

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

CASSIANO CONTE

**ESTOQUE E FRACIONAMENTO DE CARBONO INFLUENCIADO POR
SISTEMAS DE CULTIVO E CULTURAS DE COBERTURA EM UM
EXPERIMENTO DE LONGO TEMPO**

**PATO BRANCO
2024**

CASSIANO CONTE

**ESTOQUE E FRACIONAMENTO DE CARBONO INFLUENCIADO POR
SISTEMAS DE CULTIVO E CULTURAS DE COBERTURA EM UM
EXPERIMENTO DE LONGO TEMPO**

**Carbon storage and fractionation influenced by tillage systems and cover
crops in a long-term experiment**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Pato Branco, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Agronomia - Área de Concentração: Solos e Sistemas Integrados de Produção Agropecuária.
Orientador(a): Prof. Dr. Luís César Cassol.
Coorientador(a): Prof. Dr. Jonatas Thiago Piva.

PATO BRANCO

2024



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Pato Branco



CASSIANO CONTE

ESTOQUE E FRACIONAMENTO DE CARBONO INFLUENCIADO POR SISTEMAS DE CULTIVO E CULTURAS DE COBERTURA EM UM EXPERIMENTO DE LONGO TEMPO

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Agronomia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Solos E Sistemas Integrados De Produção Agropecuária.

Data de aprovação: 21 de Agosto de 2024

Dr. Luis Cesar Cassol, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Jeferson Dieckow, Doutorado - Universidade Federal do Paraná (Ufpr)

Lincon Oliveira Stefanello Da Silva, - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 22/08/2024.

Razão do meu existir, refúgio nos momentos de angústia, força para continuar... Dificilmente eu consigo substituir os momentos de ausência e de dificuldades que foram enfrentadas neste período, entretanto, à minha família pelo apoio recebido, dedico este humilde trabalho.

AGRADECIMENTOS

Dois anos de estudos, dedicação e preocupações talvez não possam ser resumidos em algumas poucas linhas. Entretanto, gostaria de deixar meu profundo agradecimento às pessoas e/ou instituições que de alguma ou de outra forma contribuíram para a concretização deste importante e almejado objetivo para minha vida e carreira profissional.

Primeiramente, agradeço a Deus pelo dom da vida, que me permite estar presente, e pela saúde, a qual possibilita desenvolver tudo o que busco.

Agradeço ao meu orientador, Dr. Luís César Cassol por ter aceito o desafio de minha orientação, sabendo que há muito tempo não sentava nos bancos acadêmicos. Em sua pessoa, agradeço também à UTFPR-PB, a qual novamente me aceitou como seu aluno e disponibilizou os meios para que eu pudesse buscar minha formação.

Agradeço ao Prof. Dr. Jonatas Thiago Piva que, na função de coorientador do meu trabalho, passou as bases de como fazer, além de contribuir com o conhecimento necessário para a realização de todo o projeto.

Agradeço à minha família, esposa Clenize Garda Conte, meu irmão Mauro Conte, meu pai Arlindo Conte, cunhado Eduardo De Marco e primo Marcos Antônio Balabuch, pelo auxílio físico nos laboriosos trabalhos de coletas e avaliações do experimento. Sem vossos auxílios o trabalho teria sido muito mais desgastante.

Agradeço à minhas sobrinhas Maria Regina Faversoni e Joana Cristina Faversoni, ambas estudantes, de Agronomia e Engenharia Mecânica, respectivamente na UTFPR-PB, pela dedicação em me auxiliar nas avaliações e coletas.

Agradeço também ao LabSolos pelo auxílio na construção do conhecimento e nas análises efetuadas para este trabalho.

Agradeço aos colegas que durante esses dois anos dividimos salas de aulas, bem como nos auxiliamos na realização dos trabalhos, especialmente ao grupo de pesquisa em fertilidade do solo.

Enfim, agradeço a todos que de uma forma ou de outra contribuíram para que este trabalho deixasse de ser um objetivo para se tornar uma realização.

Obrigado!

A natureza não aceita propinas.
Herbert Bartz

RESUMO

CONTE, Cassiano. Estoque e fracionamento de carbono influenciado por sistemas de cultivo e culturas de cobertura em um experimento de longo tempo. 2024. 74 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Área de Concentração: Solos e Sistemas Integrados de Produção Agropecuária). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2024.

O Sistema Plantio Direto (SPD) é importante não apenas por sua contribuição na produtividade dos cultivos, mas também pela economia no uso de combustíveis fósseis e maior sequestro de carbono, contribuindo para melhoria na qualidade do solo e redução de gases de efeito estufa, desde que respeitados os seus pressupostos básicos (revolvimento mínimo e exclusivo na linha de semeadura, rotação de culturas e cobertura permanente do solo). Com o objetivo de verificar a influência de sistemas de cultivo e de plantas de cobertura sobre o teor e estoque de Carbono Orgânico Total (COT), Carbono Orgânico Particulado (COP) e Carbono Orgânico Associado aos Minerais (COAM) no solo, procedeu-se a avaliação de um experimento localizado na área experimental da UTFPR-PB, na cidade de Pato Branco-PR. O experimento foi instalado no ano de 2011, composto pela combinação de três sistemas de cultivo (plantio direto - PD, cultivo mínimo - CM e cultivo convencional - PC) e três plantas de cobertura (aveia preta - AP, nabo forrageiro - NF e ervilhaca peluda - EP), sob o delineamento de blocos ao acaso com três repetições. Em setembro de 2022 e agosto de 2023, procedeu-se as coletas e avaliações de produção de massa seca das plantas de cobertura. A coleta de amostras e avaliação de COT, COP e COAM no solo foi feita em outubro e novembro de 2022, na profundidade de 0-100 cm, dividida em oito camadas. Em março de 2023, procedeu-se a colheita e avaliação dos componentes de rendimento da cultura da soja. Maiores produtividades da soja foram verificadas com o PD. A produção de massa seca das plantas de cobertura foi influenciada pela espécie utilizada, tanto no ano de 2022 como no acumulado dos dois anos, sendo superior na AP. Maior teor de COT foi observado nas camadas superficiais, sem influência dos sistemas de cultivo, porém afetado pelas plantas de cobertura, onde a EP mostrou maior teor na camada 20-30 cm. Verificou-se interação entre os sistemas de cultivo e plantas de cobertura para o teor de COP na camada de 0-5 cm, com maior resultado na combinação NF em CM. Na camada 5-10 cm, a EP apresentou maiores teores de COP. O estoque de COT foi maior no PC na camada 10-20 cm e com a EP na camada 20-30 cm. No acumulado das camadas 0-30 cm e 0-100 cm, não se verificou diferenças entre os sistemas de cultivo, porém, foi influenciado pelas plantas de cobertura, onde nas duas profundidades o maior estoque foi observado também com a EP. Não houve diferenças entre os sistemas de cultivo quanto ao COAM, entretanto, este foi influenciado pelas plantas de cobertura na camada 20-30 cm e nos acumulados 0-30 cm e 0-100 cm, com maiores valores para a EP.

Palavras-chave: Plantio direto; ervilhaca; aveia; Carbono Orgânico Particulado.

ABSTRACT

CONTE, Cassiano. Carbon storage and fractionation influenced by tillage systems and cover crops in a long-term experiment. 2024. 74 f. Dissertation (Master in Agronomy) – Postgraduate Program in Agronomy (Concentration Area: Soils and Integrated Agricultural Production Systems, Federal Technological University of Paraná– Pato Branco (UTFPR), 2024.

The Sistema Plantio Direto (SPD) is important not only for its contribution to crop productivity, but also for its savings in the use of fossil fuels and greater carbon sequestration, contributing to improved soil quality and reduction of greenhouse gases, as long as its basic assumptions are respected (minimum and exclusive disturbance in the seeding line, crop rotation and permanent soil cover). In order to verify the influence of tillage systems and cover crops on the content and stock of Total Organic Carbon (COT), Particulate Organic Carbon (COP) and Mineral-Associated Organic Carbon (COAM) in the soil, an experiment located in the experimental area of UTFPR-PB, in the city of Pato Branco-PR, was evaluated. The experiment was installed in 2011 and consisted of a combination of three tillage systems (no-tillage - PD, minimum tillage - CM, and conventional tillage - PC) and three cover crops (black oat - AP, forage radish - NF, and hairy vetch - EP), under a randomized block design with three replications. In September 2022 and August 2023, dry matter production of cover crops was collected and evaluated. Samples were collected and evaluation of COT, COP, and COAM in the soil was carried out in October and November 2022, at a depth of 0-100 cm, divided into eight layers. In March 2023, soybean crop yield components were harvested and evaluated. Higher soybean yields were verified with PD. The dry matter production of cover crops was influenced by the species used, both in 2022 and in the accumulated total of both years, being higher in AP. The highest COT content was observed in the surface layers, without influence of the tillage systems, but affected by the cover crops, where EP showed the highest content in the 20-30 cm layer. There was an interaction between the tillage systems and cover crops for the COP content in the 0-5 cm layer, with the highest result in the NF in CM combination. In the 5-10 cm layer, EP showed the highest COP contents. The COT stock was higher in PC in the 10-20 cm layer and with EP in the 20-30 cm layer. In the accumulated layers 0-30 cm and 0-100 cm, there were no differences between the tillage systems, however, it was influenced by the cover crops, where in both depths the highest stock was also observed with EP. There were no differences between the tillage systems regarding the COAM, however, it was influenced by the cover crops in the 20-30 cm layer and in the accumulated 0-30 cm and 0-100 cm, with higher values for EP.

Keywords: No-tillage; vetch; oat; Particulate Organic Carbon.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Análise química do solo (0-20 cm) antes do início do experimento, no ano de 2011. UTFPR, Campus Pato Branco, 2024	26
Tabela 2 – Produção de MS no ano 2022 e MS acumulada nos anos 2022 e 2023 de diferentes plantas de cobertura do solo. Pato Branco - PR, 2024	32
Tabela 3 – Produtividade da soja em função dos diferentes sistemas de cultivo do solo. Pato Branco - PR, 2024	33
Tabela 4 – Concentração de COT, nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-45, 45-60, 60-80 e 80-100 cm, em função dos sistemas de cultivo e das plantas de cobertura. Pato Branco - PR, 2024	33
Tabela 5 – Concentração de COP (g kg^{-1}), na profundidade de 0-5 cm em função dos sistemas de cultivo e das plantas de cobertura. Pato Branco - PR, 2024	34
Tabela 6 – Concentração de COP, nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-45, 45-60, 60-80 e 80-100 cm em função dos sistemas de cultivo e das plantas de cobertura. Pato Branco - PR, 2024	35
Tabela 7 –Estoque de COT (Mg ha^{-1}), nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-45, 45-60, 60-80 e 80-100 cm em função dos sistemas de cultivo e das plantas de cobertura. Pato Branco - PR, 2024	36
Tabela 8 – Estoque de COT (Mg ha^{-1}) nas profundidades de 0-30 cm e 0-100 cm em função dos sistemas de cultivo e das plantas de cobertura do solo. Pato Branco - PR, 2024	37
Tabela 9 – Estoque de COP (Mg ha^{-1}) na profundidade de 0-5 cm em função dos sistemas de cultivo e das plantas de cobertura. Pato Branco - PR, 2024 ..	37
Tabela 10 – Estoque de COP (Mg ha^{-1}) nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-45, 45-60, 60-80 e 80-100 cm em função dos sistemas de cultivo e das plantas de cobertura. Pato Branco - PR, 2024	38
Tabela 11 - Estoque de COP (Mg ha^{-1}) nas profundidades de 0-30 cm e 0-100 cm em função dos sistemas de cultivo e das plantas de cobertura do solo. Pato Branco - PR, 2024	39
Tabela 12 – Estoque de COAM (Mg ha^{-1}); nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-45, 45-60, 60-80 e 80-100 cm em função dos sistemas de cultivo e das plantas de cobertura. Pato Branco - PR, 2024	39
Tabela 13 - Estoque de COAM (Mg ha^{-1}) nas profundidades de 0-30 cm e 0-100 cm em função dos sistemas de cultivo e das plantas de cobertura do solo. Pato Branco - PR, 2024	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

μm	Micrômetro
AP	Aveia Preta
AC	Agricultura Conservacionista
CM	Cultivo Mínimo
cm	Centímetro
CO_2	Dióxido de Carbono
COP	Carbono Orgânico Particulado
COS	Carbono Orgânico do Solo
COT	Carbono Orgânico Total
COAM	Carbono Orgânico Associado aos Minerais
CTC	Capacidade de Troca de Cátions
EF	Ervilha Forrageira
Embrapa	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EP	Ervilhaca Peluda
g dm^{-3}	Gramas por decímetro cúbico
g L^{-1}	Gramas por litro
g kg^{-1}	Gramas por quilograma
GV	Grãos por vagem
ha	Hectare
Kg ha^{-1}	Quilogramas por hectare
m	Metro
$\text{Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$	Megagramas de C por hectare por ano
Mg ha^{-1}	Megagramas por hectare
Mha	Milhões de hectares
mL	Mililitros
mm	Milímetros
MOAM	Matéria Orgânica Associada aos Minerais
MOP	Matéria Orgânica Particulada
MOS	Matéria Orgânica do Solo
MS	Massa Seca
Mt	Milhões de toneladas
NF	Nabo Forrageiro
PC	Plantio Convencional
PD	Plantio Direto
Pg	Pentagramas
PMG	Peso de mil grãos
PROD	Produtividade
SPD	Sistema Plantio Direto
Tg C ano^{-1}	Teragramas de C por ano
VP	Vagens por planta
UTFPR-PB	Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Pato Branco

LISTA DE SÍMBOLOS

C	Carbono
Cu	Cobre
Mo	Molibdênio
N	Nitrogênio
°C	Graus Célsius
P	Fósforo
pH	Potencial Hidrogeniônico
S	Enxofre
Zn	Zinco

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Hipóteses	15
1.2	Objetivos	15
1.2.1	Geral.....	15
1.2.2	Específicos	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	O sistema plantio direto: histórico, conceito e problemas	17
2.2	Importância das plantas de cobertura do solo	18
2.3	Matéria orgânica x qualidade do solo	20
2.4	Fracionamento físico da matéria orgânica do solo	22
2.5	O solo como fonte e/ou dreno de C	23
3	MATERIAL E MÉTODOS	26
3.1	Local do experimento	26
3.2	Delineamento experimental, composição dos tratamentos e condução do experimento	26
3.3	Avaliações realizadas	28
3.3.1	Massa seca das culturas de cobertura	28
3.3.2	Rendimento de grãos e componentes de rendimento da soja	29
3.3.3	Estoques de C e densidade do solo.....	29
3.3.4	Fracionamento granulométrico da matéria orgânica	30
3.3.5	Análise estatística.....	31
4	RESULTADOS	32
4.1	Massa seca das plantas de cobertura	32
4.2	Componentes de rendimento e produtividade da soja	32
4.3	Concentração de carbono orgânico total (COT) e carbono orgânico particulado (COP)	33
4.3.1	Concentração de COT.....	33
4.3.2	Concentração de COP	34
4.4	Estoques de carbono orgânico total (COT), carbono orgânico particulado (COP) e carbono orgânico associado aos minerais (COAM)	36
4.4.1	Estoque de COT.....	36
4.4.2	Estoque de COP.....	37
4.4.3	Estoque de COAM.....	39
5	DISCUSSÃO	41

5.1	Massa seca das plantas de cobertura	41
5.2	Componentes de rendimento e produtividade da soja	42
5.3	Concentração de COT e COP	44
5.3.1	Concentração de COT.....	44
5.3.2	Concentração de COP	46
5.4	Estoque de carbono orgânico total (COT), carbono orgânico particulado (COP) e carbono orgânico associado aos minerais (COAM)	48
5.4.1	Estoque de COT.....	48
5.4.2	Estoque de COP.....	54
5.4.3	Estoque de COAM.....	56
6	CONCLUSÃO	59
	REFERÊNCIAS.....	60
	APENDICE A – ANOVA: MS, COMPONENTES DE RENDIMENTO E PRODUTIVIDADE DA SOJA.....	67
	APENDICE B – ANOVA CONCENTRAÇÃO DE COT E COP	69
	APENDICE C – ANOVA ESTOQUE DE COT, COP E COAM	71
	APENDICE D – ANOVA: ESTOQUES ACUMULADOS DE COT, COP E COAM.....	73

1 INTRODUÇÃO

A partir da década de 1970 a agricultura brasileira expandiu, modernizou-se e se tornou um importante setor da economia brasileira. Junto com esse protagonismo vieram também alguns problemas e desafios, sendo o principal deles a degradação do solo.

A rápida expansão da fronteira agrícola entre os anos de 1969 e 1977, baseado no preparo convencional do solo, provocou perdas via erosão, na ordem de mais de 10 t ha^{-1} de solo para cada tonelada de grão produzido (AMADO; ELTZ, 2003). A erosão hídrica foi e é o principal e mais visível efeito resultante do manejo inadequado do solo, em função da degradação da estrutura do solo, a qual é agravada pelo impacto das gotas da chuva no solo sem cobertura, seguido pelo escoamento e erosão superficial levando e depositando os sedimentos do solo (CASÃO JUNIOR; ARAÚJO; LLANILLO, 2012) nas partes mais baixas do relevo ou dentro de rios e córregos.

Preocupados com esta situação, já no início da década de 1970, com maior evolução na década de 1990, começou a se repensar o sistema de cultivo, com vistas a estancar o processo erosivo dos solos. Essa demanda vinha da pesquisa, ao constatar os problemas decorrentes das falhas de manejo, e também dos produtores, que viam os custos aumentarem e a produtividade de suas lavouras diminuir. A partir dessas constatações, nesse período começaram estudos envolvendo o Sistema Plantio Direto (SPD).

