ, J. C. M., SANTOS, J. B., CANALLI, L. B. S., INAGAKI, T. M., GONÇALVES, D. R. P., ROMANIW, J. FERREIRA, A. O., BRIEDIS, C. Manejo da Matéria Orgânica do Solo (Cobertura Morta). In: BERTOL, O. J., COLOZZI-FILHO, A., BARBOSA, G. M. C., SANTOS, J. B., GUIMARÃES, M. F. **Manual de Manejo e Conservação do Solo e da Água para o Estado do Paraná**. 1. Ed. Curitiba: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2019. p124-128.

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; FABRICIO, A. C.; MACEDO, M. C. M.; BROCH, D. L.; BOENI, M.; CONCEIÇÃO, P. C. **Matéria orgânica do solo na integração lavoura-pecuária em Mato Grosso do Sul**. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 29. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2005. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/15437486.pdf>. Acesso em: 17 maio. 2023.

SANTOS, H. P.; REIS, E. M. **Rotação de culturas em plantio direto**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2001.

SCOPEL, E.; TRIOMPHE, B.; AFFHOLDER, F.; SILVA, F. A. M.; CORBEELS, M.; XAVIER, J. H. V.; LAHMAR, R.; RECOUS, S.; BERNOUX, M.; BLANCHART, E.; MENDES, I. C.; TOURDONNET, S. Conservation agriculture cropping systems in temperate and tropical conditions, performances and impacts. A review. **Agronomy for sustainable development**, v. 33, n. 1, p. 113-130, 2013. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13593-012-0106-9>. Acesso em: 17 maio. 2023.

SILVA, P. C. M.; CHAVES, L. H. G. Avaliação e variabilidade espacial de fósforo, potássio e matéria orgânica em Alissolos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 03, p. 431-436, 2001. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/SR4CCcZk4mcGJcCKVMKy6xw/?lang=pt&format=html>. Acesso em: 17 maio. 2023.

SILVA, D. B.; GUERRA, A. F.; SILVA, A. C.; PÓVOA, J. S. R. **Avaliação de genótipos de mourisco na região do cerrado**. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 21. Brasília: Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, 2002. 20 p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/174899/1/bp021.pdf>. Acesso em: 17 maio. 2023.

SILVA, I. R.; MENDONÇA, E. S. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.275-374.

SILVA, A. P.; FRANCHINI, J. C.; BABUJIA, L. C.; SOUZA, R. A.; HUNGRIA, M. Microbial biomass under diferente soil and crop managements in short-to long-term experiments performed in Brazil. **Field Crops Research**, v.119, n. 1, p.20-26, 2010. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/223018749_Microbial_biomass_under_various_soil-and_crop-management_systems_in_short-and_long-term_experiments_in_Brazil. Acesso em: 22 maio. 2023.

SILVA, R. R.; SILVA, M. L. N.; CARDOSO, E. L.; MOREIRA, F. M. D. S.; CURI, N.; ALOVISI, A. M. T. Biomassa e atividade microbiana em solo sob diferentes sistemas de manejo na região fisiográfica Campos das Vertentes-MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1584-1592, 2010. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/7yR7dzVHKWywBNhLkJphLjz/?lang=pt&format=html>. Acesso em: 22 maio. 2023.

SINGH, B.; RENGEL, Z. The role of crop residues in improving soil fertility. In: MARSCHNER, P.; RENGEL, Z. **Nutrient Cycling in Terrestrial Ecosystems**. v. 10. Germany: Springer Berlin Heidelberg, 2007, p. 183–214. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-540-68027-7#page=199>. Acesso em: 10 abr. 2023.

SINSABAUGH, Robert L. Phenol oxidase, peroxidase and organic matter dynamics of soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 42, n. 3, p. 391-404, 2010.

SILVA, M. O.; SANTOS, M. P.; SOUSA, A. C. P.; SILVA, R. L. V.; MOURA, I. A. A.; SILVA, R. S.; COSTA, K. D. S. Qualidade do solo: Indicadores biológicos para um manejo sustentável. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 1, p. 6853-6875, 2021. Disponível em: https://www.brazilianjournals.com/ojs/index.php/BRJD/article/download/23374/18778?__cf_chl_tk=kaR79JGRCE03UIEbKsq5Tn8B8aobC.3Foi6taGiR4yw-1696092727-0-gaNycGzNDJA. Acesso em: 22 maio. 2023.

SIQUEIRA NETO, M.; PICCOLO, M. C.; VENSKE FILHO, M. P.; FEIGL, B. J.; CERRI, C. C. Mineralização e desnitrificação do nitrogênio no solo sob sistema plantio direto. **Bragantia**, v. 69, n. 4, p. 923-936, 2010. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/brag/a/bJVHKxBD8ckYthSvYRYZfGv/>. Acesso em: 22 maio. 2023.

SHAH, K. K.; MODI, B.; PANDEY, H. P.; SUBEDI, A.; ARYAL, G.; PANDEY, M.; SHRESTHA, J. Diversified crop rotation: an approach for sustainable agriculture production. **Advances in Agriculture**, v. 2021, p. 1-9, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/brag/a/bJVHKxBD8ckYthSvYRYZfGv/>. Acesso em: 22 maio. 2023.

SHI, W. Agricultural and ecological significance of soil enzymes: soil carbon sequestration and nutrient cycling. In: SHUKLA, G.; VARMA, A. **Soil enzymology**. v. 22. Berlim: Springer Heidelberg, 2010. p. 43-60. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/aag/2021/8924087/>. Acesso em: 22 maio. 2023.

