

CARBONO ORGÂNICO E INDICADORES MICROBIOLÓGICOS DO SOLO EM DIFERENTES ROTAÇÕES DE CULTURAS SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO

ORGANIC CARBON AND SOIL MICROBIOLOGICAL INDICATORS IN DIFFERENT CROPPING ROTATIONS UNDER NO-TILL PLANTING SYSTEM

Maysa Bardal¹, Renata Cristine Palotino², André Luiz de Oliveira Francisco³

¹ Estudante do Curso de Agronomia

² Estudante do curso de Agronomia

³ Professor Doutor do Curso de Agronomia

Resumo: Este estudo avaliou indicadores microbiológicos do solo ligados ao ciclo do carbono (C) e nitrogênio (N) em diferentes rotações de cultura sob sistema plantio direto (SPD), realizado na Estação Experimental do IDR-Paraná em Ponta Grossa-PR. O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso, onde foram comparadas 6 rotações de culturas, com diferentes níveis de diversificação de culturas, com 4 repetições. Os tratamentos consistiram em seis rotações de culturas em ciclo de 3 anos (2017-2020), todas em sistema plantio direto com alterações nas culturas comerciais visando rotações diferenciadas no sistema, além de inserção de adubos verdes no sistema de produção. Foram analisados a atividade das enzimas Beta-glicosidase e Fosfatase ácida, além do carbono orgânico total (COT) e a respiração basal do solo (RBS). Os resultados foram submetidos a análise de variância, onde aplicou-se o teste de F e quando houve significância, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% para probabilidade de erro. A Fosfatase ácida, COT e RBS não mostraram diferenças significativas entre as rotações de culturas. No entanto, a enzima Beta-glicosidase apresentou maior atividade nas rotações mais diversificadas (IV, V e VI), enquanto a rotação menos diversificada (I) apresentou a menor atividade enzimática. Conclui-se que rotações de culturas mais diversificadas, com o uso de adubos verdes e leguminosas, aumentam a atividade enzimática e a qualidade do solo e diminui as perdas do solo.

Palavras-chave: Atividade enzimática, beta-glicosidase, fosfatase ácida.

Abstract: This study evaluated soil microbiological indicators linked to the carbon (C) and nitrogen (N) cycle in different crop rotations under a direct planting system (SPD), carried out at the IDR-Paraná Experimental Station in Ponta Grossa-PR. The experimental design used was a randomized blocks, where 6 crop rotations were compared, with different levels of crop diversification, with 4 replications. The treatments consisted of six crop rotations in a 3-year cycle (2017-2020), all in a direct planting system with changes in commercial crops, transferring different rotations into the system, in addition to the insertion of green fertilizers into the production system. The activity of the enzymes Beta-glucosidase and Acid phosphatase were analyzed, in addition to total organic carbon (TOC) and soil basal respiration (RBS). The results were subjected to an analysis of variance, where the F test was applied and when there was significance, the means were compared using the Tukey test at 5% for error probability. Acid phosphatase, TOC and RBS showed no significant differences between crop rotations. However, the Beta-glucosidase enzyme showed greater activity in the most diverse rotations (IV, V and VI), while the less diverse enzyme (I) showed lower enzymatic activity. It is concluded that more varied crop rotations, with the use of green manures and legumes, increase enzymatic activity and soil quality and reduce soil losses.

Keywords: Enzymatic activity, beta-glucosidase, acid phosphatase.

Contato: maysabardal@gmail.com, rcpalotino@gmail.com, andre.francisco@cescage.edu.br

1 INTRODUÇÃO

1.1 Sistema Plantio Direto e Rotação de Culturas

O sistema de plantio direto (SPD), visto como um dos principais progressos no

sistema de produção do Brasil, é uma poderosa ferramenta de conservação que vem sendo cada vez mais empregada, trazendo vantagens para as características de qualidade do solo. No Brasil, cerca de 32 milhões de hectares estão sob plantio direto (Febrapdp, 2018).

Este método foi introduzido no Brasil na década de 1970 no estado do Paraná e, nos anos 90, expandiu-se para os estados do centro-oeste. Os benefícios do baixo custo de produção, a não degradação do solo, simplicidade e agilidade nas operações, diminuição da mão de obra e a recuperação produtiva do solo motivaram muitos agricultores a aderirem a esta nova abordagem. Com o auxílio de pesquisadores, fabricantes de equipamentos e alguns agricultores pioneiros, foi possível aprimorar este sistema e criar novas técnicas (Cruz *et al.*, 2016).

No Brasil, o maior desafio atual é transformar o Plantio Direto em um Sistema Plantio Direto (Denardin, 2016), isto é, um sistema de alta qualidade, que atenda a todos os princípios deste sistema, como a não revolvimento do solo, a cobertura permanente com vegetação ou resíduos destas (palha) e a alternância de culturas. (Peche Filho, 2005). A diversificação de culturas é o princípio fundamental da agricultura conservacionista, capaz de transformar o Plantio Direto em Sistema Plantio Direto, uma vez que permite o abandono contínuo do preparo do solo (DENARDIN, 2016).