Essencialmente, com o SPD buscou-se resolver o principal problema enfrentado pelos agricultores no momento, que era a erosão do solo, uma vez que o sistema se baseia em três princípios básicos: revolvimento do solo exclusivo na linha de semeadura, rotação de culturas e cobertura permanente do solo.

O menor revolvimento do solo, mantendo assim resíduos sobre a superfície e evitando a desagregação das partículas do solo, propicia a redução da erosão. A rotação de culturas, tem por objetivo a inclusão de mais de uma cultura na área, evitando a seleção de doenças e pragas, favorecendo a ciclagem de nutrientes e utilizando espécies com sistema radicular agressivo visando a descompactação dos solos. A cobertura do solo, por plantas vivas e mortas, desempenha papel fundamental no sistema, mantendo a umidade do solo e evitando variações de temperatura, protegendo o solo da ação da chuva, promovendo a reciclagem de nutrientes e aporte

de resíduos na superfície. Dessa forma, a utilização de culturas com o objetivo de produção de massa para cobertura de solo nos períodos de entressafra das culturas comerciais, é uma das principais estratégias para a manutenção da qualidade e eficiência do SPD.

Desde a sua origem o SPD se modernizou, ampliou sua área de uso e pode ser considerado uma das grandes revoluções da agricultura brasileira. No entanto, o que se observa atualmente é que tem ocorrido, por parte dos produtores, uma simplificação de suas técnicas e conceitos. Isto é devido em parte pela alta intensificação na utilização de culturas comerciais, com safra de verão/safrinha/safra de inverno, não sobrando espaço no calendário para inclusão de plantas de cobertura, e também pela utilização eventual de equipamentos como escarificadores e/ou subsoladores para contornar mecanicamente problemas causados justamente pela falta de culturas de cobertura no sistema. A ausência dessas plantas, fundamentais para o sucesso do SPD, reduz o aporte de biomassa no sistema e compromete os estoques de carbono no solo, reduzindo a qualidade e sustentabilidade do sistema.

Na prática, para muitos agricultores, o SPD se resume a apenas o plantio direto (PD), “esquecendo” dos três pilares fundamentais e tão somente efetuando a semeadura das culturas de verão com o mínimo revolvimento do solo. Nesses casos não ocorre o plantio de culturas de cobertura e, de forma muitas vezes empírica, também se utilizam, mesmo que esporadicamente, implementos para mobilização e revolvimento do solo. Esse quadro tem trazido novamente problemas semelhantes aos observados nas décadas de 1970-80, com erosão superficial e degradação da fertilidade do solo.

Nessas situações se observa declínio da matéria orgânica do solo (MOS) e conseqüentemente do teor e estoque de carbono (C) nela contido, trazendo sérias implicações à qualidade do solo, visto que a mesma desempenha papel importantíssimo, influenciando características químicas, físicas, biológicas e hidrológicas do solo. Além desses aspectos, o C contido na MOS e que é “perdido” durante os processos de degradação, é liberado para a atmosfera na forma de CO₂ contribuindo para o aumento do aquecimento global, que é um dos problemas mais debatidos atualmente à nível mundial.

No entanto, especialmente em solos muito argilosos de mineralogia caulinítica e oxídica, os quais têm alta estabilidade estrutural e proteção física da MOS, nem sempre são esperadas alterações de curto prazo envolvendo distintos sistemas de

cultivo. Nessas situações o fracionamento físico da matéria orgânica se constitui em importante indicador para verificação da ocorrência (ou não) de processos de degradação do solo.

É fato que o Brasil assumiu um papel de destaque muito grande no agronegócio mundial, com elevado volume de exportações e elevado superávit na balança comercial. Porém, para manter ou ampliar essa participação se faz necessário retomar o uso das boas práticas de manejo do solo. Ainda, é de grande importância a avaliação da real influência dessa omissão nas práticas do SPD, como o revolvimento do solo e a não utilização de culturas de cobertura, sobre os estoques e compartimentos de C do solo, bem como a taxa de acúmulo ou perda de C e sua relação com a produtividade das culturas de interesse econômico.

1.1 Hipóteses

O SPD proporciona maior estoque de C no solo, principalmente na fração leve, beneficiada positivamente pela ausência de revolvimento do solo e na fração oclusa, protegida pela associação com a argila devido ao longo período do experimento.

O revolvimento do solo no plantio convencional diminuirá o estoque de C principalmente na fração leve, enquanto o C na fração oclusa, protegida fisicamente pela associação com os minerais, tende a apresentar menores alterações.

As plantas de cobertura da família das leguminosas proporcionarão maior acúmulo de C no solo ao adicionarem maiores quantidades de N no sistema via fixação biológica de nitrogênio.

1.2 Objetivos

1.2.1 Geral

Avaliar os efeitos de sistemas de cultivo, associados a culturas de cobertura do solo, em um experimento de longa duração, sobre os estoques de C do solo, suas frações e a influência sobre a produção de massa seca das plantas de cobertura e produtividade da cultura da soja.

1.2.2 Específicos

Quantificar os teores e estoques de carbono orgânico total, carbono orgânico particulado e carbono orgânico associado aos minerais em ensaio de longa duração envolvendo sistemas de cultivo e culturas de cobertura do solo;

Verificar a influência do SPD sobre o estoque de C, na fração leve (carbono orgânico particulado) e na fração pesada (carbono orgânico associado aos minerais);

Verificar a influência do plantio convencional sobre o teor e estoque de C na fração leve;

Verificar a influência das plantas de cobertura leguminosas sobre os estoques de C no solo;

Avaliar a influência dos sistemas de cultivo e culturas de cobertura sobre a produção de massa seca das culturas de cobertura e produção de grãos da cultura da soja.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 O sistema plantio direto: histórico, conceito e problemas

Implantado no Brasil na década de 1970, o SPD foi sendo adotado pelos produtores brasileiros, pois se dispunha a resolver os graves problemas de degradação dos solos que até então ocorriam. Logo na sequência esses mesmos produtores perceberam se tratar de um sistema mais econômico, em função da redução do número de operações mecanizadas e do consumo de óleo diesel. Nos dias atuais, essa redução no uso de combustível fóssil, associado ao maior sequestro de carbono possibilitado pelo SPD, faz do sistema uma importante ferramenta para redução do aquecimento global, incluído como uma das práticas em planos como ABC e ABC+, vinculados ao Ministério da Agricultura e Pecuária.

O sistema está fundamentado no revolvimento do solo exclusivo na linha de semeadura, na cobertura permanente do solo com resíduos vegetais e na rotação de culturas (SALTON; HERNANI; FONTES, 1998). O SPD foi essencial na manutenção e qualidade do solo, e sobretudo, sustentando o contínuo aumento de produtividade observado no Brasil nos últimos anos, onde a área cultivada (no caso da cultura da soja) aumentou em 539%, de 6,9 Mha para 44,1 Mha, enquanto a produção total saltou de 12,145 Mt para 154,609 Mt, um aumento de 1.173% (período 1976/77 a 2022/23) (CONAB, 2024).

No entanto, ao longo do tempo, a simplificação das técnicas do SPD por parte dos agricultores, tem conduzido o solo novamente a processos de degradação, semelhantes aos observados nas décadas de 1970-80. Segundo Bai et al. (2008), aproximadamente 23% do território mundial tem problemas de degradação de solo, índice semelhante ao reportado para o Brasil, onde há aproximadamente 1.881.702 Km² degradados, correspondendo a 22% do território nacional. No Brasil, dos 33 Mha em Plantio Direto na safra 2017 (FUENTES-LLANILLO *et al.*, 2021), estima-se que no máximo 20% se valham dos preceitos preconizados para o sistema plantio direto (Denardin, 2018 apud POSSAMAI *et al.*, 2022).

Dentre os problemas observados, a não utilização de culturas de cobertura vegetal e adubação verde, associado a períodos de pousio, é um dos principais pontos negligenciados atualmente. Isso tem deixado os solos descobertos, onde a

quantidade de resíduos e massa seca (MS) é baixa, e conseqüentemente os níveis de MOS são diminuídos.

Por outro lado, em um sistema corretamente manejado, a utilização da aveia preta, como cobertura de inverno, mesmo sem adubação nitrogenada e sem pastejo, é capaz de fornecer $1,93 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (RIBEIRO *et al.*, 2020). A mesma situação ocorre quando se utilizam, exclusivamente, culturas ditas de valor comercial e que deixam pouca quantidade de resíduos no solo, como é o caso da soja, que forneceu ao solo somente $2,2 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (RIBEIRO *et al.*, 2020), sendo que esse valor é bem abaixo do aporte mínimo de C exigido pelo sistema para sua manutenção que é de $4,00 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (DE MORAES SÁ *et al.*, 2015).

2.2 Importância das plantas de cobertura do solo

O SPD se insere no contexto de Agricultura conservacionista (AC) a qual engloba a gestão sustentável da terra, proteção ambiental e adaptação e mitigação das mudanças climáticas, tendo como princípios básicos o não revolvimento do solo, cobertura vegetal constante e rotação de culturas (FAO, 2022). Assim, o uso de plantas de cobertura tem grande importância e é determinante para o sucesso do sistema.

Em essência, estas plantas possuem a função de cobrir o solo integrando o manejo de rotação de culturas dentro dos sistemas conservacionistas, seja no período de entressafra na produção de grãos, ou no período de renovação de áreas de cana-de-açúcar, bem como entre fileiras de cultivos arbóreos perenes ou como cultivo principal em áreas destinadas a pastagem (CHERUBIN, 2022). A importância da utilização de plantas de cobertura é há muito tempo amplamente conhecida. O controle da erosão, associado à constante cobertura do solo por resíduos de plantas de cobertura e adequada rotação de culturas é uma das formas mais eficientes para conservar o solo e possibilitar o uso permanente da terra pelos sistemas de produção (DERPSCH; SIDIRAS; ROTH, 1986).

Dentre os benefícios das plantas de cobertura Calegari *et al.* (1992) destacam os seguintes:

- Sobre propriedades químicas: aumento da MOS; aumento na disponibilidade de macro e micronutrientes; aumento da CTC efetiva do solo;

complexação do alumínio trocável; fixação de N e reciclagem de nutrientes.

- Sobre propriedades físicas do solo: melhoria na agregação do solo; retenção de água; densidade; infiltração de água; porosidade e aeração.
- Sobre propriedades biológicas: promoção do desenvolvimento da micro e macrofauna no solo pela manutenção da umidade, redução de variações de temperatura e fornecimento de substrato energético.

Inúmeros trabalhos têm comprovado os efeitos benéficos das plantas de cobertura ao solo. Segundo Bayer et al. (2003) a adoção de plantas de cobertura no sistema propiciou recuperação parcial dos estoques de C orgânico e nitrogênio total em solo sob preparo reduzido. Piva et al. (2021) observaram, durante cinco anos, que em solos com alta MOS é possível o cultivo de milho sem adição de N mineral quando este for cultivado em sucessão a leguminosas como cobertura vegetal (ervilhaca comum).

O não revolvimento do solo e a adoção de plantas de cobertura apresentam mútuos benefícios e se complementam no sistema, pois existe um sinergismo quando se utilizam culturas de cobertura associados ao SPD, promovendo uma rápida recuperação do C e N contido originalmente nos solos sobre vegetação nativa (TIECHER *et al.*, 2020). Wulanningtyas et al. (2021) citam que a ausência do revolvimento do solo e as culturas de cobertura claramente afetam a CTC, tendo também alta influência no acúmulo de carbono orgânico do solo (COS), sendo que este, é um importante indicador de qualidade e saúde do solo tendo correlação com algumas propriedades do solo.

Quando culturas de cobertura de inverno foram cultivadas em um sistema sem revolvimento do solo, maiores quantidades de C foram sequestradas (CALEGARI *et al.*, 2008). Dados semelhantes são mostrados por (RAPHAEL *et al.*, 2016), concluindo que a taxa anual de acúmulo de MS e N nos resíduos das plantas, especialmente nas culturas de primavera, influenciam o acúmulo de C no solo.

Num experimento de 26 anos de duração, as culturas de cobertura de inverno foram mais importantes que o sistema de cultivo (com ou sem revolvimento), no acúmulo de C e N no solo (TIECHER *et al.*, 2020). Ou seja, mesmo com o revolvimento do solo, mas usando plantas como cobertura vegetal é possível obter acúmulo de C e N semelhante às áreas sem revolvimento. O manejo deficiente, com baixa diversidade de culturas e períodos de pousio se traduz em baixo índice de COS, sendo que os

maiores valores foram encontrados nos tratamentos onde a rotação de culturas foi intensificada e o revolvimento inexistente (DE OLIVEIRA FERREIRA *et al.*, 2013).

O não revolvimento do solo, associado com alta produção e acúmulo de MS através de leguminosas, são parâmetros efetivos para avaliação do estoque de carbono do solo em longos períodos e tem potencial para atenuar os efeitos do aquecimento global em condições subtropicais e tropicais, em comparação com as práticas utilizadas pelos agricultores (VELOSO *et al.*, 2018).

2.3 Matéria orgânica x qualidade do solo

Solos com alta qualidade ou “saudáveis” são importantes alicerces para a saúde da economia, do meio ambiente e da biosfera terrestre (LAL, 2015). Diferentemente da qualidade do ar ou da água, onde basicamente se mede seus níveis de poluição para se inferir qualidade, a determinação e quantificação de “qualidade do solo” é mais complexa, pois a mesma é influenciada por diversas características intrínsecas (como sua textura e composição química) e por características conferidas pelo seu sistema de manejo, uso e tipo de cultura cultivada. Por definição, qualidade do solo envolve um conceito muito mais amplo do que simplesmente o grau de poluição do mesmo, e é definido como a capacidade do solo em funcionar no ecossistema e limites de uso da terra, para sustentar a produtividade biológica, manter a qualidade do meio ambiente e promover a saúde de plantas e animais (DORAN; PARKIN, 1994, 1996).

Por influenciar nas propriedades físicas, biológicas e químicas dos solos e na produtividade das plantas, a MOS é a chave para manutenção da qualidade e saúde do solo, e os esforços para manter a sua disponibilidade através de práticas como não revolvimento do solo e uso de culturas de cobertura no solo são muito importantes (WULANNINGTYAS *et al.*, 2021). No entanto, sempre é importante considerar um conjunto de atributos para se inferir sobre qualidade do solo. Dessa forma, indicadores de qualidade do solo devem ser compostos por uma combinação entre propriedades físicas, químicas e biológicas sensíveis ao manejo (ISLAM; WEIL, 2000).

A MOS influencia positivamente diversas características do solo, como o aumento da CTC (BAYER *et al.*, 2003; RAMOS *et al.*, 2018), da estabilidade dos agregados (NASCENTE; STONE; CRUSCIOL, 2015; SAPKOTA *et al.*, 2012), da resistência tênsil e friabilidade (GUIMARÃES *et al.*, 2009), dentre outras. A melhora em uma propriedade do solo pela MOS concomitantemente afeta outras propriedades

e/ou processos físicos, biológicos e químicos inter-relacionados, havendo uma relação mútua entre MOS e as propriedades do solo; onde, por exemplo, o aumento na agregação pela MOS melhora a estabilidade dos agregados que protegem e favorecem o armazenamento do C por longo período (BLANCO-CANQUI *et al.*, 2013). O aumento do estoque de carbono orgânico do solo melhora a qualidade do solo, pois observou-se uma forte relação entre o estoque de C do solo (0-1,00 m) e o Índice de Resiliência (RI) (DE MORAES SÁ *et al.*, 2015).

Dentre as estratégias para restauração da qualidade do solo e redução dos riscos de degradação ambiental estão a redução da erosão do solo e a criação de um gradiente positivo de acumulação de C no solo/sistema (LAL, 2015). A adoção do SPD com a utilização de culturas de cobertura apresenta características que suprem essas necessidades, cobrindo o solo e evitando a erosão, fornecendo resíduos em grande quantidade para o acúmulo de C no solo, reciclando nutrientes, aumentando a biodiversidade do solo e fornecendo raízes, que atuam liberando compostos, agregando o solo e formando bioporos.

Ao mesmo tempo que o SPD soluciona os problemas relacionados à erosão dos solos pela água, quando corretamente utilizado, também propicia melhora em características químicas do solo, aumentando o teor de MOS e o estoque de C orgânico do solo (DE MORAES SÁ *et al.*, 2014) e disponibilidade de P (MOREIRA *et al.*, 2020); físicas, com correlação positiva entre o aumento de C orgânico e a maior estabilidade de agregados (NASCENTE; STONE; CRUSCIOL, 2015) e biológicas (ASENSO *et al.*, 2019) com aumento da biomassa microbiana e atividade biológica do solo (AZIZ; MAHMOOD; ISLAM, 2013; SUNDERMEIER *et al.*, 2011).

Por atuarem diretamente na melhoria das propriedades do solo favorecendo o acúmulo de matéria orgânica, o uso de culturas de cobertura é uma prática essencial para a manutenção (RAMOS *et al.*, 2020) e melhora na qualidade do solo. As principais estratégias para melhora na qualidade do manejo do solo foram a redução no revolvimento do solo substituindo plantio convencional pelo plantio direto e adoção de um sistema de cultivo intensificado com culturas de cobertura (DE OLIVEIRA FERREIRA *et al.*, 2013).

A discussão sobre qualidade do solo vem crescendo em importância, uma vez que o solo desempenha serviços essenciais para a vida humana e os ecossistemas. Desta forma, num solo saudável tem-se maior probabilidade de obter-se elevados rendimentos, os quais são fundamentais para a segurança alimentar.