SHI, W.; ZHAO, H. Y.; CHEN, Y.; WANG, J. S.; HAN, B.; LI, C. P.; LU, J.; ZHANG, L. M. Organic manure rather than phosphorus fertilization primarily determined asymbiotic nitrogen fixation rate and the stability of diazotrophic community in an upland red soil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 319, p. 107535, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167880921002395>. Acesso em: 22 maio. 2023.

SLAUGHTER, L. Rhizosphere. In: GENTRY, T. J.; FUHRMANN, J. J.; ZUBERER, D. A. B. T. P. **Principles and applications of soil microbiology**. 3. ed. Amsterdam: Elsevier, 2021. p. 269-301. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128202029000149>. Acesso em: 12 abr. 2023.

SOUZA, E. D.; COSTA, S. E. V. G. A.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. F.; ANDRIGUETI, M.; CAO, E. Estoques de carbono orgânico e de nitrogênio no solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto, submetido a intensidades de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 6, p. 1829-1836, 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/w5kQnGKqVwNDysfSGTNSNhtJ/?lang=pt>. Acesso em: 27 maio. 2023.

SOUZA, E. D.; COSTA, S. E. V. G. A.; ANGHINONI, I.; LIMA, C. V. S. D.; CARVALHO, P. C. F.; MARTINS, A. P. Biomassa microbiana do solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto, submetido a intensidades de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 34, n. 1, p. 79-88, 2010. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/srPtcWvTfNh7N6gCfLc86XB/>. Acesso em: 27 maio. 2023.

SPARLING, G. P. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter. **Australian Journal of Soil Research**, v.30, p.195-207, 1992. Disponível em: <https://www.publish.csiro.au/sr/SR9920195>. Acesso em: 27 maio. 2023.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. Plantas de cobertura dos solos do **cerrado**. Santo Antônio de Goiás: **Embrapa** Arroz e Feijão, 2010. p. 113-145.

TABATABAI, M. A.; BREMNER, J. M. Arylsulfatase activity of soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 34, n. 2, p. 225-229, 1970. Disponível em: <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2136/sssaj1970.03615995003400020016x>. Acesso em: 27 maio. 2023.

TABATABAI, M. A. Soil Enzymes. In: PAGE, A. L. **Methods of Soil Analysis Part 2: Chemical and Microbiological Properties**. Madison: American Society of Agronomy, 1982. p. 903-947. Disponível em: <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c43>. Acesso em: 27 maio. 2023.

TABATABAI, M. A. Soil enzymes. In: WEAVER, R. W.; ANGLE, S.; BOTTOMLEY, P.; BEZDICEK, D.; SMITH, S.; TABATABAI, A.; WOLLUM, A. **Methods of Soil Analysis Part 2: Microbiological and Biochemical Properties**. Madison: American Society of Agronomy, 1994. p. 775-833. Disponível em:

<https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2136/sssabookser5.2.c37>. Acesso em: 27 maio. 2023.

TASCA, F. A.; ERNANI, P. R.; ROGERI, D. A.; GATIBONI, L. C.; CASSOL, P. C. Volatilização de amônia do solo após a aplicação de ureia convencional ou com inibidor de urease. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 2, p. 493-502, 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/sLFYvMczLq4rf95RKL6YdTJ/>. Acesso em: 01 jun. 2023.

TEDESCO, M. J.; SELBACH, P. A.; GIANELLO, C.; CAMARGO, F. A. O. Resíduos orgânicos no solo e os impactos no ambiente. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F.A.O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2 Ed., revisada e atualizada. Porto Alegre: Metrópole, p. 113-135, 2008.

TATE, R. L. **Soil microbiology**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 2020. Disponível em: https://books.google.com.br/books?hl=ptBR&lr=&id=E48BEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP15&dq=TATE+III,+Robert+L.+Soil+microbiology&ots=a5yjglrYod&sig=wR4QYi wZVEmZ4lQzsAo077njw70&redir_esc=y#v=onepage&q=TATE%20III%2C%20Robert%20L.%20Soil%20microbiology&f=false. Acesso em: 01 jun. 2023.

TORRES, J. L. R.; PEREIRA, M. G.; ANDRIOLI, I.; POLIDORO, J. C.; FABIAN, A. J. Decomposição e liberação de nitrogênio de resíduos culturais de plantas de cobertura em um solo de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 4, p. 609-618, 2005. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/3QSGJYKdF9G3TjDwmW-Z5LNF/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 01 jun. 2023.

TRASAR-CEPEDA, C.; LEIRÓS, M. C.; GIL-SOTRES, F. Hydrolytic enzyme activities in agricultural and forest soils. Some implications for their use as indicators of soil quality. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 40, n. 9, p. 2146-2155, 2008. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038071708001247>. Acesso em: 01 jun. 2023.

UNGER, P. W.; BLANCO-CANQUI, H. Conservation tillage. In: Huang, P. M.; Li, Y. Sumner, M. E. **Handbook of Soil Science**, 2. ed. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2012. P. 25.1-25.31. Disponível em: <https://www.routledgehandbooks.com/pdf/doi/10.1201/b11268-29>. Acesso em: 01 jun. 2023.

USDA – UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Soil Quality Indicator Sheet – Soil Enzymes**. 2010. 2 p. Disponível em: <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2023-01/Soil%20Quality-Soil%20Enzymes.pdf>. Acesso em: 01 jun. 2023.

USDA – UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Soil Quality Indicator Sheet – Biological Indicators and Soil Function**. 2015. 4 p. Disponível em: <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2023-01/Indicators-Biological-Indicators-and-Soil-Functions.pdf>. Acesso em: 01 jun. 2023.

VANCE, E. D.; BROOKES, P. C.; JENKINSON, D. S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 19, n. 6, p. 703-707, 1987. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0038071-787900526>. Acesso em: 10 jun. 2023.