A alternância de culturas é um dos fundamentos do Sistema Plantio Direto, contribuindo para a interrupção dos ciclos dos patógenos existentes no solo, elemento crucial para a preservação e o aumento da biodiversidade do solo. A utilização constante de sucessão de trigo e soja, a movimentação intensa do solo e a reposição insuficiente dos nutrientes exportados pelas culturas podem estar atuando como obstáculos para o crescimento da produtividade dessas culturas. A alternância de culturas, juntamente com o manejo adequado do solo, torna-o solo mais bioativo e com maior capacidade de produção. Este resultado decorre da combinação de elementos como a proteção do solo através de cobertura viva ou morta, maior retenção de umidade, efeito rizosférico das plantações, maior presença de matéria orgânica e aprimoramento das características físicas do solo, entre outros (Cattelan; Gaudêncio; Silva, 1997).

O SPD combinado com o emprego de plantas de cobertura do solo em sucessão a culturas comerciais está ganhando destaque nas regiões agrícolas do Brasil (Casali *et al.*, 2016).

1.2 Matéria Orgânica do Solo

De acordo com Stevenson (1994), a matéria orgânica do solo (MOS) engloba qualquer material orgânico, seja vegetal ou animal (littera, resíduos, biomassa microbiana, compostos solúveis) e a matéria orgânica intimamente relacionada aos minerais argilominerais do solo.

A matéria orgânica é o elemento mais diretamente ligado à qualidade do solo, afetando diretamente seus atributos. Ao melhorar a agregação e a porosidade do solo, favorece a absorção e retenção de água, promove a troca gasosa entre o solo e a atmosfera, estimula a atividade microbiana, e reduz a compactação e erosão das camadas superficiais do solo.

A MOS pode ser vista como uma das estratégias mais eficazes para avaliar a qualidade do solo (Six *et al.*, 2002; Martínez *et al.*, 2018). Ela desempenha várias funções no solo, aprimorando suas características físicas, biológicas e químicas,

desempenhando um papel crucial em diversos processos que acontecem no ecossistema do solo.

De acordo com o nível de mineralização, a matéria orgânica pode ser dividida em diversas frações ou compartimentos. Através do processo de decomposição, a parte leve da matéria orgânica do solo, composta principalmente por resíduos vegetais, é convertida em C no solo. A degradação desses resíduos vegetais varia de acordo com o tipo de solo, as condições climáticas, especialmente a precipitação e a temperatura, e as estratégias de gestão empregadas. As altas taxas de decomposição da fração leve são também atribuídas à natureza mole dos seus componentes e à falta de proteção oferecida pelos colóides do solo. Devido à sua biodisponibilidade superior, a fração leve se destaca como uma fonte significativa de energia e carbono para a biomassa microbiana (Janzen *et al.*, 1992).

O carbono orgânico do solo é o balanço entre o carbono que é incorporado ao solo pela decomposição de resíduos vegetais e o que é eliminado para a atmosfera através da atividade microbiana, como o dióxido de carbono (Machado, 2005).

A incorporação de carbono orgânico no solo é influenciada pela entrada de matéria orgânica por meio do envelhecimento de elementos da biomassa acima e abaixo da superfície, queda de folhas, detritos da atividade de exploração e cadáveres de animais, com suas respectivas taxas de decomposição. A retirada e a remoção a composição da fitomassa subsequente é o principal meio para a transferência de C e nutrientes da planta para o solo (Schumacher *et al.*, 2004).

1.3 Respiração Microbiana e Atividade Enzimática no Solo

As enzimas do solo são geralmente originadas dos microrganismos, mas também podem ter origem animal e vegetal (Mendes *et al.*, 2009). Os microrganismos são considerados as principais fontes de enzimas do solo, portanto, o estudo da atividade enzimática tem sido reportado como indicador efetivo da qualidade do solo, da decomposição da matéria orgânica e da disponibilidade de nutrientes decorrentes das práticas de manejo ou do ambiente (Quilchano; Maranón, 2002). Assim, as relações entre organismos influenciam vários processos do solo como a mineralização da MOS e de xenobióticos, controle biológico de pragas e doenças, ciclagem de nutrientes, formação de húmus e equilíbrio biológico. A degradação de substâncias complexas, por exemplo, envolve um consórcio de espécies de microrganismos responsáveis por diferentes etapas da degradação (Moreira; Siqueira, 2006)

Além da participação nas reações metabólicas intercelulares responsáveis pelo funcionamento e pela manutenção dos seres vivos, essas enzimas desempenham papel fundamental nos ecossistemas, agindo como catalisadoras de várias reações que resultam na decomposição de resíduos orgânicos, ciclagem de nutrientes e formação da matéria orgânica do solo, sem contar o seu potencial biotecnológico, com várias aplicações nas áreas industrial e ambiental (Mendes *et al.*, 2009).

Os testes respirométricos permitem o monitoramento a intervalos de tempo, das concentrações de oxigênio (no ar ou dissolvido na água) no interior do ambiente onde está presente a amostra de solo (ar ou água). Com base na variação da concentração de oxigênio, pode-se calcular o valor da TCO (taxa de consumo de oxigênio), por meio da determinação da inclinação da reta de regressão estatística entre os dados levantados, a qual é frequentemente linear ou aproximadamente linear (Andreottola *et al.*, 2002).