2.4 Fracionamento físico da matéria orgânica do solo

Entende-se por MOS como uma ampla gama de compostos gerados por plantas e microrganismos, biomassa microbiana e restos de culturas, dentre outros. Vários métodos têm tentado separar a MOS em compartimentos/frações, como no caso de Cambardella & Elliott (1992) que separam a MOS em matéria orgânica particulada (MOP) e matéria orgânica associada aos minerais (MOAM), sendo este um método muito utilizado para avaliação da dinâmica da MOS (LAVALLEE; SOONG; COTRUFO, 2020). A opção de se utilizar MOP e MOAM se deve pela praticidade e simplicidade na obtenção das frações da MOS e pela sensibilidade das diferentes frações ao manejo do solo (LOCATELLI *et al.*, 2022).

Considerando os mecanismos de formação, persistência e funções, MOP e MOAM são componentes fundamentalmente diferentes da MOS, sendo que a MOP é composta por fragmentos grandes ($>53\mu\text{m}$), de baixo peso e relativamente não decompostos, ao passo que MOAM consiste de moléculas mais simples ou de fragmentos de material orgânico de tamanho microscópico ($<53\mu\text{m}$), podendo ser derivados diretamente de plantas, ou serem originários de transformações biológicas pelos organismos do solo (LAVALLEE; SOONG; COTRUFO, 2020).

Dentre as principais características que separam esses dois compartimentos da MOS, os mecanismos de proteção da MOS têm grande importância para os estudos nos sistemas agrícolas. A MOAM tem por característica estar associada aos minerais, através de oclusão em agregados finos, aglomerados organominerais e microporos e sorção em superfícies minerais, e dessa forma estar mais protegida da degradação; enquanto a MOP pode apresentar alguma proteção em grandes agregados, ou mesmo não contar com mecanismos de proteção (VON LÜTZOW *et al.*, 2008). Essas diferenças na proteção física da MOS entre seus compartimentos, possibilita à MOAM e MOP expressar de maneira diferente a influência das práticas e sistemas de manejo utilizados.

A MOP tem se mostrado mais sensível a mudanças no uso da terra e sua avaliação tem apresentado respostas mais rápidas que as avaliações de COT. A avaliação de MOP permite visualizar as mudanças no C e prever tendências a respeito do C no solo, antes mesmo que as mudanças no COT possam ser avaliadas (KANTOLA; MASTERS; DELUCIA, 2017). A maior sensibilidade da MOP aos diferentes manejos também é relatada por Bayer *et al.* (2004), onde o PD com culturas

estivais e outonais promoveu um aumento de 37% a 52% no estoque de C na MOP na camada 0-20 cm, enquanto que o aumento de COT foi de apenas 10%, não mostrando diferenças estatísticas.

Piva et al. (2020) em um experimento de curto tempo, relatam resultados contrários aos esperados, mostrando diferenças no acúmulo de C e N para áreas de plantio direto, somente na fração pesada da MOS e nos primeiros 5 cm do perfil, não encontrando diferenças no estoque total de C e N do solo; mas, mesmo assim, mostrando diferenças de comportamento entre o estoque total de C e N contido no solo e nas diferentes frações de MOS.

Figueiredo et al. (2013) mostraram que em condições de cerrado, os estoques de MOP encontrados foram mais baixos nas áreas de cultivo em comparação à vegetação nativa, enquanto os estoques de C total entre os sistemas de cultivo sem revolvimento e a vegetação nativa não foram alterados, provando que a MOP foi mais sensível como indicador de qualidade do solo.

Esses resultados mostram a necessidade de se efetuar o fracionamento do C devido ao fato de que em curtos espaços de tempo nem sempre as alterações esperadas no estoque de C serão visualizadas no COT do solo. Em concordância com isso, Bayer et al. (2004) citam que a MOAM, por apresentar uma ciclagem mais lenta quanto a sua formação e decomposição, necessita um período maior para que a alteração dos sistemas de manejo tenha efeito no estoque de C desta fração; e, o efeito do manejo na MOAM protegida em microagregados deve ser dependente da textura e principalmente da mineralogia do solo, as quais têm influência sobre a estabilidade destes microagregados.

O PD aumenta os estoques de COT do solo, sendo que esse acúmulo ocorre principalmente na MOP, por ser mais sensível que o COT; e em curtos períodos (6 anos), o PD não teve efeito sobre a MOAM em Latossolos argilosos oxídicos (BAYER et al., 2004).

2.50 solo como fonte e/ou dreno de C

Além do papel fundamental que a MOS desempenha nas propriedades físicas, químicas e biológicas dos solos, vários estudos têm atualmente ligado o processo de acúmulo/sequestro de C no solo com os esforços para mitigação dos processos de mudanças climáticas (BLANCO-CANQUI et al., 2013). O solo constitui-se no maior reservatório terrestre de C (~1500 Pg C à profundidade de 1,0 m; 2400

Pg C à profundidade de 2 m) (BATJES, 2014), sendo que isso representa aproximadamente três vezes o conteúdo de C na atmosfera (830 Pg C)(CIAIS *et al.*, 2014). Assim, um pequeno aumento no estoque de C no solo representa um grande potencial de sequestro de C (PAUSTIAN *et al.*, 2016), bem como a negligência na execução de práticas corretas de manejo de solo impactam na emissão de C para a atmosfera em grandes quantidades.

Há também uma forte relação entre a cobertura vegetal e o estoque COS, de forma que uma excessiva redução na vegetação de cobertura aumenta grandemente os riscos de degradação do solo e perda do estoque de carbono (LAL, 2015). O processo de cultivo agrícola predispõe o solo, na maioria das vezes, à perda de C. Mesmo sem revolvimento e independentemente da textura do solo, o cultivo contínuo por 10 anos resultou em perdas de C em relação aos seus estoques iniciais no solo (CRESPO *et al.*, 2021). Avaliando o efeito das plantas de cobertura e o plantio direto, De Moraes Sá *et al.* (2014), verificaram decréscimo no estoque de C do solo ao comparar a vegetação nativa com um sistema de cultivo convencional baseado em araças. Essas perdas chegaram a $1,07 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ na profundidade de 0-40 cm durante os 22 anos de cultivo convencional. Dados semelhantes são apresentados por Bayer *et al.* (2003), citando um decréscimo de 50% no estoque original de matéria orgânica do solo após 23 anos de plantio convencional. Tiecher *et al.* (2020) também mostram redução no estoque de C do solo de aproximadamente 45% no período de 10 anos, decorrente da conversão da vegetação nativa para o sistema de cultivo convencional com revolvimento intensivo do solo, na camada de 0-20 cm.

Entretanto esses mesmos sistemas produtivos que predispõe os solos à perda de C podem, quando corretamente manejados, servir de ferramentas para o acúmulo de C, trazendo ao solo todos os benefícios do aumento de C no solo, e funcionando como um dreno para o dióxido de carbono (CO_2) da atmosfera. Bayer *et al.* (2003), citam uma recuperação de 21,5% no estoque de C do solo em apenas 5 anos. Essa tendência à rápida recuperação dos níveis de C do solo quando o mesmo é manejado corretamente também é observada por Tiecher *et al.* (2020), onde 91% do estoque original de C do solo (profundidade de 0-1,00 m) foi recuperado, a partir do solo inicialmente degradado. Dados semelhantes também foram obtidos por De Moraes Sá *et al.* (2014), mostrando um aumento de 29% no estoque de C no solo degradado após 16 anos de implantação do experimento, recuperando 86% do estoque de C original do solo (vegetação nativa) na profundidade de 0-40 cm.

Considerando que atualmente metade da área cultivada sobre plantio direto no Brasil (~16 M ha) é formada por monoculturas, a adoção de sistemas de cultivo mais diversificados, poderia prover um acúmulo adicional de C de 0,35 Mg C ha⁻¹; resultando em um armazenamento adicional de COS na ordem de 5,6 Tg C ano⁻¹ (VELOSO *et al.*, 2018). Esses dados demonstram, do ponto de vista ambiental, a importância das práticas agrícolas no acúmulo de C, como citado por diversos autores. Sistemas de cultivo sem revolvimento do solo, oferecem um grande potencial para diminuir o impacto ambiental, restaurar a resiliência do solo e aumentar a produção agrônômica através do contínuo fluxo de C na superfície (DE MORAES SÁ *et al.*, 2014). Também, leguminosas como cobertura vegetal favorecem o aumento na quantidade e labilidade dos resíduos incorporados, o que favorece associações organominerais com as partículas finas no solo especialmente quando combinado com o não revolvimento do solo (VELOSO; CECAGNO; BAYER, 2019).

A adoção do não revolvimento do solo e culturas de cobertura são esforços para atingir a produtividade agrícola e sustentabilidade. A integração dessas duas práticas conservacionistas pode ter impactos sinérgicos e melhorar as funções e serviços do solo (ACHARYA *et al.*, 2019).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local do experimento

O experimento foi instalado no ano de 2011 na Estação Experimental da UTFPR (26°10'35"S; 52°41'27"O), município de Pato Branco, região sudoeste do Estado do Paraná. O clima da região é subtropical Cfa, caracterizado por temperaturas amenas, alta umidade e verões quentes (KOEPPEN, 2022). O solo do local do experimento é um Latossolo Vermelho distrófico típico, textura muito argilosa (770 g kg⁻¹ de argila), e altitude de 730 m. A temperatura média anual é de 18,8 °C e a média pluviométrica é de 2098 mm ano⁻¹ (IDR-PARANÁ, 2024). Para fins desse trabalho as avaliações realizadas referem-se ao 11º e 12º ano após o início do experimento, nos anos 2022 e 2023.

As propriedades químicas do solo quando da instalação do experimento, no ano de 2011, estão listadas na Tabela 1, demonstrando alta variabilidade entre os blocos em relação aos resultados de P e K.

Tabela 1 – Análise química do solo (0-20 cm) antes do início do experimento, no ano de 2011. UTFPR, Campus Pato Branco, 2024

BLOCOS	pH- CaCl ₂	MO g dm ⁻³	P mg dm ⁻³	----- cmolc dm ⁻³ -----					V %
				K	Ca	Mg	Al	H + Al	
1	5,8	48,2	29,3	0,75	6,5	4,3	0	3,68	75,8
2	5,4	48,2	11,2	0,45	5,4	3,5	0	4,61	67,0
3	5,3	50,9	5,0	0,30	5,3	3,5	0	4,59	66,5
4	5,2	59,0	3,8	0,25	5,2	3,1	0	5,01	63,1

MO: matéria orgânica; P e K extraídos com Mehlich-1; Ca, Mg e Al extraídos com KCl 1M; H + Al determinados pela correlação com Índice SMP; V: saturação por bases.

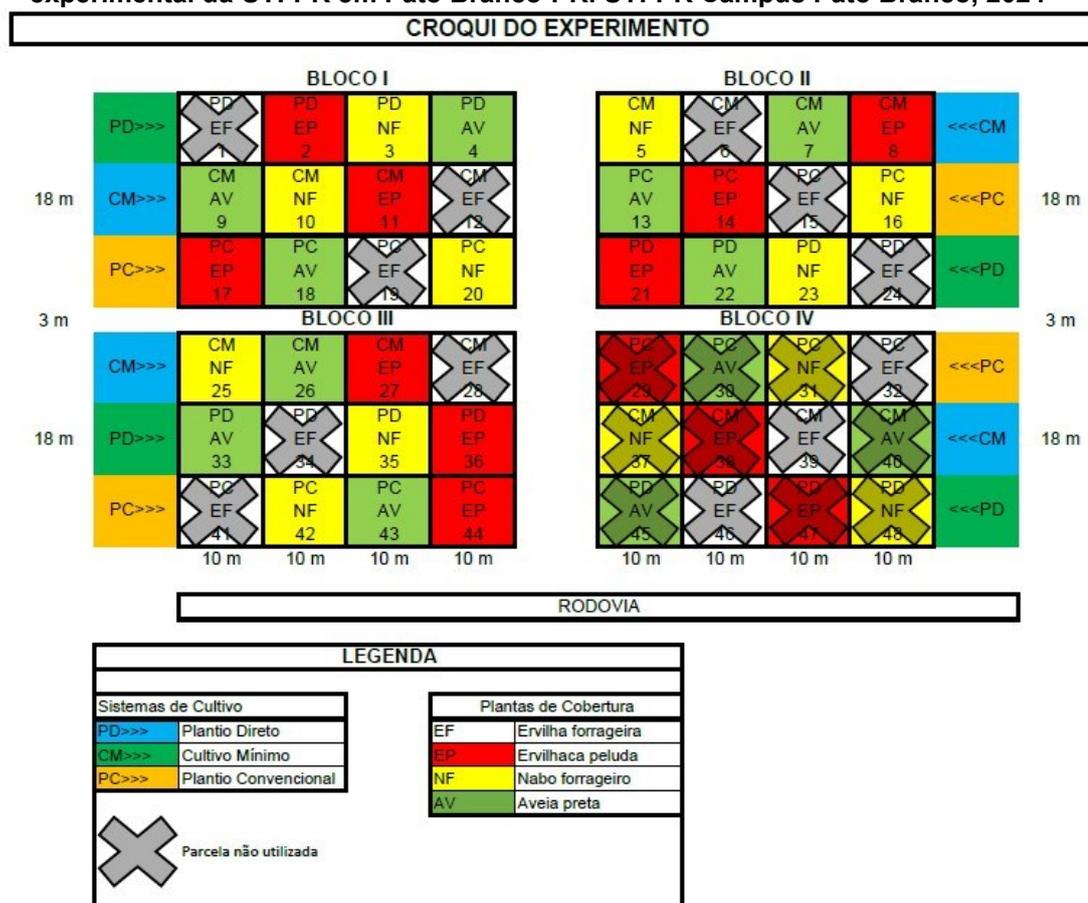
3.2 Delineamento experimental, composição dos tratamentos e condução do experimento

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso em parcela subdividida com quatro repetições. Nas parcelas principais (6m de largura x 40m de comprimento) foram estabelecidos os sistemas de cultivo: (a) Cultivo convencional (PC) constituído por uma aração e duas gradagens com grade niveladora tanto nos cultivos de inverno quanto de verão. A semeadura das plantas (inverno e verão) é feita

com uso de semeadora adubadora de plantio direto; (b) Plantio direto (PD) onde é realizada a semeadura com o uso de semeadora adubadora para plantio direto, tanto nos cultivos de inverno quanto de verão; (c) Cultivo mínimo (CM) onde é realizada a semeadura a lanço das culturas de inverno, com posterior gradagem para incorporação das sementes, e implantação da cultura de verão como no PD. Utilizou-se para aração um arado de 3 discos, reversível, com diâmetro de discos de 64 cm. Para a gradagem, utilizou-se uma grade niveladora com 26 discos com 46 cm de diâmetro, divididos em duas fileiras em V.

Nas subparcelas (6m de largura x 10m de comprimento), foram implantadas as culturas de cobertura do solo: Nabo forrageiro (*Raphanus sativus*), denominado NF; Aveia preta (*Avena strigosa*), AP; Ervilhaca peluda (*Vicia villosa*), EP; Ervilha forrageira (*Pisum sativum*), EF (Figura 1).

Figura 1 – Croqui do experimento de sistemas de cultivo e plantas de cobertura na área experimental da UTFPR em Pato Branco-PR. UTFPR Campus Pato Branco, 2024



Fonte: Autor (2024)

As culturas de cobertura foram semeadas nos dias 24/05/2022 e 12/05/2023 (respectivamente para as safras 2022/2023 e 2023/2024), utilizando uma semeadora para culturas de inverno, marca Semeato, modelo SHM 11/13, com linhas espaçadas em 17 cm, a uma taxa de semeadura de sementes viáveis (ajustadas para uma % de germinação de 80%) de 25 kg ha⁻¹ para o NF, 70 kg ha⁻¹ para AP, 55 kg ha⁻¹ para EP e 60 kg ha⁻¹ para EF, exceto para o sistema denominado CM, descrito acima, onde as sementes das plantas de cobertura foram distribuídas à lanço, com posterior gradagem leve para incorporação. Não foi utilizado nenhum fertilizante na implantação ou em cobertura durante a condução das culturas de cobertura.

Após a avaliação de produção de MS, as plantas de cobertura foram manejadas com o herbicida glifosato nas doses recomendadas. A semeadura da cultura comercial, soja (*Glycine max*), foi efetuada dia 18 de novembro de 2022, com a utilização da semeadora marca VenceTudo modelo SM 7040, com espaçamento entre linhas de 0,45 m, com uma taxa de semeadura de 311.000 plantas ha⁻¹. A adubação utilizada no plantio foi de 400 kg ha⁻¹ do formulado 02-18-18, perfazendo um total de 8 kg ha⁻¹ de N, 72 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 72 kg ha⁻¹ de K₂O. O controle de pragas, doenças e ervas daninhas foi efetuado conforme a necessidade, mediante a utilização de produtos recomendados.

Para fins desta pesquisa, em função de dificuldades operacionais e de mão-de-obra, os dados foram avaliados em apenas três das quatro repetições, embora o experimento tenha sido implantado de forma integral. Também não foram coletadas amostras na subparcela contendo o tratamento de ervilha forrageira – EF. Dessa forma, o experimento avaliado passou a ser um fatorial 3x3, com três repetições, totalizando 27 unidades experimentais.

3.3 Avaliações realizadas

3.3.1 Massa seca das culturas de cobertura

Como são espécies com ciclos (em dias) distintos, foi definido o momento do pleno florescimento da AP para a realização do corte da parte aérea visando a determinação da produção de Massa Seca (MS). As plantas foram cortadas rente ao solo, nos dias 22/09/2022 (para o ano de 2022) e 24/08/2023 (no ano de 2023), utilizando um quadrado com área de 0,25 m², armazenadas em sacos de papel e secadas em estufa com ventilação forçada do ar na temperatura de 60 °C até atingir

massa constante, quando foram pesadas e os valores extrapolados para Kg ha^{-1} de MS.