VARELA, M. F.; SCIANCA, C. M.; TABOADA, M. A.; RUBIO, G. Cover crop effects on soybean residue decomposition and P release in no-tillage systems of Argentina. **Soil and Tillage Research**, v. 143, p. 59–66, nov. 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167198714000968>. Acesso em: 10 jun. 2023.

VENKATESWARLU, B.; SRINIVASARAO, C.; VENKATESWARLU, J. Traditional Knowledge for Sustainable Management of Soils. In: LAL, R.; STEWART B. A. **Principles of Sustainable Soil Management in Agroecosystems**. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2013. 303 p.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 4, p. 743-755, 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/rSb9bsbsgjBqw4t9b9jrDBC/?format=html&stop=previous&lang=pt>. Acesso em: 10 jun. 2023.

XING, T. T.; CAI, A. D.; LU, C. A.; YE, H. L.; WU, H. L.; HUAI, S. C.; WANG, J. Y.; XU, M. G.; LIN, Q. M. Increasing soil microbial biomass nitrogen in crop rotation systems by improving nitrogen resources under nitrogen application. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 21, n. 5, p. 1488-1500, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095311921636730>. Acesso em: 10 jun. 2023.

XIONG, Y. C.; LI, F. E.; ASHRAF, M.; AKRAM, N.; SABIR, S.; MO, F.; WANG, X. L. Crop rotation systems and their ecological impacts in the loess plateau of China. In: MA, B. L. **Crop rotations: Farming practices, monitoring and environmental benefits**. 1. ed. New York: Nova Science, 2016. p. 133-156

YANG, Z. X.; LIU, S. Q.; ZHENG, D. W.; FENG, S. D. Effects of cadmium, zinc and lead on soil enzyme activities. **Journal of Environmental Sciences**, v. 18, n. 6, p. 1135-1141, 2006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S100107420660051X>. Acesso em: 10 jun. 2023.

WALKLEY, A.; BLACK, I. A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Science**, v. 37, n. 1, p. 29-38, 1934. Disponível em: https://journals.lww.com/soilsci/citation/1934/01000/an_examination_of_the_degtjareff_method_for.3. Acesso em: 10 jun. 2023.

WANDER, M. M.; CIHACEK, L. J.; COYNE, M.; DRIJBER, R. A.; GROSSMAN, J. M.; GUTKNECHT, J. L.; HORWATH, W. R.; JAGADAMMA, S.; OLK, D. C.; RUARK, M.; SNAPP, S. S.; TIEMANN, L. K.; WEILL, R.; TURCO, R. F. Developments in agricultural soil quality and health: Reflections by the research committee on soil organic matter management. **Frontiers in environmental science**, v. 7, p. 109, 2019. Disponível em:

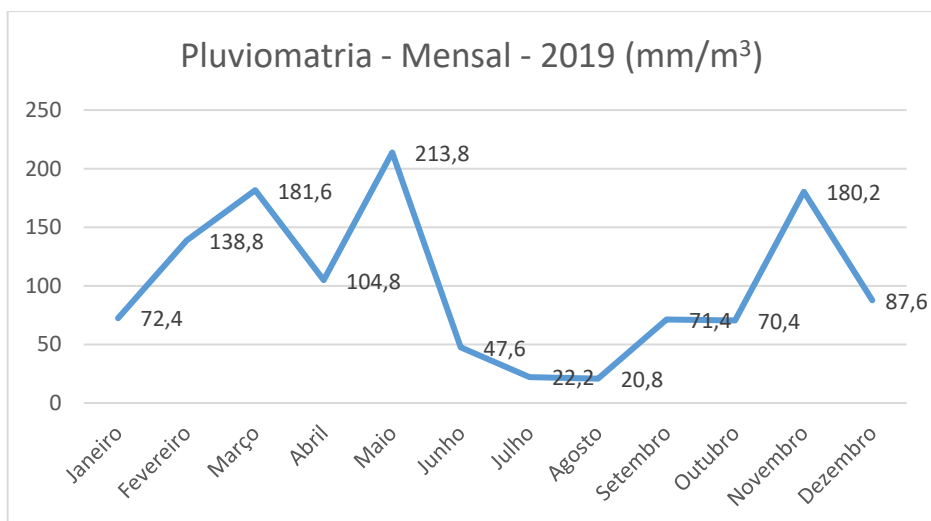
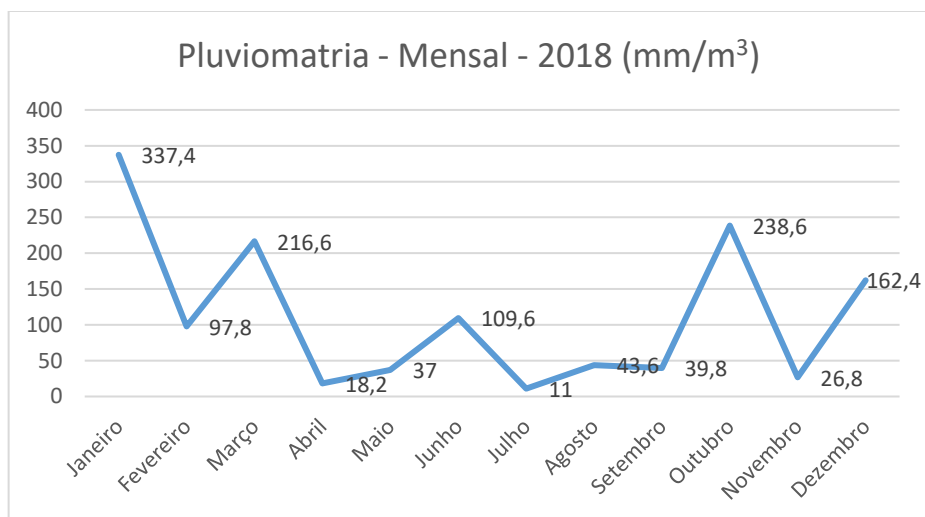
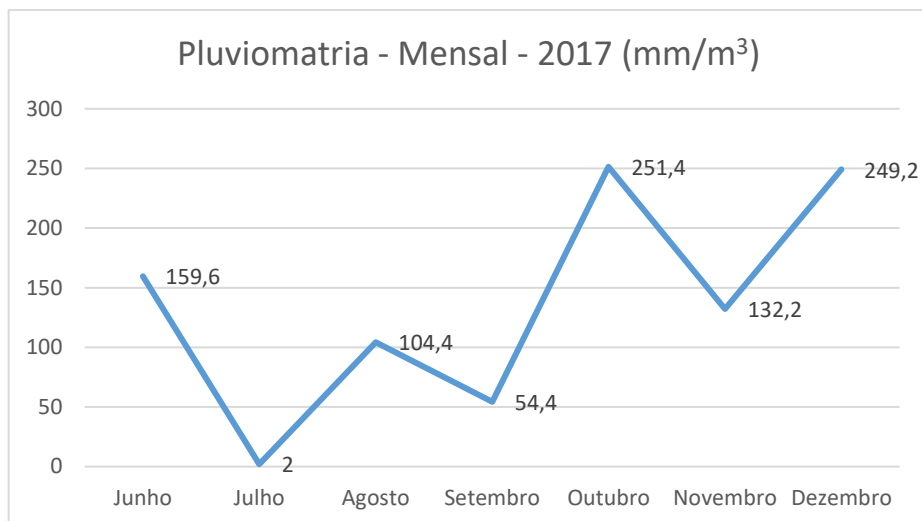
<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenvs.2019.00109/full>. Acesso em: 10 jun. 2023.