As enzimas β -glicosidase e fosfatase ácida desempenham um papel fundamental em vários processos biológicos (Zang *et al.*, 2018). Medidas de avaliação da atividade de uma determinada enzima em diferentes períodos sazonais, podem se constituir em um mecanismo para avaliar a fertilidade de um solo, ou o estado de sua atividade biológica (Melo *et al.*, 2013).

Considerando a importância da matéria orgânica para o aumento do carbono do solo e sua relação direta com a atividade microbiana, o presente estudo teve por objetivo realizar a avaliação da atividade enzimática através da enzima β -glicosidase e Fosfatase ácida, da respiração microbiana do solo e do teor de carbono no solo em diferentes rotações de culturas sob sistema de plantio direto.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Localização e Caracterização da Área Experimental

O experimento foi implantado no ano de 2017 na Estação Experimental do Polo Regional de Pesquisa do IDR-Paraná, em Ponta Grossa, Paraná, Brasil, cujas coordenadas geográficas são 25° 09' 38" S latitudinal e 50° 09' 23" O longitudinal, situado a aproximadamente 835 metros de altitude.

De acordo com Köppen, o clima da região é classificado do tipo Cfb, subtropical úmido, com uma temperatura anual média de 18°C, com precipitações anuais de aproximadamente 1550 mm em média (IDR-PARANÁ, 2017). O solo no local do experimento foi classificado como LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico, textura argilosa, relevo suave ondulado (EMBRAPA, 2006).

Figura 1 – Local do experimento no Polo Regional do IDR-Paraná em Ponta Grossa- PR.



Fonte: as autoras

2.2 Planejamento Experimental e Análise Estatística

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados com seis tratamentos e quatro repetições. Os seis tratamentos incluíram uma variedade de culturas (testemunhas) e cinco rotações de culturas em um ciclo recomendado de 3 anos e sob condições de plantio direto. Os lotes têm 10m de largura x 30m de comprimento (300m²), 8m de comprimento para fácil manobra das máquinas e 2m de

largura. Cada lote tinha um limite de 2m ao redor, sem corredores internos, e todo o ensaio teve 16728m².

O experimento é um estudo de longo prazo em que uma rotação de culturas de três anos é intuitiva a partir do primeiro ciclo. Ao final de cada ciclo de 3 anos, as rotações de culturas podem ser redefinidas com base em estimativas de resultados e necessidades regionais emergentes, ou mesmo para melhor direção operacional, sendo assim um experimento mais demorado e mais duradouro com resultados significativos, com intuito de trazer soluções para os agricultores.

O primeiro ciclo de rotação de culturas abrange o período 2017/18 a 2019/20, sendo que o novo ciclo se inicia no inverno de 2019 e deve durar até o verão de 2022/23. Neste experimento houve a necessidade de realizar pequenos ajustes na rotação de culturas do segundo ciclo trienal, principalmente para melhores procedimentos operacionais, mas isso não alterou o protocolo de cada tratamento, conforme explicado a seguir.

Para o presente estudo, foram considerados os principais sistemas de produção de alimentos utilizados na região dos Campos Gerais, geralmente caracterizados por sucessões ou rotações de culturas, com pouca diversidade de espécies, e padrão que outras rotações de culturas com maior diversidade de espécies eram de interesse econômico. adubação verde.

Tabela 1- Tratamentos compostos por rotações de culturas em um ciclo de três anos, sob sistema plantio direto, IDR-Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil.

1º CICLO DAS ROTAÇÕES DE CULTURAS

TRATAMENTOS	ANO 1 2017/2018		ANO 2 2018/2019		ANO 3 2019/2020	
	Rotação I	Trigo	Soja	Trigo	Soja	Trigo
Rotação II	Aveia Preta	Milho	Trigo	Soja	Trigo	Soja
Rotação III	Canola	Milho	Trigo	Soja	Cevada	Soja
Rotação IV	Aveia Branca	Feijão/ Mourisco	Tremoço azul + Ervilhaca	Milho	Triticale	Soja
Rotação V	Aveia Preta + Azevém	Milho	Aveia Preta + Azevém	Milho	Aveia Preta + Azevém	Soja
Rotação VI	Aveia Preta + Ervilhaca + Nabo	Milho	Triticale + Centeio + Ervilhaca	Feijão / Mourisco	Triticale + Aveia + Centeio	Soja

2º CICLO DAS ROTAÇÕES DE CULTURAS

TRATAMENTOS	ANO 4 2020/2021		ANO 5 2021/2022		ANO 6 2022/2023	
	Rotação I	Trigo	Soja	Trigo	Soja	Trigo
Rotação II	Aveia Preta	Milho	Trigo	Soja	Trigo	Soja
Rotação III	Canola	Milho	Trigo	Soja	Cevada	Soja
Rotação IV	Tremoço + Ervilhaca	Milho	Aveia Branca	Feijão / Mourisco	Triticale	Soja
Rotação V	Ervilhaca	Milho	Trigo	Soja	Trigo	Soja
Rotação VI	Aveia Preta + Ervilhaca	Milho	Triticale + Centeio + Nabo + Ervilhaca	Feijão / Mourisco	Triticale + Aveia + Centeio	Soja