3.3.2 Rendimento de grãos e componentes de rendimento da soja

A colheita da soja, safra 2022/23, foi realizada no dia 27 de março de 2023. Foram colhidas 4 linhas centrais de cada parcela, cada uma com 2 m de comprimento, totalizando $3,6 \text{ m}^2$. Em seguida, procedeu-se a debulha das plantas provenientes de cada parcela, e na sequência, determinou-se e corrigiu-se a umidade à 13%. Efetuou-se a contagem e pesagem para a determinação da massa de mil grãos (MMG) e extrapolou-se os dados de produtividade para kg ha^{-1} . Para determinação dos componentes de rendimento, foram coletadas 12 plantas (CARGNELUTTI FILHO *et al.*, 2009) em cada parcela e efetuadas as contagens de vagens por planta (VP) e grãos por vagem (GV).

3.3.3 Estoques de C e densidade do solo.

Amostras de solo foram coletadas na profundidade de 0-100 cm, estratificadas nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-45, 45-60, 60-80, 80-100 cm, em três repetições experimentais. Junto à coleta de solo foi determinada a densidade através do método da escavação, adaptado de (BLAKE; HARTGE, 2018), sendo a massa do solo de cada camada determinada no campo e a exatidão das dimensões da trincheira assegurada por um gabarito de metal fixado inicialmente no solo, cuidadosamente escavado, na profundidade de 0-30 cm. Para assegurar a precisão das profundidades procedeu-se a passagem dentro da trincheira, de réguas de 0-5, 0-10, 0-20, 0-30 cm de profundidade e espessura de 0-25 cm, conferindo assim igual acurácia entre as trincheiras. Nas demais profundidades utilizou-se da coleta de amostras em duplicatas, nas quais foram cravados dois anéis de 15 cm de diâmetro dentro da trincheira e o solo retirado com o uso do trado tipo rosca, sendo a profundidade aferida cuidadosamente com o uso de uma régua.

Todas as camadas amostradas foram pesadas para a determinação da densidade, e uma subamostra de aproximadamente 800 g foi coletada e separada para a determinação do carbono em laboratório. Em cada camada, foi realizada a correção da umidade, sendo que esta foi determinada através da secagem de uma alíquota com aproximadamente 20 g de solo que foi separada da subamostra, e

mantida na estufa durante 48 horas a 105°C. As subamostras coletadas foram secas ao ar, passadas em peneira de 2 mm e então armazenadas em potes plásticos tampados, para posterior análise em laboratório. Para a determinação da concentração de carbono orgânico total (COT) foi utilizado o método da combustão úmida (WALKLEY; BLACK, 1934), adaptado de Tedesco *et al.* (1995).

Para o cálculo do estoque de carbono orgânico foi utilizado o método descrito por Sisti *et al.* (2004). Esse procedimento se baseia na massa equivalente do solo, corrigindo o efeito diferenciado que os sistemas possam ter sobre a densidade do solo em cada camada amostrada. Como o tratamento referência, utilizou-se a parcela de aveia preta sobre plantio convencional. Como mostra a seguinte fórmula de cálculo:

$$C = \sum_{i=1}^{n-1} C_i + \left[M_n - \left(\sum_{i=1}^n M_i - \sum_{i=1}^n M_{Ri} \right) \right] \cdot \left[\frac{C_n}{M_n} \right] \quad \text{eq. (1)}$$

Na Equação 1, onde todas as variáveis são expressas em Mg ha⁻¹,

$\sum_{i=1}^{n-1} C_i$ é a soma do estoque de C da primeira até a penúltima camada;

M_n é a massa de solo na camada mais profunda;

$\sum_{i=1}^n M_i$ é a soma da massa de solo da primeira até a camada mais profunda;

$\sum_{i=1}^n M_{Ri}$ é a soma da massa de solo da primeira até a camada mais profunda,

no tratamento referência; e

C_n é o estoque de C na camada mais profunda.

Foram calculados o estoque de carbono orgânico total (COT), carbono orgânico associado aos minerais (COAM) e carbono orgânico particulado (COP) de cada camada de solo e comparado os sistemas de cultivo e plantas de cobertura, sempre considerando cada uma das camadas. Além do estoque das frações de C de cada uma das oito camadas, calculou-se o estoque de C acumulado, nas profundidades de 0-30 cm e 0-100 cm.

3.3.4 Fracionamento granulométrico da matéria orgânica

Para o fracionamento granulométrico da MOS foi utilizado o método descrito por Cambardella & Elliott (1992). Foram pesados 20 g de solo e adicionados 60 mL de solução de hexametáfosfato de sódio (5 g L⁻¹), submetendo a agitação por 16 horas

em agitador horizontal. Em seguida, a suspensão foi passada em peneira de 53 μm com auxílio de jato de água destilada. O material que ficou retido na peneira consiste no carbono orgânico particulado (COP) associado à fração areia, que foi seco em estufa à 60°C, quantificado em relação a sua massa, moído em gral de porcelana e analisado em relação ao teor de carbono orgânico (PAVAN *et al.*, 1992; WALKLEY; BLACK, 1934). O material que passou pela peneira de 53 μm , consiste no carbono orgânico associado aos minerais (COAM) das frações silte e argila, e foi quantificado pela diferença entre o COT e COP.

3.3.5 Análise estatística

Os resultados obtidos foram submetidos à análise de normalidade dos dados (teste de Lilliefors) e homogeneidade de variâncias (teste de Bartlett). Quando os pressupostos não foram atendidos, procedeu-se a transformação dos dados. Em seguida, procedeu-se a análise de variância e testados pelo teste F a 5% de probabilidade de erro, utilizando-se o software Genes. Havendo significância, isolada ou da interação entre os sistemas de cultivo e as plantas de cobertura, realizou-se o teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. Os gráficos foram confeccionados utilizando-se os programas Excel e SigmaPlot 10.0.

4 RESULTADOS

4.1 Massa seca das plantas de cobertura

Não foi observada interação entre as plantas de cobertura e os sistemas de cultivo para a produção de massa seca das plantas de cobertura nos anos de 2022 e 2023, bem como para os valores acumulados dos dois anos. De modo semelhante, os sistemas de cultivo de solo também não afetaram a produção de massa seca nos dois anos avaliados, nem mesmo no acumulado das duas safras.

Houve efeito positivo das plantas de cobertura sobre a quantidade de massa seca produzida no ano de 2022 e no acumulado dos dois anos, com destaque para a AP que produziu 7,3 Mg ha⁻¹ de massa seca no ano de 2022, com um acumulado de 12,1 Mg ha⁻¹ de massa seca nos dois anos, sendo seguida, no acumulado, pelo NF (8,4 Mg ha⁻¹) e pela EP (6,6 Mg ha⁻¹), com diferença estatística (Tabela 2). No ano de 2023, não foram observadas diferenças significativas das plantas de cobertura e nem dos sistemas de cultivo sobre os tratamentos, com a média de produção no ano de 4,2 Mg ha⁻¹.

Tabela 2 – Produção de MS no ano 2022 e MS acumulada nos anos 2022 e 2023 de diferentes plantas de cobertura do solo. Pato Branco - PR, 2024

Plantas de Cobertura	2022	Acumulado
	Mg ha ⁻¹	
AP	7,3 a*	12,1 a
NF	4,2 b	8,4 b
EP	2,9 b	6,6 c

*Médias seguidas por mesma letra na coluna não diferem entre si, em nível de $p < 0,05$ pelo teste Tukey (valores são média de três sistemas de cultivo). Fonte: Autoria Própria (2024)

4.2 Componentes de rendimento e produtividade da soja

Para as variáveis massa de mil grãos (MMG), vagens por planta (VP) e grãos por vagem (GV), não foi observada influência dos sistemas de cultivo e das plantas de cobertura individualmente sobre cada uma delas, assim como não houve interação entre os tratamentos, com média de 151 g, 55,7 e 2,4 para os três parâmetros, respectivamente.

Não ocorreu interação entre os sistemas de cultivo e as plantas de cobertura sobre a produtividade da soja (PROD), porém esta foi influenciada pelos sistemas de cultivo (Tabela 3).

Tabela 3 – Produtividade da soja em função dos diferentes sistemas de cultivo do solo. Pato Branco - PR, 2024

Sistemas de cultivo	Produtividade (Kg ha ⁻¹)
PC	3.030 b
CM	3.529 ab
PD	3.616 a*

*Médias seguidas por mesma letra na coluna não diferem entre si, em nível de $p < 0,05$ pelo teste Tukey (valores são média de três plantas de cobertura). Fonte: Aatoria Própria (2024)

Foi observada a maior produtividade de soja no tratamento PD, o qual não diferiu significativamente do CM. Já a menor produtividade foi observada com o PC, que por sua vez também não diferiu significativamente do cultivo mínimo.

4.3 Concentração de carbono orgânico total (COT) e carbono orgânico particulado (COP)

4.3.1 Concentração de COT

Não foi verificada interação entre os sistemas de cultivo e as plantas de cobertura, quanto à concentração de carbono orgânico total (COT). Entretanto, verificou-se influência das plantas de cobertura sobre o COT, na profundidade de 20-30 cm (Tabela 4).

Tabela 4 – Concentração de COT, nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-45, 45-60, 60-80 e 80-100 cm, em função dos sistemas de cultivo e das plantas de cobertura. Pato Branco - PR, 2024

Sistemas de Cultivo	Profundidade do solo (cm)							
	0-5	5-10	10-20	20-30	30-45	45-60	60-80	80-100
	----- COT (g kg ⁻¹) -----							
PC	27,97 a*	28,66 a	25,54 a	21,64 a	17,57 a	16,45 a	14,55 a	11,69 a
CM	34,20 a	26,49 a	23,90 a	20,78 a	17,75 a	17,27 a	15,71 a	13,46 a
PD	34,80 a	24,42 a	21,91 a	20,43 a	17,06 a	15,41 a	13,55 a	12,08 a
Plantas de Cobertura	Profundidade do solo (cm)							
	0-5	5-10	10-20	20-30	30-45	45-60	60-80	80-100
	----- COT (g kg ⁻¹) -----							
AP	31,17 a	26,15 a	22,69 a	19,31 b	16,97 a	16,49 a	14,02 a	12,34 a
NF	32,90 a	25,28 a	23,29 a	20,69 ab	17,49 a	15,50 a	14,42 a	12,30 a
EP	32,90 a	28,14 a	25,37 a	22,85 a	17,92 a	17,14 a	15,37 a	12,60 a

*Médias seguidas por mesma letra na coluna não diferem entre si, em nível de $p < 0,05$ pelo teste Tukey. Fonte: Aatoria Própria (2024)

Verificou-se uma maior concentração de COT na profundidade de 20-30 cm no tratamento com a EP, a qual não diferiu estatisticamente do NF. A menor concentração de COT, nesta camada, foi verificada na AP, a qual também não diferiu estatisticamente do NF.

Com exceção da camada 20-30 cm, em todas as outras profundidades as plantas de cobertura não diferiram entre si quanto aos teores de COT. Entretanto, mesmo não sendo significativo, os maiores valores absolutos de concentração de COT sempre foram observados no tratamento EP (Tabela 4). Por outro lado, o tratamento AP apresentou os menores teores de COT em cinco das oito profundidades amostradas.

Avaliando o COT no perfil do solo, embora sem considerar a profundidade como um fator e, portanto, sem a análise estatística, percebe-se maior concentração na camada superficial 0-5 cm, com redução nas camadas mais profundas.

Divergindo de outros trabalhos, os sistemas de cultivo não afetaram a concentração de COT em nenhuma das camadas analisadas. Embora sem diferença estatística, na camada 0-5 cm verificou-se valores ligeiramente superiores no PD, sendo que nas camadas mais profundas houve uma tendência de maior concentração de COT no tratamento CM. Dentre as plantas de cobertura, a maior concentração de COT foi observada na camada 0-5 cm, com a EP, diminuindo com o aumento da profundidade (Tabela 4).

4.3.2 Concentração de COP

Verificou-se interação para o COP entre as plantas de cobertura e os sistemas de cultivo de solo na camada 0-5 cm (Tabela 5).

Tabela 5 – Concentração de COP (g kg^{-1}), na profundidade de 0-5 cm em função dos sistemas de cultivo e das plantas de cobertura. Pato Branco - PR, 2024

Sistemas de Cultivo	Plantas de Cobertura		
	AP	NF	EP
PC	3,13 A b	3,56 A c	3,54 A b
CM	7,38 B a*	10,51 A a	6,83 B a
PD	6,26 AB a	5,75 B b	7,53 A a

*Médias seguidas por mesma letra, maiúscula na linha e minúscula na coluna, não diferem entre si, em nível de $p < 0,05$ pelo teste Tukey. Fonte: Autoria Própria (2024)

A maior concentração de COP na camada 0-5 cm, foi verificada na combinação de NF e CM. No PD a EP foi a cultura com maiores valores de COP. Por sua vez, as plantas de cobertura não exerceram influência sobre o COP em PC.

Assim, considerando os sistemas de cultivo do solo, o PC foi o que apresentou os menores teores de COP (3,13, 3,56 e 3,54 g kg⁻¹) respectivamente, para AP, NF e EP, as quais não diferiram estatisticamente entre si. O CM apresentou os maiores teores de COP (7,38, 10,51 e 6,83 g kg⁻¹), respectivamente para AP, NF e EP, sendo o NF estatisticamente superior aos demais tratamentos.

Para as três plantas de cobertura testadas, maiores valores de COP foram encontrados em CM e PD, os quais sempre foram superiores ao PC, na camada superficial do solo (0-5 cm). Aveia preta e ervilhaca peluda apresentaram resposta semelhante em relação ao sistema de cultivo adotado, onde os maiores valores obtidos (7,38 e 6,83 g kg⁻¹, respectivamente) foram obtidos com o CM, os quais não diferiram do PD, mas diferiram do PC (3,13 e 3,54 g kg⁻¹).

Ao analisar o perfil do solo, observa-se, também para o COP uma maior concentração nas camadas superficiais, a qual diminui consideravelmente à medida que aprofunda-se no perfil do solo (Tabela 6).

Tabela 6 – Concentração de COP, nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-45, 45-60, 60-80 e 80-100 cm em função dos sistemas de cultivo e das plantas de cobertura. Pato Branco - PR, 2024

Sistemas de Cultivo	Profundidade do solo (cm)							
	0-5	5-10	10-20	20-30	30-45	45-60	60-80	80-100
	----- COP (g kg ⁻¹) -----							
PC	3,41 c	2,62 a	1,98 a	1,08 a	0,51 a	0,45 a	0,35 a	0,27 a
CM	8,24 a*	2,13 a	1,26 a	1,02 a	0,64 a	0,50 a	0,45 a	0,35 a
PD	6,52 b	2,13 a	1,51 a	1,04 a	0,74 a	0,51 a	0,43 a	0,34 a
Plantas de Cobertura	Profundidade do solo (cm)							
	0-5	5-10	10-20	20-30	30-45	45-60	60-80	80-100
	----- COP (g kg ⁻¹) -----							
AP	5,59 b	2,61 a	1,59 a	0,96 a	0,62 a	0,51 a	0,41 a	0,34 a
NF	6,61 a	2,00 b	1,48 a	1,04 a	0,61 a	0,48 a	0,42 a	0,31 a
EP	5,97 ab	2,27 ab	1,68 a	1,13 a	0,67 a	0,47 a	0,39 a	0,31 a

*Médias seguidas por mesma letra na coluna não diferem entre si, em nível de p <0,05 pelo teste Tukey. Fonte: Autoria Própria (2024)

Na camada 0-5 cm, em relação ao sistema de cultivo, o CM apresentou os maiores teores de COP. Nas camadas subsuperficiais há uma redução na concentração de COP, naturalmente para todos os sistemas de cultivo. Também quando consideradas as plantas de cobertura, maior concentração de COP foi

observada nas camadas superficiais, sendo que na camada de 0-5 cm, a maior concentração de COP foi observada no tratamento de NF (Tabela 6).

Maior teor de COP foi observado na camada 5-10 cm com a AP, a qual não diferiu da EP. Nas demais profundidades, não foram observadas diferenças entre os sistemas de cultivo e as plantas de cobertura sobre o teor de COP.

4.4 Estoques de carbono orgânico total (COT), carbono orgânico particulado (COP) e carbono orgânico associado aos minerais (COAM)

4.4.1 Estoque de COT

Onze anos de condução do experimento não foram suficientes para provocar alterações significativas no estoque de COT, tampouco interação entre as plantas de cobertura e os sistemas de cultivo (Tabela 7), com exceção da profundidade 10-20 cm, onde o plantio convencional foi superior ao plantio direto, o que pode estar relacionado a incorporação dos resíduos para camadas mais profundas do solo.

Tabela 7 –Estoque de COT (Mg ha⁻¹), nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-45, 45-60, 60-80 e 80-100 cm em função dos sistemas de cultivo e das plantas de cobertura. Pato Branco - PR, 2024

Sistemas de Cultivo	Profundidade do solo (cm)							
	0-5	5-10	10-20	20-30	30-45	45-60	60-80	80-100
----- Estoque de Carbono Orgânico Total (COT) (Mg ha ⁻¹) -----								
PC	11,46 a*	14,11 a	26,27 a	20,70 a	18,29 a	18,13 a	17,50 a	14,68 a
CM	11,42 a	13,46 a	23,21 ab	19,61 a	18,39 a	17,85 a	19,47 a	16,28 a
PD	11,59 a	11,68 a	22,19 b	18,25 a	17,17 a	16,22 a	16,67 a	15,15 a
Plantas de Cobertura	Profundidade do solo (cm)							
	0-5	5-10	10-20	20-30	30-45	45-60	60-80	80-100
----- Estoque de Carbono Orgânico Total (COT) (Mg ha ⁻¹) -----								
AP	10,63 a	12,62 a	22,87 a	17,78 b	17,81 a	15,96 a	17,51 a	14,14 a
NF	12,11 a	12,88 a	22,64 a	19,81 ab	17,59 a	16,97 a	17,12 a	16,05 a
EP	11,73 a	13,74 a	26,16 a	20,96 a	18,45 a	19,27 a	19,00 a	15,92 a

*Médias seguidas por mesma letra na coluna não diferem entre si, em nível de p <0,05 pelo teste Tukey. Fonte: Autoria Própria (2024)

As plantas de cobertura apresentaram influência significativa sobre o estoque de COT, somente na profundidade de 20-30 cm, onde os maiores valores foram encontrados no tratamento EP (20,96 Mg ha⁻¹), a qual não diferiu estatisticamente do NF. O menor estoque de COT foi observado no tratamento AP, o qual também não diferiu estatisticamente do NF (Tabela 7). Nas demais profundidades não foram observadas diferenças entre as plantas de cobertura sobre o estoque de COT.