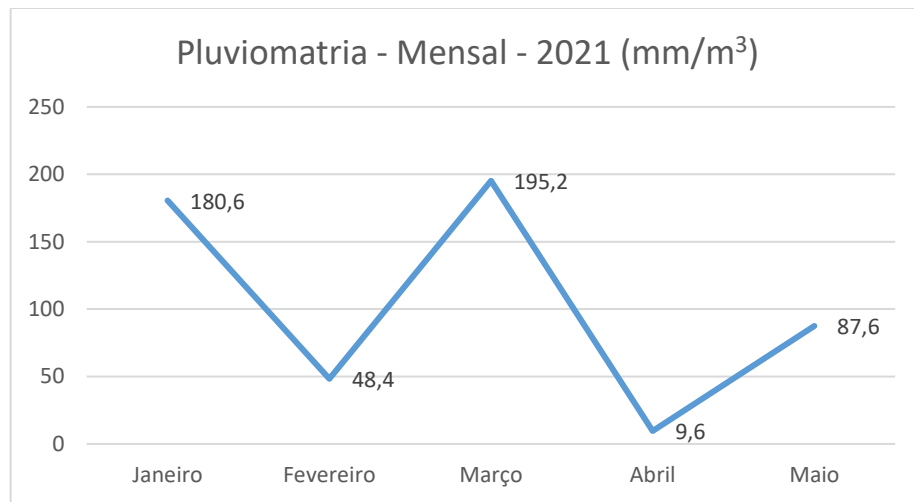
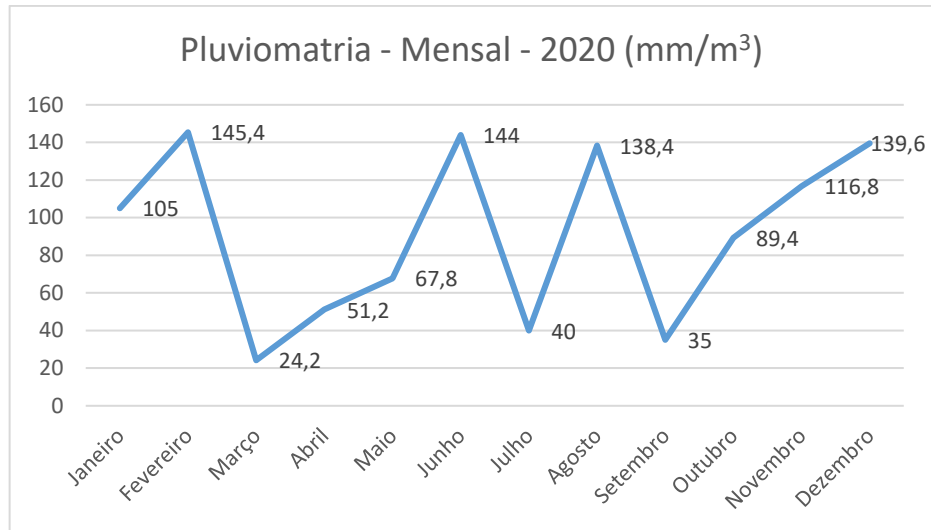
ZENG, Z. H.; LU, Z. Y.; JIANG, Y.; ZHANG, K.; YANG, Y. D.; ZHAO, P. Y. Legume-cereal crop rotation systems in China. In: MA, B. L. **Crop rotations: Farming practices, monitoring and environmental benefits**. 1. ed. New York: Nova Science, 2016. p. 51-69. Disponível em: <https://www.novapublishers.com/wp-content/uploads/2019/01/Legume-Cereal-Crop-Rotation-Systems-in-China.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2023.