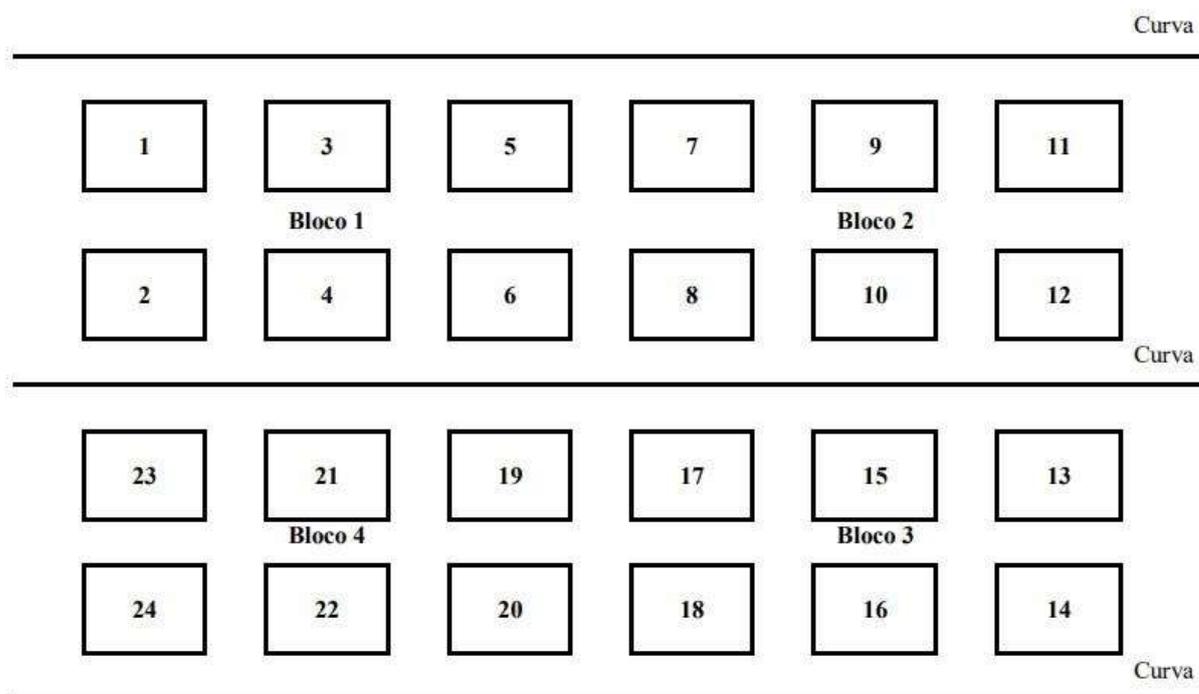
Nota: Sucessão = trigo/soja continuamente (testemunha), Rotação I = inclusão aveia/milho a cada dois anos com trigo/soja, Rotação II = produção diversificada de grãos – opção 1, Rotação III = produção diversificada de grão – Opção 2, Rotação IV = mix adubos verdes no inverno/grãos no verão e Rotação, V = forrageiras gramíneas no inverno. VI = mix de plantas B cobertura de inverno.

Tabela 2 – Distribuição aleatória dos tratamentos nos blocos experimentais do projeto Sistema de rotação de culturas em plantio direto na região Centro Sul do Paraná, Estação Experimental do Polo Regional do IDR Paraná em Ponta Grossa, PR.

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

Fonte: as autoras

Figura 2 - Croqui da área experimental do projeto Sistema de rotação de culturas em plantio direto na região Centro Sul do Paraná, Estação Experimental do Polo Regional do IDR-Paraná em Ponta Grossa, PR.



Fonte: as autoras

2.3 Metodologia de Amostragem

Após a implementação do experimento, todas as coletas de solo para análise foram realizadas durante as safras de verão 2018-19, 2019-20 e 2021-22 em plena floração, a fim de observar a sequência do efeito da cultura no sistema rotativo. As safras de soja, milho e feijão foram colhidas no mesmo dia na colheita de verão com o objetivo de obter homogeneidade. Foram retiradas amostras de solo para análises carbono orgânico total (COT), atividade enzimática, basal do solo (RBS, coletados em camadas de 0 a 10 cm de profundidade.