Para o estoque de COT acumulado nas camadas 0-30 cm e 0-100 cm também não foi verificada interação entre as plantas de cobertura e os sistemas de cultivo, sendo que os três sistemas de cultivo apresentaram resultados semelhantes. Entretanto, verificou-se influência das plantas de cobertura sobre o estoque de COT para ambas as camadas (Tabela 8).

Tabela 8 – Estoque de COT (Mg ha⁻¹) nas profundidades de 0-30 cm e 0-100 cm em função dos sistemas de cultivo e das plantas de cobertura do solo. Pato Branco - PR, 2024

Sistemas de Cultivo	COT	
	0-30 cm	0-100 cm
PC	72,54 a*	141,14 a
CM	67,70 a	139,68 a
PD	63,70 a	128,91 a
Plantas de Cobertura	0-30 cm	0-100 cm
AP	63,90 b	129,32 b
NF	67,45 ab	135,18 b
EP	72,59 a	145,23 a

*Médias seguidas por mesma letra na coluna não diferem entre si, em nível de $p < 0,05$ pelo teste Tukey. Fonte: Autoria Própria (2024)

Os maiores estoques de COT foram observados com a EP, sendo de 72,59 e 145,23 Mg ha⁻¹, para as camadas de 0-30 e 0-100 cm, respectivamente, não diferindo do NF na camada 0-30 cm, porém sendo superior ao NF e a AP na camada 0-100 cm. Os menores valores para COT foram observados na AP 63,90 e 129,32 Mg ha⁻¹, respectivamente para as camadas 0-30 e 0-100 cm, a qual não diferiu estatisticamente do NF (Tabela 8).

4.4.2 Estoque de COP

Para o estoque de COP, observou-se interação entre as plantas de cobertura e os sistemas de cultivo na camada 0-5 cm (Tabela 9).

Tabela 9 – Estoque de COP (Mg ha⁻¹) na profundidade de 0-5 cm em função dos sistemas de cultivo e das plantas de cobertura. Pato Branco - PR, 2024

Sistemas de Cultivo	Plantas de Cobertura		
	AP	NF	EP
PC	1,21 A b*	1,74 A b	1,34 A b
CM	2,46 B a	3,32 A a	2,51 B a
PD	2,03 A a	1,94 A b	2,53 A a

*Médias seguidas por mesma letra, maiúscula na linha e minúscula na coluna, não diferem entre si, em nível de $p < 0,05$ pelo teste Tukey. Fonte: Autoria Própria (2024)

Em PC e PD as plantas de cobertura não exerceram influência sobre o estoque de COP, com valores médios de 1,43 e 2,17 Mg ha⁻¹, respectivamente. Por

sua vez, em CM se destacou o NF, superando as outras duas espécies, apresentando um estoque de COP de 3,32 Mg ha⁻¹.

Em geral, as plantas de cobertura apresentaram maiores estoques de COP em CM e PD, sendo superiores ao PC. A combinação entre NF e CM apresentou o maior estoque de COP (3,32 Mg ha⁻¹), enquanto a AP associada ao PC apresentou o menor estoque de COP (1,21 Mg ha⁻¹).

Para as demais profundidades amostradas, não houve interação entre os sistemas de cultivo e as plantas de cobertura. Considerando os sistemas de cultivo, o estoque de COP foi influenciado pelo cultivo do solo na camada 60-80 cm (Tabela 10). Nas demais profundidades, não foram observadas diferenças entre os tratamentos. O uso das plantas de cobertura não provocou alterações no estoque de COP, nas camadas 5-10 cm até 80-100 cm.

Tabela 10 – Estoque de COP (Mg ha⁻¹) nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-45, 45-60, 60-80 e 80-100 cm em função dos sistemas de cultivo e das plantas de cobertura. Pato Branco - PR, 2024

Sistemas de Cultivo	Profundidade (cm)							
	0-5	5-10	10-20	20-30	30-45	45-60	60-80	80-100
	----- Estoque de Carbono Orgânico Particulado (COP) (Mg ha ⁻¹) -----							
PC	1,43 c	1,29 a	2,02 a	1,03 a	0,53 a	0,48 a	0,41 b	0,34 a
CM	2,76 a*	1,07 a	1,23 a	0,97 a	0,68 a	0,53 a	0,56 a	0,42 a
PD	2,16 b	1,02 a	1,54 a	0,93 a	0,76 a	0,52 a	0,53 ab	0,43 a
Plantas de Cobertura	Profundidade (cm)							
	0-5	5-10	10-20	20-30	30-45	45-60	60-80	80-100
	----- Estoque de Carbono Orgânico Particulado (COP) (Mg ha ⁻¹) -----							
AP	1,90 b	1,25 a	1,61 a	0,89 a	0,63 a	0,48 a	0,52 a	0,39 a
NF	2,33 a	1,02 a	1,44 a	1,00 a	0,62 a	0,52 a	0,50 a	0,42 a
EP	2,13 ab	1,10 a	1,74 a	1,05 a	0,71 a	0,53 a	0,48 a	0,38 a

*Médias seguidas por mesma letra na coluna não diferem entre si, em nível de p <0,05 pelo teste Tukey. Fonte: Aatoria Própria (2024)

Na profundidade de 60-80 cm, o maior estoque de COP foi observado em CM (0,56 Mg ha⁻¹), não diferindo estatisticamente do PD. O menor estoque de COP foi observado no PC (0,41 Mg ha⁻¹), o qual também não diferiu estatisticamente do PD.

No acumulado de 0-30 e 0-100 cm, os sistemas de cultivo e as plantas de cobertura não apresentaram diferença entre si, cujos valores médios para as duas camadas foram de 5,82 e 7,87 Mg ha⁻¹, respectivamente (Tabela 11).

Tabela 11 - Estoque de COP (Mg ha⁻¹) nas profundidades de 0-30 cm e 0-100 cm em função dos sistemas de cultivo e das plantas de cobertura do solo. Pato Branco - PR, 2024

Sistemas de Cultivo	COP	
	0-30 cm	0-100 cm
PC	5,77 a*	7,53 a
CM	6,04 a	8,22 a
PD	5,65 a	7,87 a
Plantas de Cobertura	0-30 cm	0-100 cm
AP	5,65 a	7,67 a
NF	5,80 a	7,85 a
EP	6,01 a	8,11 a

*Médias seguidas por mesma letra na coluna não diferem entre si, em nível de p <0,05 pelo teste Tukey. Fonte: Autoria Própria (2024)

4.4.3 Estoque de COAM

Para o estoque de COAM, não foi verificada interação entre os sistemas de cultivo e as plantas de cobertura. Porém, verificou-se influência positiva das plantas de cobertura na camada 20-30 cm (Tabela 12).

Tabela 12 – Estoque de COAM (Mg ha⁻¹); nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-45, 45-60, 60-80 e 80-100 cm em função dos sistemas de cultivo e das plantas de cobertura. Pato Branco - PR, 2024

Sistemas de Cultivo	Profundidade (cm)							
	0-5	5-10	10-20	20-30	30-45	45-60	60-80	80-100
	----- Estoque de Carbono Orgânico Particulado (COAM) (Mg ha ⁻¹) -----							
PC	10,03 a*	12,82 a	24,26 a	19,66 a	17,76 a	17,65 a	17,09 a	14,34 a
CM	8,66 a	12,38 a	21,98 a	18,63 a	17,71 a	17,32 a	18,91 a	15,86 a
PD	9,43 a	10,66 a	20,65 a	17,32 a	16,42 a	15,70 a	16,14 a	14,72 a
Plantas de Cobertura	Profundidade (cm)							
	0-5	5-10	10-20	20-30	30-45	45-60	60-80	80-100
	----- Estoque de Carbono Orgânico Particulado (COAM) (Mg ha ⁻¹) -----							
AP	8,73 a	11,37 a	21,27 a	16,89 b	17,18 a	15,48 a	16,98 a	13,75 a
NF	9,78 a	11,86 a	21,21 a	18,81 ab	16,98 a	16,45 a	16,62 a	15,63 a
EP	9,60 a	12,64 a	24,42 a	19,92 a	17,74 a	18,74 a	18,53 a	15,54 a

*Médias seguidas por mesma letra na coluna não diferem entre si, em nível de p <0,05 pelo teste Tukey. Fonte: Autoria Própria (2024)

Na camada 20-30 cm, foi observado o maior estoque de COAM com a EP (19,92 Mg ha⁻¹), o qual não diferiu estatisticamente do NF. O menor estoque de COAM foi observado na AP (16,89 Mg ha⁻¹), o qual também não diferiu estatisticamente do NF. Nas demais camadas analisadas, não foram verificadas diferenças entre as plantas de cobertura sobre o estoque de COAM. Já para os sistemas de cultivo, não foram observadas diferenças entre eles sobre o estoque de COAM em nenhuma das profundidades analisadas.

O estoque de COAM, quando considerado o acumulado nas camadas de 0-30 e 0-100 cm também não diferiu em função dos sistemas de cultivo, com valores médios de 62,16 e 128,70 Mg ha⁻¹, respectivamente (Tabela 13).

Tabela 13 - Estoque de COAM (Mg ha⁻¹) nas profundidades de 0-30 cm e 0-100 cm em função dos sistemas de cultivo e das plantas de cobertura do solo. Pato Branco - PR, 2024

Sistemas de Cultivo	COAM	
	0-30 cm	0-100 cm
PC	66,77 a*	133,61 a
CM	61,66 a	131,46 a
PD	58,06 a	121,04 a
Plantas de Cobertura	0-30 cm	0-100 cm
AP	58,26 b	121,65 b
NF	61,65 ab	127,34 ab
EP	66,58 a	137,12 a

*Médias seguidas por mesma letra na coluna não diferem entre si, em nível de $p < 0,05$ pelo teste Tukey. Fonte: Autorial Própria (2024)

Houve influência das plantas de cobertura sobre o COAM nas camadas 0-30 cm e 0-100 cm. Na camada 0-30 cm, o maior estoque de COAM foi observado com a EP (66,58 Mg ha⁻¹), não diferindo estatisticamente do NF; enquanto o menor valor foi observado com a EP (58,26 Mg ha⁻¹), a qual também não diferiu do NF (Tabela 13). A mesma constatação foi verificada no acumulado da camada 0-100 cm, onde o maior estoque de COAM foi novamente verificado com a EP (137,12 Mg ha⁻¹), a qual não diferiu estatisticamente do NF. O menor valor encontrado para o estoque de COAM na profundidade de 0-100 cm foi observado com a AP (121,65 Mg ha⁻¹), não diferindo estatisticamente do NF (Tabela 13).

5 DISCUSSÃO

5.1 Massa seca das plantas de cobertura

A aveia preta foi a espécie com maior produção de MS, tanto em 2022 como no acumulado dos dois anos. No acumulado dos dois anos, com 12,1 Mg ha⁻¹, a aveia preta produziu 44% e 83% a mais em relação ao nabo forrageiro e ervilhaca peluda, respectivamente (Tabela 2).

Wolschick et al. (2016), em experimento realizado em Lages, no Estado de Santa Catarina, citam uma produção de MS semelhante para a cultura do nabo forrageiro (4,26 Mg ha⁻¹), entretanto, relatam uma maior produção de MS na aveia preta e ervilhaca (9,91 e 9,14 Mg ha⁻¹, respectivamente). Já Piva et al. (2021), também trabalhando na região do planalto Catarinense, citam uma produção de MS das plantas de cobertura semelhante para a ervilhaca (2,5 Mg ha⁻¹) e uma menor produção de MS para a aveia preta e nabo forrageiro, 2,9 e 2,1 Mg ha⁻¹, respectivamente, considerando a média de cinco anos de avaliação.

No presente trabalho, a baixa produção de MS da ervilhaca no ano de 2022 (Tabela 2) pode ser atribuída ao ataque de pragas, pois quando as plantas apresentavam 5 cm de altura todas as parcelas foram danificadas, provocando um atraso no desenvolvimento, não sendo possível a obtenção de uma boa produção de MS até o momento do manejo da cobertura.

No acumulado dos dois anos tem-se, em relação ao ano de 2022, um aumento no volume de MS produzido de 66%, 100% e 128%, respectivamente para aveia preta, nabo forrageiro e ervilhaca peluda (Tabela 2). Isso significa que a aveia preta teve menor produção de MS no ano de 2023 em relação ao ano de 2022, em função de alta incidência de doenças foliares, principalmente ferrugem da folha e do colmo (*Puccinia coronata* var. *avenae*), devido a maior temperatura média observada para o período do inverno de 2023 (IDR-PARANÁ, 2024), potencializando os danos causados pela doença e comprometendo o desenvolvimento da cultura, e por consequência a produção de MS.

Para o nabo forrageiro a produção de MS foi semelhante nos dois anos, situando-se em torno de 4,1 Mg ha⁻¹. O maior aumento de produção de MS foi

observado com a ervilhaca peluda, a qual produziu no ano de 2023, 28% a mais do que o observado em 2022 (Tabela 2).

Esse aumento na produção de MS da ervilhaca se deve principalmente ao ataque de pragas observado no ano de 2022 (já mencionado acima) e também ao fato de que como as parcelas tem uma largura reduzida, e normalmente no momento do manejo das plantas de cobertura boa parte das plantas já têm sementes, há um grande fluxo de plantas voluntárias nas parcelas, pois não ocorre controle de plantas invasoras nas culturas de cobertura, ocorrendo dessa forma a ressemeadura natural nas parcelas, e entre as parcelas. Isto fez com que ocorresse uma maior produção de MS nessas parcelas, não necessariamente sendo da cultura principal implantada.

5.2 Componentes de rendimento e produtividade da soja

Foram observadas diferenças de produtividade na cultura da soja em relação aos sistemas de cultivo. Tomando-se como referência o tratamento sob plantio direto, com uma média de produtividade de 3.616 Kg ha⁻¹, sendo estatisticamente igual ao cultivo mínimo (3.529 Kg ha⁻¹), a produtividade foi 19,3% superior ao plantio convencional, o qual teve uma produtividade média de 3.030 Kg ha⁻¹ (Tabela 3). Ribeiro et al. (2016), avaliando a influência do PD e PC sobre as condições físico-hídricas de um Planossolo no Estado do Rio Grande do Sul, citam produtividade da cultura da soja de 2.969 kg ha⁻¹ em plantio direto, sendo 42,1% superior à produtividade obtida em PC. Os autores concluem que a maior microporosidade observada no PD foi responsável pelo maior armazenamento de água, e conseqüentemente, melhor resistência para suportar estresses climáticos, mesmo em um experimento avaliado somente três anos após a implantação.

A média de produtividade observada com o plantio direto no presente experimento (3.616 kg ha⁻¹) é semelhante à média de produtividade do Estado do Paraná, que ficou em 3.860 kg ha⁻¹ e do Brasil (3.507 kg ha⁻¹) na safra 2022/2023 (CONAB, 2024). O não revolvimento do solo no plantio direto, proporcionando cobertura do solo com os resíduos deixados pelas plantas de cobertura e restos culturais das culturas econômicas, protegendo a superfície do solo e propiciando um aumento na umidade do solo, menor oscilação de temperatura e proteção contra a erosão da chuva, oferece melhores condições de desenvolvimento da cultura da soja e conseqüentemente melhor produtividade.

As plantas de cobertura não influenciaram a produtividade da soja, sendo que a presença de diferentes espécies de cobertura, como ervilhaca peluda e nabo forrageiro não se traduziu em aumento na produtividade da soja, por exemplo, por uma possível maior disponibilidade de nitrogênio. O fato da cultura da soja obter quase que a totalidade do N utilizado em seu ciclo via fixação biológica pode explicar isto. A utilização da ervilhaca peluda e do nabo forrageiro trariam melhores resultados quando da utilização de uma gramínea como cultura subsequente, as quais não tem a capacidade de fixar N da atmosfera, como por exemplo a cultura do milho (PIVA *et al.*, 2021).

Atualmente, é comum por parte dos agricultores da região Sudoeste do Paraná, a realização de operações mecanizadas no solo características do plantio convencional, como gradagens, escarificação e subsolagem. A justificativa para tais operações é que o uso contínuo do plantio direto, em alguns casos por mais de 30 anos, promovendo excessivo tráfego de máquinas pesadas em solo com baixa cobertura vegetal e sem rotação de culturas, estaria levando a um aumento de densidade do solo e compactação. Neste caso, na visão de alguns produtores, a mobilização do solo seria necessária para aumentar a taxa de infiltração de água no solo e corrigir os problemas com erosão superficial.

Neste sentido, Girardello *et al.* (2014) em um experimento montado sobre uma área que era previamente cultivada sob plantio direto há 15 anos em um Latossolo no Estado do Rio Grande do Sul, avaliaram a eficiência da operação de escarificação sobre a resistência à penetração do solo. Entretanto os autores não encontraram diferenças quando compararam os resultados de produtividade obtidos com os diferentes tipos de escarificadores e a testemunha em plantio direto. Também não verificaram diferenças entre a produtividade média do experimento e a produtividade média do talhão, já que o experimento foi implantado numa propriedade agrícola.