ZHAO, X. XUE, J. F.; ZHANG, X. Q.; KONG, F. L.; CHEN, F.; LAL, R.; ZHANG, H. L. Stratification and storage of soil organic carbon and nitrogen as affected by tillage practices in the North China Plain. **PLoS One**, v. 10, n. 6, p. e0128873, 2015. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0128873>. Acesso em: 10 jun. 2023.

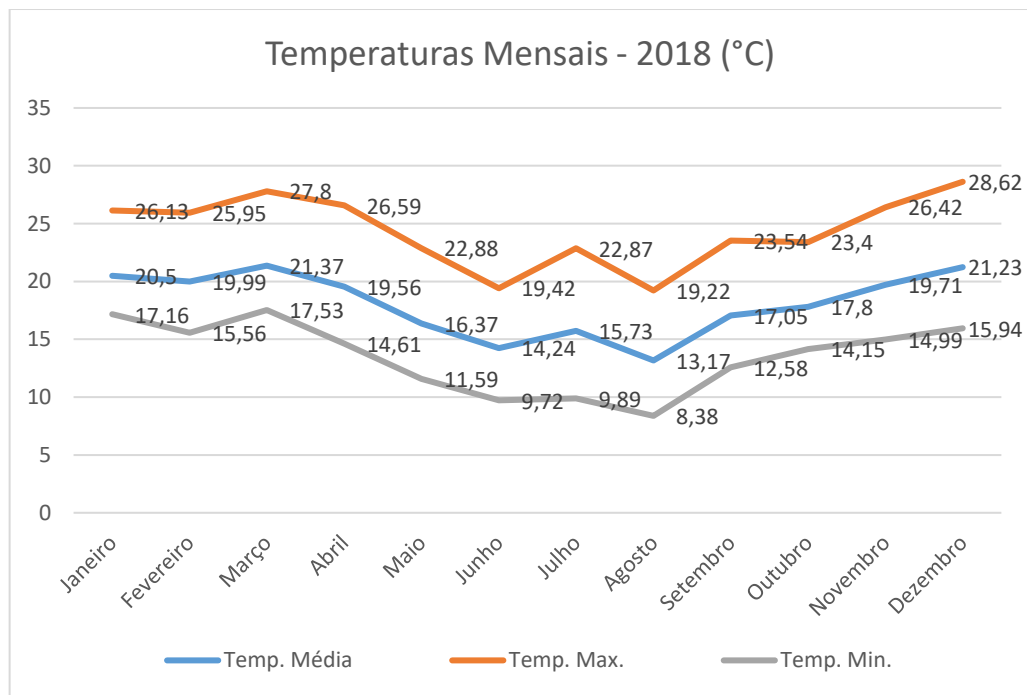
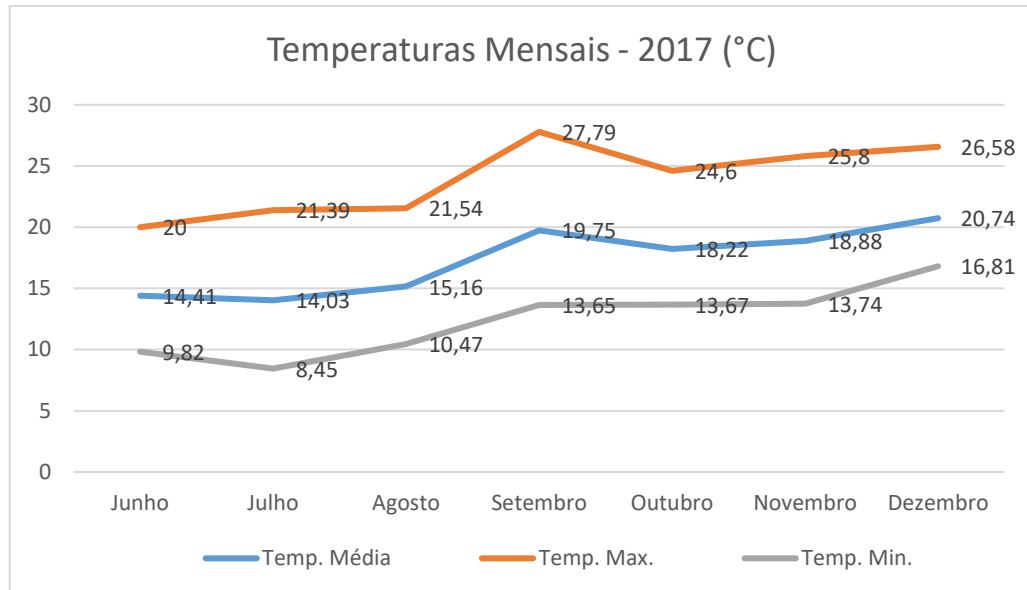
ZHENG, W.; GONG, Q.; ZHAO, Z.; LIU, J.; ZHAI, B.; WANG, Z.; LI, Z. Changes in the soil bacterial community structure and enzyme activities after intercrop mulch with cover crop for eight years in an orchard. **European Journal of Soil Biology**, v. 86, p. 34-41, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1164556317302364>. Acesso em: 10 jun. 2023.