O solo das sub-amostras foi homogeneizado em baldes e uma porção foi acondicionada logo em seguida em potes plásticos com tampa de rosca (amostras

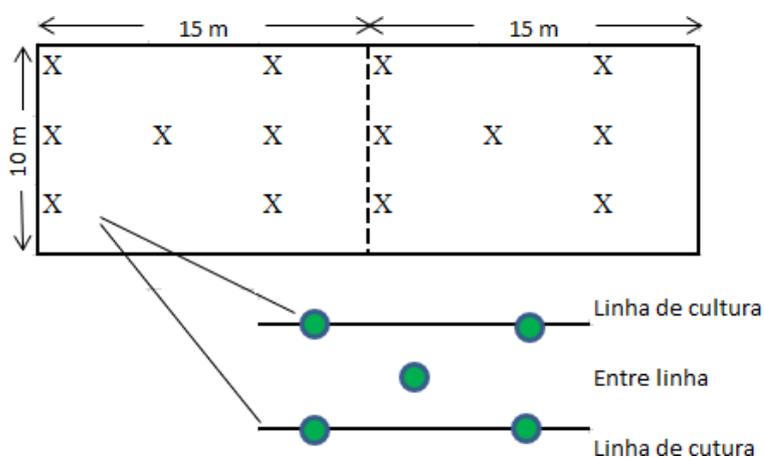
compostas). Foram acondicionado 24 frascos em caixas de isopor com gelo para envio ao laboratório. Em seguida, foram armazenados em freezer tipo geladeira com temperatura entre 3° a 8°C e umidade local até que todas as análises sugeridas foram realizadas. As análises de solo RBS foram realizadas dentro de 10 dias após a coleta.

2.4. Métodos de Coleta e Análises

As amostras de solo foram coletadas na camada superficial do solo de 0 a 10 cm de profundidade, sendo duas sub-amostras por parcela, uma na primeira metade e outra na segundametade da parcela, representando uma área total de 150 metros quadrados (10x15m) para cada sub-amostra. Cada sub-amostra foi composta por 7 pontos de amostragem e em cada ponto foram retiradas 5 sub-subamostras (uma na entrelinha, duas na linha adjacente superior e duas na linha adjacente inferior da cultura), conforme representado na Figura 3.

As amostras de solo foram coletadas e acondicionadas em potes plásticos diretamente no campo, sendo posteriormente colocadas em caixas de isopor com gelo para o transporte até o laboratório. Lá, foram armazenadas em refrigeradores com temperatura controlada entre 2°C e 7°C, a fim de preservar a umidade até a realização das análises.

Figura 3 – Amostragem de solo, duas amostras por parcela, sendo cada uma composta por sete subamostras, e cada subamostra foi composta por 5 subsubamostras



Fonte: as autoras.

2.5. Enzimas: β -Glucosidase e Fosfatase ácida

A atividade da enzima β -glucosidase foi determinada seguindo a metodologia descrita por Tabatabai (1982), com adaptações de Eivazi e Tabatabai (1988). O método baseia-se na quantificação do p-nitrofenol liberado após a incubação do solo com o substrato p-nitrofenilglucosídeo. Os resultados foram expressos em μg p-nitrofenol g^{-1} solo h^{-1} utilizando a equação 1:

$$\text{Enzima } \beta - \text{Glucosidade} = \frac{(A-B).D.F}{M.\%ms}$$

Equação 1

Onde:

- A: absorvância da amostra;
- B: absorvância do padrão (branco);
- F: equação da reta (coeficiente angular e linear);
- D: fator de diluição geralmente é 10x;
- M: peso do solo analisado (1g);
- %ms (massa seca): fator da matéria seca (umidade).

A análise da enzima fosfatase ácida seguiu a mesma metodologia utilizada para a β -glucosidase, descrita por Tabatabai e Eivazi (1977), com a única alteração sendo o substrato de incubação, que foi o p-nitrofenil fosfato de sódio. Além disso, utilizou-se uma solução tampão MUB ajustada para pH 5,5.

2.6. Atividade microbiana respiratória

A respiração microbiana foi determinada com base em uma adaptação do método proposto por Jenkinson e Powelson (1976). O método envolve a quantificação de CO_2 liberado pelas amostras de solo, capturado por hidróxido de sódio 1 molar, após um período de incubação de 7 dias em recipientes vedados. Após esse período, o hidróxido de sódio foi titulado com ácido clorídrico. Os resultados foram expressos em $\text{mg C-CO}_2 \text{ kg}^{-1}$ de solo h^{-1} , e foram calculados de acordo com a equação 2:

$$\text{RBS} = \frac{\{(Vb - Va) \cdot M \cdot 6.1000\} / Ps}{T} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

- RBS: carbono oriundo da respiração basal do solo;
- Vb: volume de HCl gasto na titulação dos brancos;
- Va: volume de HCl gasto na titulação das amostras;
- M: molaridade exata do HCl.

2.5. Avaliação do Carbono Orgânico Total

O carbono orgânico total (COT) do solo foi quantificado através da oxidação via úmida com dicromato de potássio, seguindo o método de Walkley-Black (1934).

A análise de carbono no solo é realizada por meio da oxidação da matéria orgânica com o uso de dicromato de potássio, processo acelerado pela adição de ácido sulfúrico. Durante a reação direta com a matéria orgânica, a quantidade de dicromato remanescente é medida em comparação com uma amostra padrão em branco. Utilizando-se o sulfato ferroso como indicador, é possível determinar quanto

dicromato foi consumido pela matéria orgânica no solo, comparando com a quantidade presente na amostra em branco, que não contém solo. Após a leitura dos valores de sulfato ferroso consumido pelo branco e pela amostra, aplica-se o fator de conversão de Walkley e Black, que converte os resultados das leituras de sulfato ferroso em porcentagem de carbono (%C) conforme a equação: % de Carbono no Solo = (Leitura do Branco – Leitura do Sulfato Ferroso) x 0,7792.