Pott *et al.* (2020) testaram várias estratégias (física – escarificação mecânica, química – gesso e biológica – plantas de cobertura, além de combinações entre ambas) para mitigar a compactação do solo no sul do Brasil, em três ambientes distintos (baixa, média e alta produtividade). Em todas as situações, o uso da escarificação mecânica, isolada ou em conjunto com outras práticas, reduziu os teores de matéria orgânica do solo, demonstrando não ser uma prática sustentável.

Pelos resultados do presente trabalho (Tabela 3), também se conclui não ser necessária qualquer mobilização de solo 11 anos após a implantação do plantio direto,

especialmente quando são utilizadas plantas de cobertura no inverno, uma vez que neste tratamento foi obtida a maior produtividade de soja.

5.3 Concentração de COT e COP

5.3.1 Concentração de COT

A adoção do plantio direto tende a provocar alterações na concentração de COT no perfil do solo. Solos sob plantio direto tendem a acumular maiores quantidades de COT nas camadas superficiais, quando em comparação com outros sistemas de cultivo, como o plantio convencional, o qual reduz à medida que se aprofunda no perfil do solo (SÁ; LAL, 2009; TIECHER *et al.*, 2020; XIAO *et al.*, 2020).

Mesmo sem observar diferença significativa entre os sistemas de cultivo do solo, a concentração de COT, na camada de 0-5 cm, de 34,80 g kg⁻¹ em solo no plantio direto, foi 24,4% maior que no plantio convencional (Tabela 4), porém menor que a relatada por De Oliveira Ferreira *et al.* (2013) que encontraram no plantio direto uma concentração de 30,9 g kg⁻¹ de COT, sendo esta 46% maior em relação ao plantio convencional, quando avaliou-se uma rotação de culturas composta por trigo/soja/aveia/soja/aveia+ervilhaca/milho/nabo. Piva *et al.* (2020), ao avaliarem um experimento de 3,5 anos em um Latossolo Bruno na região de Castro-PR, também citam valores de concentração de COT na camada de 0-5 cm semelhantes aos obtidos neste trabalho, de 34,9 g kg⁻¹ no plantio direto, 12,6% maior do que o teor observado no plantio convencional (31,0 g kg⁻¹).

Nas camadas de solo de 5-10 e 10-20 cm, observou-se uma maior concentração de COT no sistema de plantio convencional em relação ao plantio direto de 17,4% e 16,6%, respectivamente para as camadas acima, embora sem diferença estatística. À partir de 20 cm até a profundidade de 100 cm, a concentração de COT reduz continuamente para todos os sistemas de cultivo, não tendo sido observadas grandes diferenças entre os mesmos (Tabela 4).

Na camada 80-100 cm, os teores encontrados para COT representam 41,8% (11,69 g kg⁻¹) e 34,7% (12,08 g kg⁻¹) dos valores encontrados na camada 0-5 cm, respectivamente para o sistema de plantio convencional e plantio direto (Tabela 4). Isto demonstra que a influência dos sistemas de cultivo na concentração de COT se dá principalmente nas camadas superficiais do solo. Isso também é citado por Veloso

et al. (2018) que avaliaram um experimento de 30 anos instalado sobre um Argissolo na região de Eldorado do Sul, no Estado do Rio Grande do Sul, onde foram comparados os sistemas de cultivo associados a diferentes rotações de culturas com a presença de adubação nitrogenada. Os autores verificaram, na camada 0-5 cm, uma concentração de C de 20,9 g kg⁻¹ no tratamento que associava aveia preta/ervilhaca no inverno e milho/feijão de corda no verão em plantio direto e sem a utilização de N. Ao comparar esse teor com o teor do solo submetido ao plantio convencional e com a mesma rotação de culturas, esse teor foi reduzido em 36%, chegando a 13,4 g kg⁻¹. Na camada de 5-10 cm os valores foram iguais para ambos os sistemas de cultivo (11,7 g kg⁻¹). Nas camadas 10-15 cm e 15-20 cm, o teor de COT foi respectivamente 28,6% e 12,8% maior no plantio convencional em relação ao plantio direto, comportamento semelhante ao observado neste experimento. Nas camadas subsequentes até 100 cm, os valores foram semelhantes para ambos tratamentos, sendo que a concentração de COT na camada 75-100 cm representou 49% e 32% dos valores encontrados na camada 0-5 cm, respectivamente para PC e PD.

Em relação às plantas de cobertura, maiores teores de COT foram observados na camada 0-5 cm, os quais também tiveram rápido declínio à medida que aumentou a profundidade analisada. Em todas as profundidades analisadas, a ervilhaca peluda apresentou maiores teores de COT, sendo que somente na profundidade de 20-30 cm foram verificadas diferenças significativas entre os tratamentos. Nesta profundidade, o tratamento com a ervilhaca peluda apresentou uma concentração de COT de 22,85 g kg⁻¹, o qual não diferiu estatisticamente do nabo forrageiro (Tabela 4). Mesmo resultado foi observado para o estoque de COT e o estoque de COAM, conforme será discutido posteriormente, mas já demonstrando a importância de plantas com baixa relação C/N e seus efeitos sobre esses parâmetros.

A maior concentração de COT observada no tratamento ervilhaca peluda, também é relatada por Locatelli et al. (2020) que observaram uma maior concentração de COT na maioria das profundidades analisadas, de 0-60 cm, sendo que diferenças significativas foram relatadas nas camadas 30-45 cm e 45-60 cm em um experimento com quatro anos de duração. Neste, porém, são relatadas concentrações de COT que variaram de 17,29 g kg⁻¹ na camada de 0-5 cm, à 11,59 g kg⁻¹, na camada 45-60, para o tratamento ervilhaca peluda. Esses valores são menores que os observados no presente trabalho, que variaram de 32,9 a 12,60 g kg⁻¹ de COT, respectivamente para as profundidades 0-5 cm e 80-100 cm (Tabela 4).

A utilização da ervilhaca peluda no sistema tende a trazer efeitos benéficos em relação a concentração de COT, como demonstrado também por Veloso et al. (2018), onde em sistema plantio direto, a troca da aveia preta pela ervilhaca como cobertura de inverno na rotação com milho sem a utilização de N, provocou um aumento na concentração de COT de 29% e 18%, respectivamente para as camadas 0-5 e 5-10 cm. Segundo Ribeiro et al. (2011), o aumento na disponibilidade de N pela inclusão de leguminosas num sistema de rotação, é essencial para a estabilização do carbono por meio da síntese de substâncias mais humificadas (mais ricas em nitrogênio), e garante melhor estabilidade estrutural para a MOS, sendo que o incremento de carbono no solo está intimamente relacionado com o aumento de nitrogênio no solo. Além de que o nitrogênio orgânico fornecido pelas leguminosas é a forma preferencial a ser utilizada nos processos de síntese microbiana das substâncias húmicas.

5.3.2 Concentração de COP

De maneira geral, matéria orgânica particulada (ou carbono orgânico particulado – COP) é em sua maior proporção, formada por fragmentos maiores, de baixo peso e relativamente não decompostos e que tem um tempo de vida relativamente curto no solo (LAVALLEE; SOONG; COTRUFO, 2020), sendo mais importante para a qualidade biológica do solo do que propriamente para manutenção de C no sistema. O COP é altamente sensível à condições ambientais e de manejo e, por se tratar de um compartimento da MOS, que é composto majoritariamente por restos ainda não decompostos, é natural que ocorra uma maior concentração nas camadas superficiais do solo, onde são depositados os resíduos culturais. Essa concentração tende a diminuir drasticamente à medida que se se aprofunda no perfil do solo.

A associação do cultivo mínimo com o nabo forrageiro como planta de cobertura mostrou sinergismo no aumento da concentração de COP ($10,51 \text{ g kg}^{-1}$) na camada 0-5 cm do solo como observado na Tabela 5. O revolvimento do solo no plantio convencional promoveu a decomposição da MOS, o que conseqüentemente, se traduziu em menores concentrações de COP, seja qual for a planta de cobertura utilizada, pois em plantio convencional os resíduos das culturas incorporados ao solo tornam-se uma fonte de alimentação prontamente disponível para os microrganismos

(BAYER *et al.*, 2000), favorecendo uma maior degradação dos resíduos, com consequente redução nos teores encontrados. Na média das culturas, o plantio convencional apresentou uma concentração de COP 58,6% e 47,6% menor em comparação ao cultivo mínimo e plantio direto, respectivamente. Já no plantio direto, observou-se diferenças significativas entre as espécies de plantas utilizadas, com maiores teores observados nos tratamentos ervilhaca peluda e aveia preta, respectivamente 7,53 g kg⁻¹ e 6,26 g kg⁻¹.

No caso dos sistemas de cultivo, diferenças marcantes são observadas entre os mesmos e ao longo do perfil do solo. O cultivo convencional do solo, através da aração e gradagens, tende a aumentar a exposição da matéria orgânica à ação de degradação pelos microrganismos do solo, o que pode provocar uma redução na concentração de COP, já que é a fração da MOS mais susceptível à degradação. Na camada 0-5 cm, o plantio convencional apresentou uma redução de 58,6% na concentração de COP quando comparado ao cultivo mínimo (8,24 g kg⁻¹ para 3,41 g kg⁻¹). Houve uma redução de 42% no COP entre as camadas de 0-5 cm e 10-20 cm no plantio convencional (3,41 g kg⁻¹ para 1,98 g kg⁻¹), e 85% quando considerado o cultivo mínimo (8,24 g kg⁻¹ para 1,26 g kg⁻¹) (Tabela 6).

Quando consideradas as camadas até a profundidade de 20-30 cm, há uma redução na concentração de COP de 84% e 68% respectivamente para o plantio direto e plantio convencional, quando comparadas as camadas de 0-5 cm e 20-30 cm (Tabela 6). A maior redução na concentração de COP entre a camada superficial (0-5 cm) e a camada mais profunda (20-30 cm) indica que em plantio direto, há uma maior concentração de COP na camada superficial, quando em comparação ao plantio convencional, e uma maior capacidade do sistema em estratificar as camadas de solo através da deposição de resíduos na superfície e ausência de revolvimento, já que na camada 20-30 cm os teores encontrados foram praticamente iguais (1,08 e 1,04 g kg⁻¹, respectivamente para PC e PD).

Com exceção da camada superficial (0-5 cm), nas demais camadas, até a profundidade de 30 cm, embora não significativo, o plantio convencional apresentou maiores teores de COP em comparação ao cultivo mínimo e o plantio direto. A movimentação do solo no sistema convencional, além de expor a matéria orgânica à degradação, tende à homogeneizar o perfil do solo, até a profundidade de trabalho dos implementos. Tivet *et al.* (2013) também relatam maiores concentrações de COP em plantio convencional nas camadas 10-20 e 20-40 cm em comparação ao plantio

direto, resultantes da redistribuição do COS pelas sucessivas operações de gradagem. A partir dos 30 cm até a profundidade de 100 cm, o plantio direto apresentou maiores teores de COP em relação ao plantio convencional e cultivo mínimo.

5.4 Estoque de carbono orgânico total (COT), carbono orgânico particulado (COP) e carbono orgânico associado aos minerais (COAM)

5.4.1 Estoque de COT

Os onze anos de condução do experimento não foram suficientes para evidenciar diferenças significativas no estoque de COT entre os sistemas mais contrastantes, plantio convencional e o plantio direto (Tabelas 7 e 8), ao contrário do que muitos trabalhos têm demonstrado na região sul do Brasil (BAYER *et al.*, 2000; DE MORAES SÁ *et al.*, 2014), seja nas camadas estratificadas até a profundidade de 100 cm, ou no acumulado das camadas.

Considerando o estoque de COT acumulado em 0-100 cm, o valor obtido de 141,14 Mg ha⁻¹ no sistema de cultivo convencional de solo (Tabela 8), é semelhante ao obtido por Veloso *et al.* (2018) que verificaram um estoque de C que variou de 119,6 a 142,9 Mg ha⁻¹ nas parcelas sobre plantio convencional e plantas de cobertura leguminosas, sem adubação nitrogenada. Isso mostra que os números obtidos neste trabalho são coerentes com experimentos semelhantes.

O não revolvimento do solo, característico no sistema plantio direto, leva à deposição e acúmulo de resíduos de plantas, seja de plantas de cobertura ou restos culturais sobre a superfície. Esse acúmulo tende a elevar os estoques de COT na camada superficial de 0-5 cm, fato que não foi observado no presente trabalho e difere do relatado por Calegari *et al.* (2008), em experimento no mesmo município de Pato Branco, onde os autores citam um estoque de COT 19,5% maior no plantio direto quando comparado ao plantio convencional na camada de 0-10 cm, após 19 anos de instalação do experimento em uma área previamente cultivada sobre plantio convencional.

À medida que se aprofunda no perfil do solo, há uma tendência de o plantio convencional apresentar maiores estoques de COT, o que ocorre normalmente até os 30 cm de profundidade, ocasionado pelas sucessivas operações de cultivo de solo com arações e gradagens, que acabam por misturar e uniformizar as camadas de solo

até a profundidade de trabalho dos implementos. Verificou-se um estoque de COT 17,2% menor no plantio direto em relação ao plantio convencional na camada 5-10 cm, 15,5% menor na camada 10-20 cm e 11,8% menor na camada 20-30 cm (Tabela 7), embora sem diferença estatística.

Essa tendência está de acordo com Calegari et al. (2008) que também citam que o plantio direto apresentou um estoque de COT 9,7% menor em relação ao plantio convencional na camada 10-20 cm. A incorporação dos resíduos pelo plantio convencional aumenta o contato entre o C adicionado pelos resíduos e as argilas presentes no solo, acelerando o processo de interação entre eles, favorecendo a ocorrência de maiores estoques de COT em plantio convencional pela associação do C com os minerais.

O principal efeito esperado do plantio direto sobre o estoque de COT, comumente é observado nas camadas superficiais, devido à deposição dos resíduos culturais. À medida que são analisadas as camadas mais profundas do solo somadas umas às outras, esse efeito sobre o COT é diluído. Calegari et al. (2008) demonstram que na camada de 0-10 cm, o estoque de COT no plantio direto é 19,5% maior que no plantio convencional, enquanto que considerando a camada 0-40 cm, o estoque de COT no plantio direto é 2,9% maior que no plantio convencional. No presente trabalho foi observado no plantio direto um estoque de COT de 63,70 Mg ha⁻¹ e 128,91 Mg ha⁻¹, respectivamente para as camadas de 0-30 e 0-100 cm (Tabela 8). Mesmo que sem diferença estatística, esses valores foram 12,2% e 8,7% respectivamente, menores em relação ao plantio convencional.

Este resultado diverge de uma grande quantidade de trabalhos que visam avaliar o COT do solo (CALEGARI *et al.*, 2008; DE MORAES SÁ *et al.*, 2014; TIVET *et al.*, 2013) onde, independentemente da profundidade final amostrada, o plantio direto sempre apresentou maiores estoques de COT. Tivet et al. (2013) trabalhando na região de Ponta Grossa, onde o clima mais frio favorece o maior acúmulo de COT, relatam um estoque de COT acumulado até 100 cm de profundidade, de 266,6 Mg ha⁻¹, 6,8% superior ao plantio convencional, em um experimento com 29 anos de duração, valor este 107% maior que o obtido no presente trabalho para o plantio direto.

No presente trabalho, avaliou-se um experimento em que as faixas de cultivo de solo têm uma largura reduzida (6 m), as quais são intercaladas entre faixas com revolvimento (PC e CM) e faixas sem revolvimento (PD), implantadas em um solo com baixa declividade. Isto explica a ausência de ocorrência de erosão superficial,

característica primordial do plantio convencional e que tem efeitos drásticos na redução dos teores de nutrientes do solo, dentre eles o teor de COT. Além disso, a eficiência das operações de aração e gradagem em quebrar os agregados do solo, expondo o COT à degradação e assim levar à redução dos teores no solo sob PC pode estar sendo prejudicada, pois o conjunto trator/arado utilizado na condução do experimento não tem conseguido efetuar o completo revolvimento do solo, pelo fato do arado de discos utilizado ser menor do que a bitola de trabalho do trator, ficando dessa forma, em cada passada do conjunto, uma faixa sem revolvimento entre as passadas.

Entretanto, corroborando com os resultados deste trabalho, Roscoe; Buurman (2003), trabalhando com um Latossolo na região do cerrado, não encontraram diferenças no estoque de COT na camada 0-45 cm após 30 anos de cultivo. Esta ausência de resultados é atribuída à composição do solo, com alta porcentagem de argila contendo altos teores de oxi-hidróxidos de Fe e Al, assim como uma suplementação de C suficiente para manter o sistema convencional, através do sucessivo plantio de milho.

A classificação do solo onde está instalado este experimento, que é um Latossolo com alto teor de argila (770 g kg^{-1}), e que em sua composição ocorrem naturalmente óxidos de Fe e Al, também é uma explicação para a falta de diferenças estatísticas nos onze anos de condução, pois a capacidade de proteção da MOS é positivamente correlacionada com o conteúdo de argila do solo (ROSCOE; BUURMAN, 2003). A capacidade dos minerais de argila de interagir com a MOS em sua superfície, associada à formação de agregados com a MOS são os principais mecanismos determinantes na preservação da MOS nos solos argilosos.

Operações de aração e gradagem causam distúrbios no perfil do solo, favorecendo a perda da MOS e conseqüentemente do COT através da aceleração da atividade microbiana, tornando os resíduos do solo em uma rápida e prontamente disponível fonte de alimento e energia (BAYER *et al.*, 2000) degradando o COT do solo. Isso se dá pelo aumento da superfície de contato dos resíduos do solo com os microrganismos presentes no solo, bem como pelo rompimento dos agregados do solo, expondo a MOS à ação microbiana.