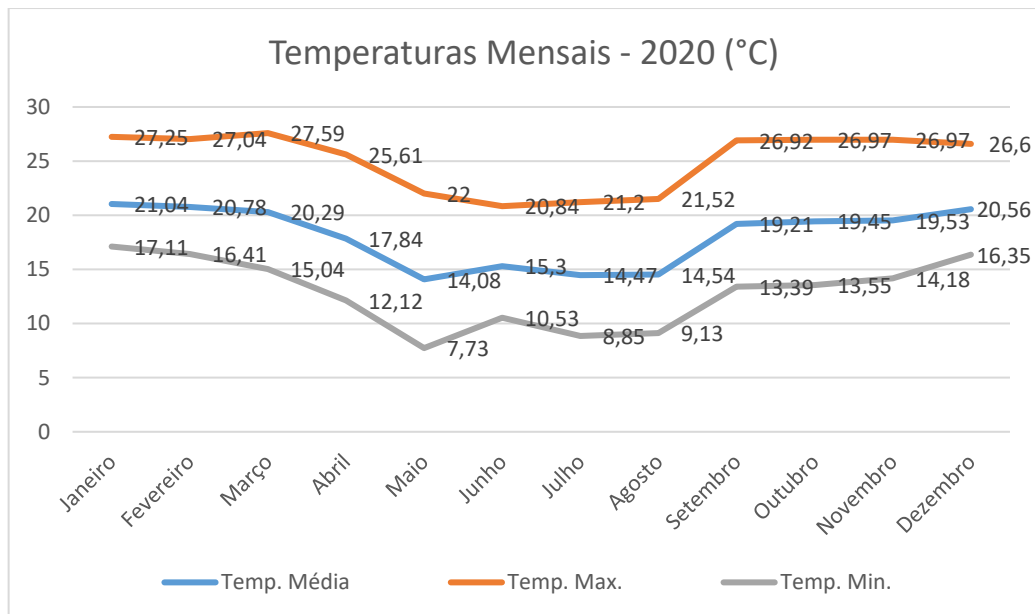
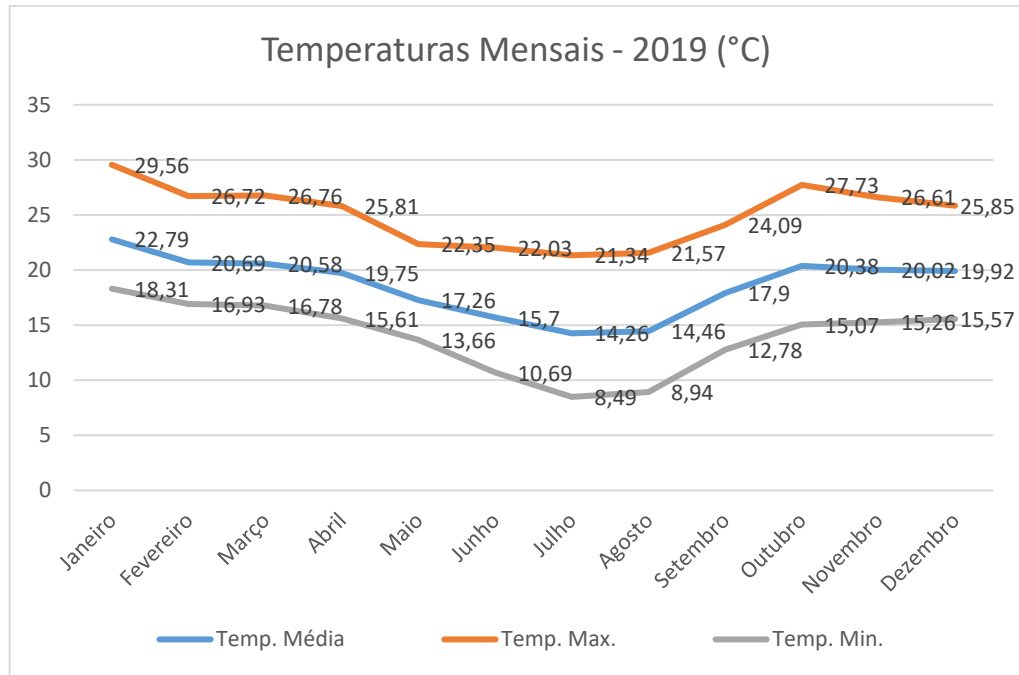
**ANEXO A - CONJUNTO COM 5 GRÁFICOS COM AS MÉDIAS
CLIMATOLÓGICAS DE PRECIPITAÇÃO MENSAIS PARA O
PERÍODO DE JUNHO DE 2017 A MAIO DE 2021**