O carbono orgânico do solo foi expresso em g/dm³ e a transformação do Carbono em percentual para Carbono em g dm⁻³ se faz multiplicando-se por 10, ou seja, Carbono em g/dm³ = % Carbono x 10.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Enzima β -Glucosidase e Fosfatase Ácida

A enzima β -Glicosidase mostrou diferenças estatísticas entre as rotações de culturas, com as Rotações IV, V e VI apresentando a maior atividade da enzima. Por outro lado, a menor atividade foi registrada na Rotação I (Tabela 3). Em relação à Fosfatase Ácida, não foram observadas diferenças significativas entre as rotações de culturas.

Tabela 3: Comparação de médias das enzimas Fosfatase ácida e Beta Glicosidase em diferentes rotações de culturas. Ponta Grossa-PR 2021/2022.

Rotação de culturas	Fosfatase ácida	Beta Glucosidase
	($\mu\text{g p-nitrofenol g}^{-1}$ solo seco h^{-1})	
Rotação I	379,3796 a	120,2528 b
Rotação II	417,1749 a	131,6836 ab
Rotação III	400,4473 a	142,1319 ab
Rotação IV	416,4063 a	154,5114 a
Rotação V	427,9842 a	155,2815 a
Rotação VI	421,1193 a	155,1181 a

Médias seguidas de letras iguais não se diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5%

A elevada atividade da enzima β -glicosidase nas rotações IV, V e VI pode ser atribuída à sequência de culturas nessas rotações, onde ocorreu elevada adição de matéria orgânica ao solo, devido à maior presença de plantas de coberturas, incluindo consórcios com leguminosas que fixam biologicamente nitrogênio e promovem maior atividade microbiana.

A matéria orgânica tem um impacto direto na atividade enzimática do solo, incluindo a enzima β -glucosidase, pois oferece substrato para a microbiota do solo e também protege e preserva as enzimas em suas formas ativas. Essa proteção se dá pela formação de complexos entre as enzimas e os compostos húmicos (DENG, TABATABAI, 1997).

Por ora, a Rotação I apresentou a menor atividade da enzima β -glucosidase devido a menor diversidade de espécies, com menor quantidade de matéria orgânica ao solo, uma vez que este tratamento foi composto basicamente por dois cultivos, sendo trigo no inverno e soja no verão, com a finalidade de produção de grãos, o que promove a exportação de maior quantidade de nutrientes e deixa menor quantidade de resíduos sobre o solo. Isso ressalta a importância da implementação de plantas de cobertura, que aumentam a adição de matéria orgânica e incentivam um incremento na atividade enzimática do solo em comparação a sistemas que são exclusivamente extratores.

3.2. Atividade Respiratória Microbiana e Carbono Orgânico Total

A respiração microbiana refere-se tanto à absorção quanto à liberação de dióxido de carbono na atmosfera, com essas trocas gasosas sendo realizadas pelos microrganismos do solo. Não foram observadas diferenças na respiração microbiana entre os diferentes sistemas de rotação de culturas (Tabela 4).

Tabela 4: Atividade de Respiração da biomassa microbiana do solo (RBS) e carbono orgânico total (COT) em diferentes rotações de culturas. Ponta Grossa-PR 2021/2022.

Rotação	RBS		COT	
	(C-CO ₂ kg ⁻¹ de solo h ⁻¹)		(g dm ⁻¹)	
Rotação I	0,6184	a	32,5034	a
Rotação II	0,5962	a	32,4946	a
Rotação III	0,6684	a	32,7050	a
Rotação IV	0,7114	a	32,0037	a
Rotação V	0,7458	a	31,6803	a
Rotação VI	0,6253	a	32,8121	a

Médias seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre si, no teste de Tukey a 5% de significância

É importante ressaltar que as rotações de culturas voltadas para a produção de fitomassa no inverno, utilizando plantas de cobertura, favorecem um aumento na adição de matéria orgânica. Essa matéria orgânica serve como a principal fonte de energia para sustentar os microrganismos do solo e sua atividade, criando um ecossistema benéfico para sua permanência e resultando em uma atividade enzimática superior em comparação com outros sistemas. A matéria orgânica é essencial para sustentar os microrganismos do solo, fornecendo energia e nutrientes necessários para seu metabolismo. Durante a decomposição, libera compostos bioativos que estimulam a atividade microbiana e enzimática, aumentando a disponibilidade de nutrientes. Além disso, melhora a estrutura do solo, criando um ambiente favorável para os microrganismos. Essa dinâmica promove alta produção de enzimas, como fosfatases e celulases, que intensificam a ciclagem de nutrientes, resultando em maior fertilidade e produtividade do solo.