Dessa forma, onze anos de sucessivas operações de aração e gradagem deveriam, em teoria, apresentar efeitos significativos na redução do COT do solo. A presença de cobertura vegetal na área, seja ela de resíduos culturais de milho (todos

os anos anteriores à avaliação foram cultivados com milho no verão), ou de plantas destinadas à cobertura vegetal de inverno, propiciaram um aporte significativo de carbono ao solo, aporte esse que pode ter sido decisivo para inibir a perda de COT do solo através das operações mecânicas de cultivo do solo no plantio convencional.

De acordo com De Moraes Sá et al. (2015), para a manutenção do estoque de C do solo, deve ocorrer uma entrada de MS de no mínimo $8,00 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ em plantio direto. No presente trabalho, considerando a média de produção de MS das plantas de cobertura no ano de 2022 (que foi o ano de menor produção), de 7,3, 4,2 e $2,9 \text{ Mg ha}^{-1}$, respectivamente para aveia preta, nabo forrageiro e ervilhaca peluda, e tomando por base o menor valor ($2,9 \text{ Mg ha}^{-1}$), somados à quantidade de $6,43 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de MS produzida pela cultura do milho como resíduos culturais (média de produção obtida por Locatelli et al. (2020) em quatro anos de avaliações considerando o milho plantado sobre as três culturas de cobertura na região de Lages-SC), tem-se uma adição estimada de $9,33 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de MS, o que é superior em 16,6% ao mínimo determinado para manutenção de C no solo.

A contínua adição de resíduos de culturas na superfície do solo fornece um ambiente favorável ao aumento da atividade biológica e estimula a macroagregação (SÁ; LAL, 2009) o que por sua vez tende a proteger o COT da degradação e atenuar ou inibir os efeitos degradantes das operações de gradagem e aração.

Tiecher et al. (2020) trabalhando em um experimento também no município de Pato Branco-PR, no mesmo tipo de solo, após 26 anos testando diferentes combinações de sistemas de cultivo e plantas de cobertura concluem que mais importante que o sistema de cultivo do solo, é a presença de plantas de cobertura. Os autores demonstram que o plantio convencional com plantas de cobertura acumulou mais C no solo em comparação ao plantio direto sem plantas de cobertura. Avaliando os tratamentos sem uso de plantas de cobertura (pousio) verificou-se uma taxa de acúmulo de $0,25 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ maior no plantio direto em comparação ao plantio convencional. Porém, em plantio direto a utilização das plantas de cobertura, proporcionou uma taxa de acúmulo de C de $0,32 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ maior nos tratamentos com plantas de cobertura em comparação ao pousio. Considerando-se a profundidade de 0-100 cm, e utilizando-se o plantio convencional em pousio como referência, a mudança do plantio convencional para o plantio direto em pousio provocou uma pequena perda de COT ($<0,1 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) durante o período estudado (26 anos);

entretanto, a inclusão das plantas de cobertura em plantio convencional provocou um acúmulo de COT durante o período ($>0,05 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$).

Esse resultado evidencia a importância da presença das plantas de cobertura no sistema e, diferentemente do presente trabalho (onde não foram encontradas diferenças no estoque de COT entre os sistemas), por mais que os autores tenham encontrado diferenças significativas no estoque de COT entre o plantio direto e o plantio convencional (somente na camada de 0-20 cm), o efeito benéfico dessas plantas no sistema pode estar atenuando as consequências negativas do cultivo do solo. Além disso, considerando o teor médio inicial de MOS do solo no início do experimento, de $51,6 \text{ g dm}^{-3}$ (Tabela 1), o qual é considerado alto, combinado com a já mencionada constante adição de resíduos por parte de culturas e plantas, o mesmo pode se constituir em mais um fator que contribui com a não visualização de resultados mais divergentes entre os sistemas de plantio direto e plantio convencional.

Campos et al. (2011) obtiveram uma relação linear entre o aumento no estoque de COT e adição de C no solo, no município de Cruz Alta, RS, em um Latossolo argiloso. A adição anual de 1 tonelada de C no sistema foi responsável pelo aumento no estoque de C de $4,069 \text{ Mg ha}^{-1}$ de COT, na profundidade de 0-30 cm 19 anos após o início do experimento. Neste, os autores também compararam os sistemas de cultivo associados a diferentes combinações de rotação entre plantas de cobertura e culturas comerciais. A partir do tratamento tomado como padrão (rotação trigo/soja em plantio convencional) com um estoque de COT de $74,86 \text{ Mg ha}^{-1}$, a troca do cultivo do solo, para o plantio direto não se traduziu em aumento do COT, que ficou em $74,90 \text{ Mg ha}^{-1}$. Entretanto, com a troca da rotação de culturas utilizada e o aumento na intensidade dos cultivos (aveia preta/soja/aveia preta+ervilhaca/milho/nabo forrageiro/trigo/soja), e conseqüentemente um aumento na quantidade e qualidade dos resíduos produzidos e adicionados ao sistema, em plantio convencional, verificou-se um aumento de 7,8% no estoque de COT, que foi para $80,75 \text{ Mg ha}^{-1}$.

A influência da adição de resíduos sobre o estoque de C do solo também é destacada por Veloso et al. (2018), que avaliaram diferentes rotações de culturas e cultivo de solos associados à utilização de N em um Argissolo no município de Eldorado do Sul – RS. Verificou-se um aumento linear no estoque de COT na camada de 0-30 cm à medida que se aumentou a quantidade de C adicionada no sistema, na ordem de $2,11 \text{ Mg ha}^{-1}$ de COT para cada tonelada de C adicionado ao solo no sistema plantio direto em 30 anos de experimento. Com uma taxa menor ($1,40 \text{ Mg ha}^{-1}$), esse

aumento do COT também o observado sobre plantio convencional, destacando a importância das plantas de cobertura fornecendo resíduos no sistema.

Boddey et al. (2010) trabalhando com um Latossolo na região de Cruz Alta, no estado do Rio Grande do Sul, também relatam um estoque de COT de 158,8 Mg ha⁻¹ no cultivo convencional, estoque que foi maior em comparação ao plantio direto que apresentou 155,0 Mg ha⁻¹ na profundidade de 0-100 cm em um experimento de 17 anos, e em sucessão milho/soja, mesmo que sem diferenças estatísticas. Quando se adicionou à rotação de culturas a cultura do milho e as culturas de cobertura (ervilhaca peluda e aveia preta) inverteu-se a situação, observando-se que o plantio direto foi estatisticamente superior, com um estoque de COT de 172,3 Mg ha⁻¹ e de 163,5 Mg ha⁻¹ no plantio convencional.

Em relação às plantas de cobertura, o maior estoque de COT foi observado no tratamento ervilhaca peluda apenas na camada 20-30 cm, não se diferenciando do nabo forrageiro; nas demais camadas não houve diferença estatística entre os tratamentos de plantas de cobertura (Tabela 7). Certamente, o N adicionado pela leguminosa é a chave para a ciclagem de nutrientes e acúmulo de COT sobre ambos sistemas de cultivo (CALEGARI *et al.*, 2008). Para Locatelli et al. (2020) o abundante sistema radicular da ervilhaca favorece o acúmulo de C em profundidade, pois as raízes desempenham um papel mais importante na adição de C no solo em comparação à parte aérea, crescendo e acumulando-se diretamente dentro da matriz do solo, enquanto os resíduos de parte aérea são depositados sobre o solo (ALBURQUERQUE *et al.*, 2015), sendo dessa forma passíveis de perdas.

Veloso et al. (2019) ao compararem tratamentos com aveia preta e ervilhaca comum associados ao plantio direto e convencional em um Argissolo com textura arenosa também relatam quando em plantio direto, um estoque de COT 12,8% superior quando da utilização da ervilhaca peluda em comparação com a aveia preta. A associação da aveia preta com a ervilhaca peluda apresentou um estoque de COT 23,7% superior ao tratamento de aveia preta, na camada de 0-20 cm.

Altas concentrações de COT e suas frações são o resultado das entradas de N pelos resíduos das culturas, indicando que em plantio direto, MOS é também afetada pela disponibilidade de N, e não somente pela deposição de C pelas plantas de cobertura (RAPHAEL *et al.*, 2016).

Nas profundidades de 0-30 e 0-100 cm, novamente a ervilhaca peluda apresentou os maiores estoques de COT, com valores de 72,59 e 145,23 Mg ha⁻¹,

respectivamente, não tendo se diferenciado do nabo forrageiro até 30 cm (Tabela 8). Assim, a inclusão de espécies de plantas que têm a capacidade de realizar a fixação biológica de N (ervilhaca peluda) ou de acumular N (nabo forrageiro) tem efeitos positivos no estoque de COT do solo, como observado nos dados apresentados.

Se compararmos a produção de massa seca das plantas de cobertura nos dois anos de avaliação, percebe-se que no acumulado dos dois anos, com 12,1 Mg ha⁻¹, a aveia preta produziu 83% a mais em relação à ervilhaca peluda (Tabela 2). Entretanto, quando analisados os estoques de COT, vê-se que a ervilhaca apresentou um estoque de COT 12,3% superior à aveia preta, no acumulado de 0-100 cm. Ou seja, a composição do resíduo de cada espécie está sendo mais importante do que a própria quantidade de resíduo adicionado pelas espécies de plantas de cobertura.

Segundo (COTRUFO *et al.*, 2013), resíduos de plantas de alta qualidade (a qual é comumente definida pela sua rápida decomposição, sendo altamente lábeis) apresentam melhores efeitos na formação e estabilização da MOS, quando em comparação com resíduos de qualidade inferior (resíduos mais recalcitrantes e de decomposição lenta). Maior quantidade de MOS deve ser formada e acumulada em períodos de tempo maiores quando os resíduos vegetais são de alta qualidade.

Por outro lado, Tiecher *et al.* (2020) concluíram não haver diferenças entre as diversas famílias de plantas de cobertura (leguminosas, gramíneas e crucíferas) no acúmulo de COT, no mesmo experimento citado anteriormente, no município de Pato Branco-PR.

5.4.2 Estoque de COP

Devido ao fato da MOP ser menos protegida da atividade microbiana, mudanças no meio ambiente que podem levar à um decréscimo na inibição microbiana ou a quebra dos agregados (revolvimento do solo), podem imediatamente aumentar a taxa de decomposição da MOP (LAVALLEE *et al.*, 2020).

Isso é verificado neste experimento, onde os menores valores obtidos para o estoque de COP na camada 0-5 cm foram obtidos em plantio convencional, independentemente da cobertura vegetal utilizada. O plantio convencional apresentou uma redução no estoque de COP de 51%, 48% e 47%, respectivamente para aveia preta, nabo forrageiro e ervilhaca peluda, em comparação ao cultivo mínimo (Tabela 9), confirmando que essa fração é mais sensível às alterações de manejo ao longo do

tempo. O revolvimento do solo, característico do plantio convencional, provocou uma redução no estoque de COP nesta camada superficial, o que também é relatado em outros trabalhos.

Campos et al. (2011), ao analisarem a influência do cultivo do solo e de diferentes rotações de culturas sobre o C, relatam uma redução no estoque COP de 47%, na camada 0-5 cm, ao comparar o plantio direto com o plantio convencional, na média entre as diversas rotações de culturas. Menor influência sobre o estoque de COP é relatada pelos autores em relação ao efeito das plantas de cobertura. Tomando por base a sucessão de culturas trigo/soja, a intensificação do sistema, com aumento da produção de biomassa e inclusão de leguminosas e crucíferas (aveia preta/soja/aveia preta+ervilhaca/milho/nabo forrageiro/trigo/soja) trouxe um aumento de 18% no COP, considerando a média entre o plantio direto e plantio convencional. Esse incremento relatado no COP é menor do que o obtido no presente experimento, onde, tomando-se por base a AP em PC (Tabela 9), a qual apresentou os menores estoques de COP, verificou-se um aumento de 43% e 35% no estoque de COP quando comparada com NF, respectivamente para o PC e para o CM. Aumento de 25% no COP foi observado quando se comparou o estoque de COP da aveia preta com a ervilhaca peluda em PD.

Os dados acima mostram que quanto ao COP, o principal fator determinante do seu acúmulo é o revolvimento do solo, onde a redução dos distúrbios do solo é importante para o acúmulo do C na fração particulada da MOS, a qual representa o principal substrato que garante a mineralização dos nutrientes pela biota do solo (SOUZA *et al.*, 2016).

Nas camadas 5-10, 10-20 e 20-30 cm, os estoques de COP foram respectivamente 26,5%, 31,2% e 10,7% maiores no plantio convencional em comparação com o plantio direto, respectivamente (Tabela 10). Isto pode ser atribuído (assim como a maior concentração de COP logo abaixo da superfície em plantio convencional) ao processo de cultivo do solo, que no caso do plantio convencional, há uma incorporação constante dos resíduos da superfície, sempre nesta profundidade específica (CAMPOS *et al.*, 2011). Os autores também relatam um estoque de COP 89,7% e 44,8% maior em plantio convencional quando comparado com o plantio direto, respectivamente para as camadas 5-10 cm e 10-20 cm.

Tivet et al. (2013), ao avaliarem diferentes sistemas de cultivo do solo, em um experimento de 29 anos na região de Ponta Grossa, no estado do PR, em um

Latossolo, também relatam um aumento proporcional no estoque de COP em plantio convencional em relação ao plantio direto com aumento na profundidade da camada amostrada. Os autores relatam um estoque de COP na camada 0-20 de 5,5 e 8,8 Mg ha⁻¹, respectivamente para o plantio convencional e plantio direto. Ao se analisar a camada 20-40 cm, os valores encontrados para o estoque de COP caem para 1,7 e 0,7 Mg ha⁻¹, respectivamente para plantio convencional e plantio direto.

Quando considerado o estoque de COP encontrado no acumulado das camadas até a profundidade de 100 cm, 77%, 73% e 72% do estoque de COP, respectivamente para o plantio convencional, cultivo mínimo e plantio direto, foram verificados na camada 0-30 cm (Tabela 11). Esses dados são semelhantes aos obtidos por Tivet et al. (2013) onde no acumulado de 0-40 cm, são relatados 75% e 76%, respectivamente para cultivo mínimo e plantio convencional. Entretanto, divergem quanto ao plantio direto, onde o estoque de COP contido na camada 0-40 cm representou 85% do COP contido na camada 0-100 cm.

Considerando as plantas de cobertura, na camada 0-5 cm, os maiores valores foram observados com o nabo forrageiro. A partir dessa profundidade, houve uma tendência de maiores estoques de COP no tratamento de ervilhaca peluda, e/ou nabo forrageiro. Isso é comprovado pelos valores obtidos no acumulado 0-30 e 0-100 cm com a ervilhaca peluda apresentando um estoque de COP 6,4% e 5,7% superiores à aveia preta (Tabela 11). O maior estoque de COP quando do uso de plantas leguminosas como cobertura também é citado por Campos et al. (2011), onde a inclusão de leguminosas e crucíferas na sucessão trigo/soja proporcionou um aumento no estoque de COP de 17,9% na camada 0-30 cm, 19 anos após a instalação do experimento.

5.4.3 Estoque de COAM

Não foram observadas diferenças no estoque de COAM entre os sistemas de cultivo do solo em nenhuma camada de solo (Tabela 12), bem como no acumulado das camadas 0-30 e 0-100 cm (Tabela 13). O revolvimento sucessivo do solo, realizado duas vezes por ano durante onze anos no plantio convencional deveria resultar em perdas de C do solo, traduzindo-se em menores estoques de C.

Bayer et al. (2004), trabalhando em um Latossolo no estado do Mato Grosso do Sul, também não encontraram diferenças no C associado aos minerais, entre o

plantio direto e o plantio convencional na camada 0-20 cm. Os autores atribuíram isso ao pouco tempo de realização do experimento (6 anos), o qual não foi suficiente para que houvesse uma degradação dessa fração do COT do solo, visto que este é altamente estável quimicamente devido à sua interação com a fração mineral do solo e protegido fisicamente através do seu posicionamento dentro dos microagregados. Considerando a composição dos solos presentes nessa região, nos quais há grande presença de argila e óxidos de Fe e Al, tal composição tende a oferecer uma maior proteção ao C do solo contra a sua degradação. Como a MOS associada aos minerais apresenta uma ciclagem bem mais lenta no que se refere aos processos de formação e decomposição, torna-se necessário um período maior para que as alterações no manejo produzam efeito no estoque desta fração (BAYER *et al.*, 2004).

No Latossolo estudado neste experimento, o COAM representou uma proporção de 81,4% do COT na camada 0-5 cm, aumentando linearmente à medida que se aumentou a profundidade amostrada, até 97,2% na camada 80-100 cm (considerando a média das plantas de cobertura em plantio direto) (Tabela 7 e 12). Esses dados são semelhantes aos obtidos por Campos *et al.* (2011) que, também trabalhando num Latossolo em um experimento de 19 anos, relatam uma participação do COAM no COT variando de 81,6% na camada 0-5 cm a 98,2% na camada 20-30 cm, sendo que a proporção também aumentou à medida que se aumentou a profundidade (considerando a média das diferentes rotações de culturas em plantio direto). Souza *et al.* (2016), na região de Planaltina-DF, cerrado brasileiro, relatam que o COAM representou 86% e 74% do COT na camada 0-5 cm, respectivamente para PC e PD em um experimento conduzido por 11 anos num Latossolo Amarelo. Uma alta proporção de COAM pode indicar um longo tempo de residência do C no solo e uma maior capacidade de armazenamento de C no solo (GULDE *et al.*, 2008).