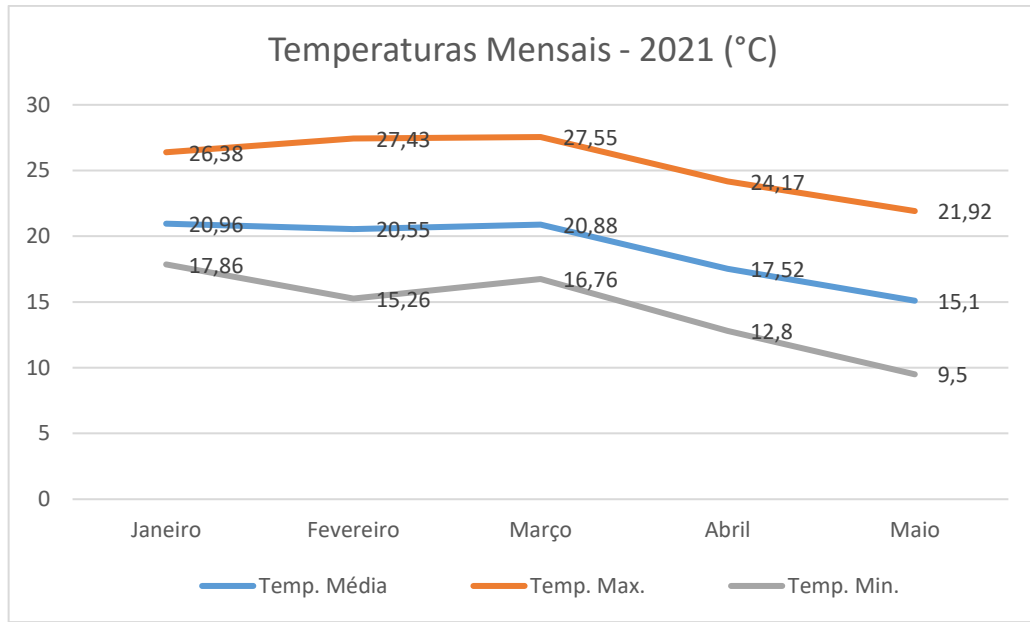




**ANEXO B - GRAFICOS COM AS MÉDIAS CLIMATOLÓGICAS DE
TEMPERATURAS MÉDIA, MÍNIMAS E MÁXIMAS MENSAIS PARA O
PERÍODO DE JUNHO DE 2017 A MAIO DE 2021**

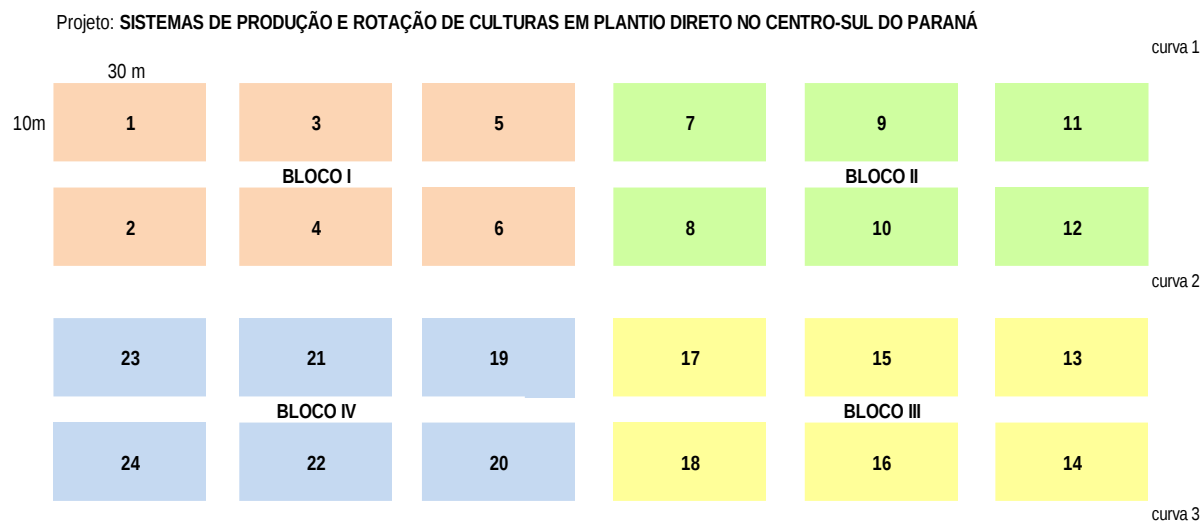






ANEXO C – CROQUI EXPERIMENTAL

Figura 1 – Croqui do Experimento de Sistema de Produção e Rotações de Cultura em plantio Direto no Centro-Sul Paraná – Ponta Grossa-PR – IDR-Paraná:



Fonte: DR Lutécia Canalli

Legenda: * Curva no desenho se refere a curva de nivelamento do terreno

Figura 2 – Identificação da sequência de parcelas do experimento de Rotações de Cultura.

TRATAMENTOS	BLOCO 1	BLOCO 2	BLOCO 3	BLOCO 4
Rotação I (Testemunha/Sucessão)	4	9	13	23
Rotação II	2	11	17	22
Rotação III	1	12	18	24
Rotação IV	6	10	15	19
Rotação V	5	8	16	20
Rotação VI	3	7	14	23

Fonte: Projeto Sistemas de Produção e Rotação de Culturas em Plantio Direto na Região Centro Sul do Paraná – Dra Lutécia Canalli

ANEXO D – ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DO SOLO

Quadro 1 - Resultados das análises de solo químicas do Marco Inicial do Experimento – Junho de 2016

Descrição Amostra	mg/dm³	g/dm³	pH	cmol _e /dm³ de solo							%	
	P	C		Al	H+Al	Ca	Mg	K	S*	T*	V%*	Al*
PG 1 0-10	3,7	42,85	4,25	0,6	10,1	2,56	1,93	0,32	4,81	14,88	32,30	9,26
PG 2 0-10	6,2	36,62	4,2	1,28	10,28	1,98	0,81	0,42	3,21	13,48	23,6	28,57
PG 3 0-10	4,6	44,02	4,3	0,74	9,10	3,3	1,47	0,59	5,36	14,46	36,81	12,55
PG 4 0-10	4,1	41,49	4,2	0,93	9,73	2,4	1,94	0,37	4,7	14,43	32,14	16,61
PG 5 0-10	7,3	39,73	4,7	0,31	7,85	4,19	2,12	0,46	6,77	14,62	45,66	3,98
PG 6 0-10	6,2	45,58	5,5	0,1	5,44	4,05	3,21	0,83	8,1	13,54	59,85	0
PG 7 0-10	9,0	37,79	4,8	0,23	6,66	3,63	3,12	0,86	7,61	14,27	53,13	2,07
PG 8 0-10	9,4	24,15	4,75	0,3	7,73	2,96	2,85	1,12	6,93	14,66	47,82	3,24
PG 9 0-10	6,35	26,10	4,4	0,72	9,97	2,42	2,55	0,6	5,56	15,53	35,22	12,55
PG 10 0-10	5,75	30,77	4,2	1,22	11,29	1,62	2,96	0,5	5,08	16,37	30,68	19,74
PG 11 0-10	9,01	34,47	4,75	0,25	7,53	3,86	3,14	1,04	8,03	15,56	51,32	2,13
PG 12 0-10	7,7	31,55	4,95	0,23	6,46	4,14	3,08	0,84	8,05	14,51	55,40	1,78
S* = Soma de Base		T* = Capacidade de Troca de Cátions				V%* = Saturação por Bases				Al* = Saturação de Alumínio		
P e K: Mehlich		Ca, Mg e Al: KCL 1M				pH CaCl ₂ 0,01M						