O carbono orgânico do solo não apresentou variações entre os diferentes sistemas de rotação de culturas. O COT é um indicador essencial da fertilidade do solo, pois reflete a quantidade de matéria orgânica disponível. Ele influencia a retenção de água, a agregação do solo e a disponibilidade de nutrientes, além de ser a principal fonte de energia para os microrganismos. A presença de COT elevado está associado a uma maior atividade biológica e enzimática, que favorece a ciclagem de nutrientes e melhora as condições físicas e químicas do solo, contribuindo diretamente para a sua produtividade e sustentabilidade.

A matéria orgânica é um componente essencial para a fertilidade dos solos agrícolas; portanto, qualquer fator que cause alterações em sua composição pode impactar a interação dos microrganismos presentes no solo.

De acordo com Gregorich *et al.* (1994), a redução do carbono orgânico no solo tem consequências significativas para sua qualidade, pois afeta vários atributos físicos e químicos essenciais. Além da quantidade, a qualidade da matéria orgânica é igualmente relevante, pois o carbono serve como fonte de energia para os microrganismos. O teor de matéria orgânica impacta as propriedades do solo e está relacionado à quantidade de resíduos gerados no ecossistema, refletindo no equilíbrio dinâmico da decomposição (Bot; Benites, 2005).

4. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos demonstram que a β -glucosidase foi um indicador mais sensível às mudanças provocadas pelos diferentes sistemas de rotações de culturas. Este comportamento evidencia o potencial dessa enzima como bioindicador da qualidade do solo, especialmente em sistemas agrícolas que buscam práticas mais sustentáveis e diversificadas.

Por outro lado, as variáveis fosfatase ácida, respiração microbiana e carbono orgânico total do solo não apresentaram diferenças significativas entre os sistemas de rotações de culturas ao longo do período de avaliação. Esse resultado pode estar relacionado ao tempo necessário (no mínimo a partir de dez anos) para que essas variáveis respondam a mudanças no manejo ou à resiliência das condições edáficas frente às práticas adotadas. No entanto, sua estabilidade também pode indicar que os sistemas avaliados não geraram impactos negativos expressivos sobre esses parâmetros.

Portanto, a adoção de rotações diversificadas segue sendo uma prática recomendada, contribuindo para a manutenção ou melhoria da saúde do solo, com destaque para os efeitos observados na atividade da β -glucosidase. Avaliações a longo prazo poderiam oferecer maior clareza sobre os impactos cumulativos das rotações sobre os demais parâmetros.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos, primeiramente, a Deus, por nos guiar e fortalecer ao longo de toda essa jornada acadêmica. Aos nossos pais, pelo apoio incondicional, compreensão e incentivo, que foram fundamentais para a realização deste trabalho. Aos nossos professores, pela dedicação e pelo compartilhamento de conhecimentos, que nos motivaram e inspiraram a cada passo. Aos nossos colegas e amigos, que contribuíram com palavras de encorajamento e apoio em cada desafio enfrentado.

Por fim, agradecemos a todos que, de alguma forma, colaboraram para nosso aprendizado e crescimento, tornando possível a conclusão deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- ANDREOTTOLA, G.; FODAOLLA P.; DALLAGO L. Respirimetria applicata all a depurazione delle acque: principie metodi. **Collanascientifico-divulgativa. Monographia**, n. 3. Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università degli Studi di Trento. 156p. 2002.
- BOT, A.; BENITES, J. The importance of soil organic matter: key to drought resistant soil and sustained food production. **Rome: FAO**, 2005. 95 p. (FAO Soils Bulletin, 80).
- BREMNER, J. M. Total nitrogen. In: BLACK, C. A., 2. ed. Methods of soil analysis. Madison: **American Society of Agronomy**, 1965. p. 1149-1178.
- CANALLI, L. B. DOS S.; COSTA, G. V. DA; VOLSI, B.; LEOCÁDIO, A. L. M.; NEVES, C. S. V. J.; TELLES, T. S. Produção e rentabilidade de sistemas de rotação de culturas no sul do Brasil. **Semina: Ciências Agrárias, Londrina**, 2020. . Acesso em: 30 de setembro de 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2020v41n6p2541>.
- CASALI, C.A.; TIECHER, T.; KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D.; CALEGARI, A.; PICCIN, R. Benefícios do uso de plantas de cobertura do solo na ciclagem de fósforo. In: Manejo e conservação do solo e da água em pequenas propriedades rurais no sul do Brasil: práticas alternativas de manejo visando a conservação do solo e da água. TIECHER, T. Porto Alegre: **URGS**, 2016. **Cap. 2, p. 23-33**.
- CATTELAN, A. J.; GAUDÊNCIO, C. A.; SILVA, T. A. Sistemas de rotação de culturas em plantio direto e os microrganismos de solo, na cultura da soja, em Londrina. **Embrapa Soja- Artigo em periódico indexado (ALICE)**, 1997. Acesso em: 26 de outubro de 2024. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/463246/1/id191270001.pdf>.
- CRUZ, S.C.S; SENA JUNIOR, D.G; AIRES DOS SANTOS, D. M; LUNEZZO, L. O; MACHADO, C. G. Cultivo e Soja Sob Diferentes Densidades De Semeadura e Arranjos Espaciais. **Revista De Agricultura Neotropical , Goiás**, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.32404/rean.v3i1.43>
- DENARDIN, J. E. **Desafio do Plantio Direto. Embrapa. Fevereiro, 2016**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/en/busca-de-noticias/-/noticia/9697114/artigo---desafio-do-plantio-direto>>.
- DENG, S. P.; TABATABAI, M. A. Effect of tillage and residue management on enzyme activities in soils: III. Phosphatases and arylsulfatase. **Biology and Fertility of Soils**, v. 24, n. 2, p. 141-146, 1997.
- EIVAZI, F.; TABATABAI, M. A., Glucosidases and galactosidases in soils. **Soil Biol Biochem** 20, p. 601-606, 1988.
- EIVAZI, F.; TABATABAI, M.A. Phosphatases in soils. **Soil Biol. Biochem.**, 9:167-172, 1977.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Sistema brasileiro de classificação de solos. 2. ed. – Rio de Janeiro : **EMBRAPA-SPI**, 2006. 306 p.: il. ISBN 85-85864-19-2

FEBRAPDP - Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha. **Área de plantio direto no Brasil.** Disponível em: <http://www.febrapdp.org.br/br%20evolucao%20pd%2093-04.html>.

GREGORICH, E.G.; CARTER, M.R.; ANGERS, D.A.; MONREAL, C.M.; ELLERT, B.H. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. **Canadian Journal of Soil Science**, v.74, p.367-385, 1994.

IDR-Paraná. **Dados Meteorológicos Históricos e Atuais nas Estações Experimentais do IDR-Paraná.** Disponível em <https://www.idrparana.pr.gov.br/Pagina/Dados-Meteorologicos-Historicos-e-Atuais>
Acesso em: 13 setembro, 2022.

JANZEN, H. H.; CAMPBELL, C. A.; BRADT, S. A.; LAFOND, G. P.; OWNLEYSMITH, L. Carbon, nitrogen and natural abundance of C e N of light fraction organic matter under no-tillage and crop-livestock integration systems **Soil Science Society of America Journal**. 1992, 56, 1799.

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

MENDES, I. de C., HUNGRIA, M., REIS JÚNIOR, 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. **Planaltina, DF: Embrapa Cerrados - Documentos (INFOTECA-E), 2009.**

JENKINSON, D. S.; POWLSON, D. S. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil-I. Fumigation with chloroform. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 8, p. 167-177, 1976.

MARTÍNEZ, J. M.; GALANTINI, J. A.; DUVAL, M. T.; LÓPEZ, F. M.; IGLESIAS, J. O. Estimating soil organic carbon in Mollisols and its particle-size fractions by loss-on-ignition in the semiarid and semihumid Argentinean Pampas. **Geoderma Regional**, v. 12, p. 49-55, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2017.12.004>>. Acesso em: 08 jun. 2024.

MELO, E.N.P., BOMBONATTO A.K.G., MOREIRA, L.M.O., FALEIRO, D.S., FERREIRA, MOREIRA, F. M. S., SIQUEIRA, J. O. Microbiologia e Bioquímica do Solo. Microbiologia e Bioquímica do Solo, **729. Editora UFLA.2006.** Disponível em:http://www.esalq.usp.br/departamentos/Iso/arquivos_aula/LSO_400%20Livro%20-%20Microbiologia%20e%20bioquimica%20do%20solo.pdf.

PECHE FILHO, AFONSO. **Mecanização do Sistema de Plantio Direto. 2005.** Disponível em: http://www.iac.sp.gov.br/publicacoes/agronomico/pdf/v571_mecanizacao_sistema_plantio_direto.pdf.

QUILCHANO, C.; MARANÓN, T. Dehydrogenase activity in Mediterranean Forest soils. **Biology and Fertility of Soils, Berlin**, v. 35, n. 2, p. 102-107, 2002.

SCHUMACHER, M. V. BRUM, E. J.; HERNANDES, I. J.; KONIG, G. F. Quantificação de carbono orgânico na serapilheira, sub-bosque e solo de uma Floresta de *Pinus elliottii* Engelm. aos 36 anos, em Santa Maria, RS. In. SANQUETTA, C. R. et al. (eds.). **Fixação de carbono: atualidades, projetos e pesquisas.** Curitiba, 2004. p. 125-132.

SIX, J.; FELLER, C.; DENEFF, K.; OGLE, S.; SA, J. C. M.; ALBRECHT, A. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils – Effects of no-tillage. **Agronomie, EDP Sciences**, v. 22, n. 7-8, p. 755-775, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/agro:2002043>. Acesso em: 08 jun. 2024.

STEVENSON, F. J; Cole, M.A.. Cycles of soil carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients. **United States of America**, John Wiley & Sons, 1986, 380.

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, Jan. 1934.

ZANG, X., LIU, M., FAN, Y., XU X., HONGTAO L., et al. As contribuições estruturais e funcionais das comunidades microbianas produtoras de β -glucosidase para a degradação da celulose na compostagem. **Biotechnol Biofuels** 11, 51 (2018).