Fonte: O Autor

Tabela 2 - Resultados das análises físicas de solo do Marco Inicial do Experimento – Junho de 2016

Descrição Amostra Propr.	(%) Partículas do Solo		
	Areia	Silte	Argila
PG Composta 1 a 12	15	19	66

**ANEXO E – FOTOS DO EXPERIMENTO DURANTE OS MOMENTOS
DE CONDUÇÃO E COLETA NO PERÍODO DE DURAÇÃO DO
EXPERIMENTO**

:



Foto 1 - Sistema de Coleta das Subsubamostras de solo das parcelas



Foto 2 – Parcelas do Experimento Inverno 2019



Foto 3 – Parcelas durante o Inverno 2020-21



Foto 4 – Parcela com ervilha forrageira e tremço azul (aduvo verde)

Fotos durante as avaliações e processos laboratoriais para determinação dos dados do experimento:



Foto 1 – Espectrofotometro na análise da B-Glucosidase de amostras do verão 2018-19



Foto 2 – Extratos de solo para análise de nutrientes (cálcio magnésio e alumínio)

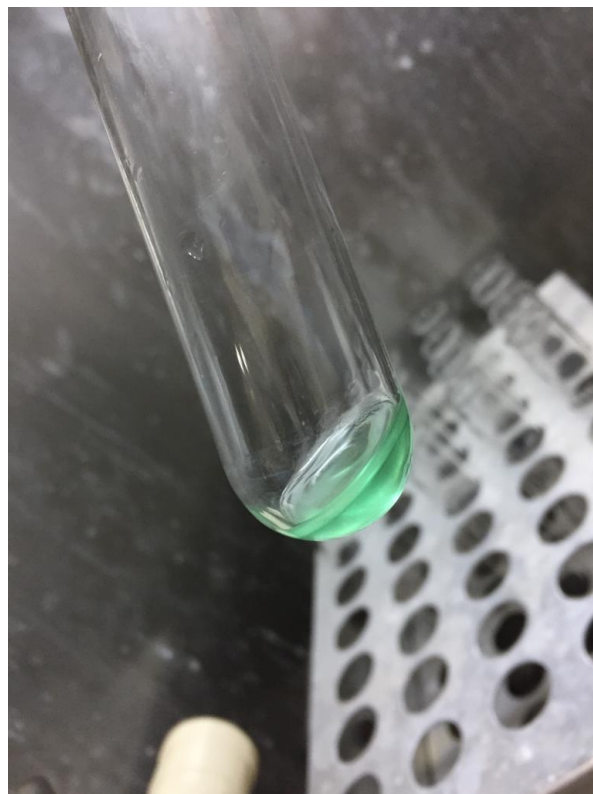


Foto 3 e 4 – A Direita, foto do extrato da digestão para análise de NBM, amostras 2019-20. A Esquerda, foto da titulação do carbono no solo, amostras verão 2019-20.



Foto 5 e 6 – A Direita análise de nitrato e amônio no solo, amostras 2019-20. A Esquerda potes em análise da respiração basal do solo, amostras 2019-20.

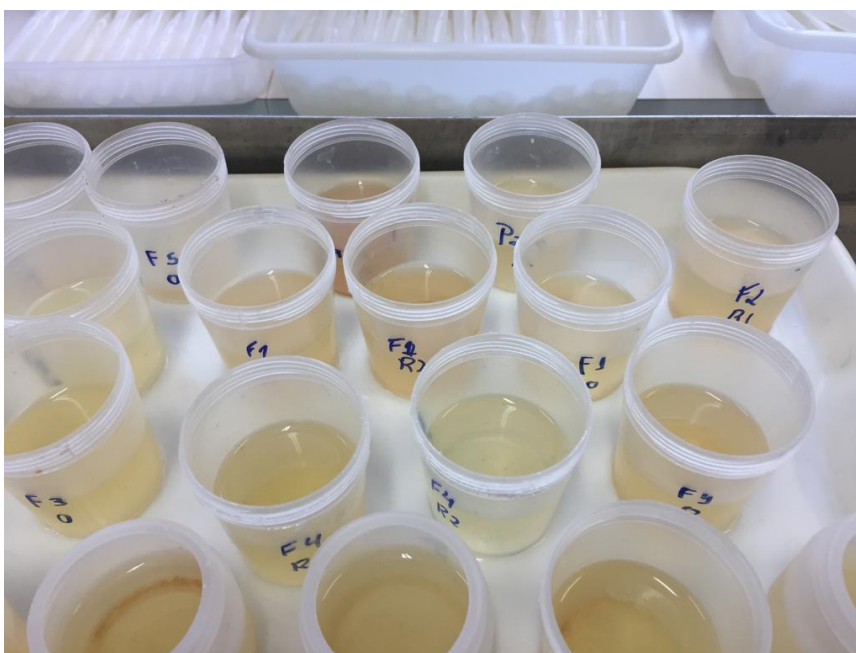


Foto 7 – Extratos de solo para análise de CBM e NBM, amostras 2020-21.



Fotos 8 e 9 – A Direita, tituladores usados para as análises do experimento. A Esquerda determinação da massa seca do experimento.