Para Santos *et al.* (2014) a presença de uma alta proporção de COAM no COT demonstrou a forte interação da matéria orgânica com os óxidos de Fe e Al e caulinita presentes naqueles solos altamente intemperizados do Cerrado, semelhante ao que ocorreu no presente experimento.

Maiores estoques de COAM foram verificados com a ervilhaca peluda, em todas as profundidades amostradas, sendo que na camada 20-30 cm verificou-se um estoque de COAM de 19,92 Mg ha⁻¹, 17,9% maior que o observado na aveia preta (Tabela 12). Plantas de cobertura leguminosas são associadas com o aumento na quantidade e labilidade dos resíduos adicionados, favorecendo associações

organominerais nas partículas finas do solo, especialmente quando combinado com o plantio direto (VELOSO *et al.*, 2019).

A inclusão de plantas de cobertura leguminosas na rotação de culturas tende a se traduzir em maiores estoques de COAM, como reportado por Santos *et al.* (2011) em um experimento de 17 anos, no Município de Ponta Grossa, PR. Dentre as diversas combinações de pastagens, e/ou cobertura vegetais que compunham os vários esquemas de rotação de cultura, a substituição da aveia preta pela ervilhaca na rotação aveia preta/milho/trigo/soja, resultou em um aumento de 12,1% no estoque de COAM na camada de 10-20 cm. No acumulado de 0-20 cm, o aumento no estoque de C foi de 5,7%.

No presente trabalho, foi constatado um maior efeito da ervilhaca peluda também no acumulado de 0-30 cm, com um estoque de COAM 14,3% maior em relação à aveia preta (Tabela 13). No acumulado de 0-100 cm, novamente observou-se um maior estoque de COAM com o tratamento de ervilhaca peluda. Com um estoque de COAM de 137,12 Mg ha⁻¹ sendo este foi 12,7% superior ao observado com a aveia preta.

A maior influência da ervilhaca peluda em comparação com a aveia preta sobre o estoque de COAM observado no presente trabalho provavelmente é devido ao fato de que todos os anos as parcelas recebem a ervilhaca peluda como cobertura de inverno. Já em Santos *et al.* (2011), o efeito da inclusão da leguminosa, no caso a ervilhaca é menor, pois a mesma é colocada em um sistema de rotação de culturas, sendo cultivada na área a cada dois anos.

6 CONCLUSÃO

O plantio convencional apresentou os menores teores de COP para todas as espécies de plantas utilizadas, por sua vez no cultivo mínimo com nabo forrageiro foram verificados os maiores teores de COP. Os sistemas de cultivo não afetaram a concentração de COT, porém, a ervilhaca peluda proporcionou maiores teores de COT, especialmente na camada 20-30 cm.

O cultivo do solo no plantio convencional provocou uma redução no estoque de COP, para todas as espécies de plantas de cobertura, quando em comparação com os demais sistemas de cultivo. Porém, não provocou redução do estoque de COT e COAM em relação ao plantio direto, provavelmente em função da alta taxa de entrada de resíduos no sistema, e à alta proteção do carbono do solo, conferida pela composição mineralógica do solo.

A ervilhaca peluda proporcionou os maiores estoques de COT e COAM em todas as camadas analisadas, sendo estatisticamente superior na camada 20-30 cm (20,96 Mg ha⁻¹ e 19,92 Mg ha⁻¹, respectivamente para COT e COAM) e nos acumulados de 0-30 cm (72,59 Mg ha⁻¹ e 66,58 Mg ha⁻¹) e de 0-100 cm (145,23 Mg ha⁻¹ e 137,12 Mg ha⁻¹, respectivamente para COT e COAM).

A produtividade da soja foi influenciada pelos sistemas de cultivo, sendo mais elevada no sistema plantio direto, sem efeito para a espécie de planta de cobertura cultivada.

A contínua adição de resíduos na área, proporcionada pelo cultivo do milho durante o verão, e pelo cultivo das plantas de cobertura durante o inverno, em todos os onze anos anteriores, associada à mineralogia do solo e ao alto teor de argila, proporcionam uma alta proteção do COS contra a degradação física durante as operações de cultivo do solo. Esses aspectos parecem estar impedindo que se verifiquem diferenças significativas entre os sistemas mais contrastantes (PD e PC).

REFERÊNCIAS

- ACHARYA, B. S.; DODLA, S.; GASTON, Lewis. A.; DARAPUNENI, M.; WANG, J. J.; SEPAT, S.; BOHARA, H. Winter cover crops effect on soil moisture and soybean growth and yield under different tillage systems. **Soil and Tillage Research**, v. 195, p. 104430, 2019.
- ALBURQUERQUE, M. A.; DIECKOW, J.; SORDI, A.; PIVA, J. T.; BAYER, C.; MOLIN, R.; PERGHER, M.; RIBEIRO-JUNIOR, P. J. Carbon and nitrogen in a Ferralsol under zero-tillage rotations based on cover, cash or hay crops. **Soil Use and Management**, v. 31, n. 1, p. 1–9, 2015.
- ASENSO, E.; HU, L.; ISSAKA, F.; TIAN, K.; ZHANG, L.; ZHANG, L.; ZENG, J.; ZHU, Y.-F.; LI, J. Four tillage method assessments on soil organic carbon, total nitrogen, biological activities, and maize grain yield in Southern China. **Food and Energy Security**, v. 8, n. 4, p. e176, 2019.
- AZIZ, I.; MAHMOOD, T.; ISLAM, K. R. Effect of long term no-till and conventional tillage practices on soil quality. **Soil and Tillage Research**, v. 131, p. 28–35, jul. 2013.
- BAI, Z.; DENT, D. L.; OLSSON, L.; SCHAEPMAN, M. E. **Global assessment of land degradation and improvement: 1. identification by remote sensing**. [S. l.]: ISRIC-World Soil Information, 2008. Acesso em: 27 abr. 2022.
- BATJES, N. H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. **European Journal of Soil Science**, v. 65, n. 1, p. 10–21, 2014.
- BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A. Armazenamento de carbono em frações lábeis da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, p. 677–683, 2004.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; AMADO, T. J. C.; MARTIN-NETO, L.; FERNANDES, S. V. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 54, n. 1, p. 101–109, 1 mar. 2000.
- BAYER, C.; SPAGNOLLO, E.; WILDNER, L. do P.; ERNANI, P. R.; ALBURQUEQUE, J. A. Incremento de carbono e nitrogênio num latossolo pelo uso de plantas estivais para cobertura do solo. **Ciência Rural**, v. 33, p. 469–475, 2003.
- BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk Density. In: KLUTE, A. (org.). **SSSA Book Series**. Madison, WI, USA: Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, 2018. p. 363–375.
- BLANCO-CANQUI, H.; SHAPIRO, C. A.; WORTMANN, C. S.; DRIJBER, R. A.; MAMO, M.; SHAVER, T. M.; FERGUSON, R. B. Soil organic carbon: The value to soil properties. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 68, n. 5, seç. A Section, p. 129A-134A, 1 set. 2013.
- BODDEY, R. M.; JANTALIA, C. P.; CONCEIÇÃO, P. C.; ZANATTA, J. A.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; DIECKOW, J.; DOS SANTOS, H. P.; DENARDIN, J. E.; AITA,

C.; GIACOMINI, S. J.; ALVES, B. J. r.; URQUIAGA, S. Carbon accumulation at depth in Ferralsols under zero-till subtropical agriculture. **Global Change Biology**, v. 16, n. 2, p. 784–795, 2010.

CALEGARI, A.; HARGROVE, W. L.; RHEINHEIMER, D. D. S.; RALISCH, R.; TESSIER, D.; DE TOURDONNET, S.; DE FATIMA GUIMARÃES, M. Impact of long-term no-tillage and cropping system management on soil organic carbon in an Oxisol: A model for sustainability. **Agronomy Journal**, v. 100, n. 4, p. 1013–1019, 2008.

CALEGARI, A.; MONDARDO, A.; BULISANI, E. A.; BALTASAR B DA COSTA, M.; ALCÂNTARA, P. B.; MIYASAKA, S.; AMADO, T. J. C. **Adubação verde no sul do Brasil**. Rio de Janeiro: AS-PTA, 1992.

CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Particulate Soil Organic-Matter Changes across a Grassland Cultivation Sequence. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, n. 3, p. 777–783, maio 1992.

CAMPOS, B.-H. C. de; AMADO, T. J. C.; BAYER, C.; NICOLOSO, R. da S.; FIORIN, J. E. Carbon stock and its compartments in a subtropical oxisol under long-term tillage and crop rotation systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 805–817, jun. 2011.

CARGNELUTTI FILHO, A.; EVANGELISTA, D. H. R.; GONÇALVES, E. C. P.; STORCK, L. Tamanho de amostra de caracteres de genótipos de soja. **Ciência Rural**, v. 39, p. 983–991, jul. 2009.

CASÃO JUNIOR, R.; ARAÚJO, A. G. de A.; LLANILLO, R. F. **No-till agriculture in southern Brazil: factors that facilitated the evolution of the system and the development of the mechanization of conservation farming**. [S. I.]: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2012. Disponível em: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20123259314>. Acesso em: 27 abr. 2022.

CHERUBIN, M. R. **Guia prático de plantas de cobertura: aspectos filotécnicos e impactos sobre a saúde do solo**. [S. I.]: Portal de Livros Abertos da USP, 2022. DOI 10.11606/9786589722151. Disponível em: <http://www.livrosabertos.sibi.usp.br/portaldelivrosUSP/catalog/book/782>. Acesso em: 30 abr. 2022.

CIAIS, P.; SABINE, C.; BALA, G.; BOPP, L.; BROVKIN, V.; CANADELL, J.; CHHABRA, A.; DEFRIES, R.; GALLOWAY, J.; HEIMANN, M.; OTHERS. Carbon and other biogeochemical cycles. **Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. [S. I.]: Cambridge University Press, 2014. p. 465–570. Acesso em: 27 abr. 2022.

CONAB. Conab - Séries Históricas das Safras. 2024. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras>. Acesso em: 29 abr. 2024.

COTRUFO, M. F.; WALLENSTEIN, M. D.; BOOT, C. M.; DENEFF, K.; PAUL, E. The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter

decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter? **Global Change Biology**, v. 19, n. 4, p. 988–995, 2013.

CRESPO, C.; WYNGAARD, N.; SAINZ ROZAS, H.; STUDDERT, G.; BARRACO, M.; GUDELJ, V.; BARBAGELATA, P.; BARBIERI, P. Effect of the intensification of cropping sequences on soil organic carbon and its stratification ratio in contrasting environments. **CATENA**, v. 200, p. 105145, 2021.

DE MORAES SÁ, J. C.; SÉGUY, L.; TIVET, F.; LAL, R.; BOUZINAC, S.; BORSZOWSKI, P. R.; BRIEDIS, C.; DOS SANTOS, J. B.; DA CRUZ HARTMAN, D.; BERTOLONI, C. G.; ROSA, J.; FRIEDRICH, T. Carbon depletion by plowing and its restoration by no-till cropping systems in Oxisols of subtropical and tropical agro-ecoregions in Brazil. **Land Degradation & Development**, v. 26, n. 6, p. 531–543, 2015.

DE MORAES SÁ, J. C.; TIVET, F.; LAL, R.; BRIEDIS, C.; HARTMAN, D. C.; DOS SANTOS, J. Z.; DOS SANTOS, J. B. Long-term tillage systems impacts on soil C dynamics, soil resilience and agronomic productivity of a Brazilian Oxisol. **Soil and Tillage Research**, v. 136, p. 38–50, 2014.

DE OLIVEIRA FERREIRA, A.; JORGE CARNEIRO AMADO, T.; DA SILVEIRA NICOLOSO, R.; DE MORAES SÁ, J. C.; ERNANI FIORIN, J.; SANTOS HANSEL, D. S.; MENEFE, D. Soil carbon stratification affected by long-term tillage and cropping systems in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 133, p. 65–74, 2013.

DERPSCH, R.; SIDIRAS, N.; ROTH, C. H. Results of studies made from 1977 to 1984 to control erosion by cover crops and no-tillage techniques in Paraná, Brazil. **Soil and Tillage Research**, Reduced Tillage - Rational Use in Sustained Production, III. v. 8, p. 253–263, 1 nov. 1986.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and Assessing Soil Quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. (orgs.). **SSSA Special Publications**. Madison, WI, USA: Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, 1994. p. 1–21.

DORAN, John W.; PARKIN, T. B. Quantitative Indicators of Soil Quality: A Minimum Data Set. In: DORAN, John W.; JONES, A. J. (orgs.). **SSSA Special Publications**. Madison, WI, USA: Soil Science Society of America, 1996. p. 25–37.

FAO. Conservation Agriculture | Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2022. Disponível em: <https://www.fao.org/conservation-agriculture/en/>. Acesso em: 1 maio 2022.

FIGUEIREDO, C. C.; RESCK, D. V. S.; CARNEIRO, M. A. C.; RAMOS, M. L. G.; SÁ, J. C. M. Stratification ratio of organic matter pools influenced by management systems in a weathered Oxisol from a tropical agro-ecoregion in Brazil. **Soil Research**, v. 51, n. 2, p. 133, 2013.

FUENTES-LLANILLO, R.; TELLES, T. S.; SOARES JUNIOR, D.; DE MELO, T. R.; FRIEDRICH, T.; KASSAM, A. Expansion of no-tillage practice in conservation agriculture in Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 208, p. 104877, 1 abr. 2021.

GIRARDELLO, V. C.; AMADO, T. J. C.; SANTI, A. L.; CHERUBIN, M. R.; KUNZ, J.; TEIXEIRA, T. de G. Resistência à penetração, eficiência de escarificadores mecânicos e produtividade da soja em Latossolo argiloso manejado sob plantio direto de longa duração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 1234–1244, ago. 2014.

GUIMARÃES, R. M. L.; TORMENA, C. A.; ALVES, S. J.; FIDALSKI, J.; BLAINSKI, É. Resistência tênsil, friabilidade e carbono orgânico em um latossolo vermelho distroférico sob integração lavoura-pacuíria. **Scientia Agricola**, v. 66, n. 4, p. 499–505, 2009.

GULDE, S.; CHUNG, H.; AMELUNG, W.; CHANG, C.; SIX, J. Soil Carbon Saturation Controls Labile and Stable Carbon Pool Dynamics. **Soil Science Society of America Journal**, v. 72, n. 3, p. 605–612, 2008.

IDR-PARANÁ. Agrometeorologia e Clima. 2024. **Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná**. Disponível em: <https://www.idrparana.pr.gov.br/Pagina/Agrometeorologia-e-Clima>. Acesso em: 11 jul. 2024.

ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. Soil quality indicator properties in mid-Atlantic soils as influenced by conservation management. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 55, n. 1, seç. Research, p. 69–78, 2000.

KANTOLA, I. B.; MASTERS, M. D.; DELUCIA, E. H. Soil particulate organic matter increases under perennial bioenergy crop agriculture. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 113, p. 184–191, 2017.

KOEPPEN. World Maps of Köppen-Geiger climate classification. 2022. Disponível em: <http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/>. Acesso em: 4 maio 2022.

LAL, R. Restoring Soil Quality to Mitigate Soil Degradation. **Sustainability**, v. 7, n. 5, p. 5875–5895, 2015.

LAVALLEE, J. M.; SOONG, J. L.; COTRUFO, M. F. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. **Global Change Biology**, v. 26, n. 1, p. 261–273, 2020.

LOCATELLI, J. L.; BRATTI, F.; RIBEIRO, R. H.; BESEN, M. R.; BRANCALEONI, E.; PIVA, J. T. Soil carbon sequestration and stocks: short-term impact of maize succession to cover crops in Southern Brazil Inceptisol. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 18, n. 3, p. e0304–e0304, 29 dez. 2020.

LOCATELLI, J. L.; SANTOS, R. S.; CHERUBIN, M. R.; CERRI, C. E. Changes in soil organic matter fractions induced by cropland and pasture expansion in Brazil's new agricultural frontier. **Geoderma Regional**, v. 28, p. e00474, 2022.

MOREIRA, S. G.; KIEHL, J. de C.; PROCHNOW, L. I.; PAULETTI, V.; MARTINETO, L.; RESENDE, Á. V. de. Soybean macronutrient availability and yield as affected by tillage system. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 42, 2020.

NASCENTE, A. S.; STONE, L. F.; CRUSCIOL, C. A. C. Soil chemical properties affected by cover crops under no-tillage system. **Revista Ceres**, v. 62, p. 401–409, 2015.

PAUSTIAN, K.; LEHMANN, J.; OGLE, S.; REAY, D.; ROBERTSON, G. P.; SMITH, P. Climate-smart soils. **Nature**, v. 532, n. 7597, p. 49–57, 2016.

PAVAN, M. A.; BLOCH, M. de F.; ZEMPULSKI, H. da C.; MIYAZAWA, M.; ZOCOLER, D. C. **Manual de análise química de solo e controle de qualidade**. Londrina: Iapar Londrina, 1992. v. 76.

PIVA, J. T.; BRATTI, F.; LOCATELLI, J. L.; RIBEIRO, R. H.; BESEN, M. R.; BRANCALEONI, E.; SCHMITT, D. E. Use of winter cover crops improves maize productivity under reduced nitrogen fertilization: a long-term study. **Bragantia**, v. 80, 2021.

PIVA, J. T.; DIECKOW, J.; BAYER, C.; PERGHER, M.; ALBURQUERQUE, M. A.; MORAES, A. de; PAULETTI, V. No-tillage and crop-livestock with silage production impact little on carbon and nitrogen in the short-term in a subtropical Ferralsol. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 15, n. 3, p. 1–7, 2020.

POSSAMAI, E. J.; CONCEIÇÃO, P. C.; AMADORI, C.; BARTZ, M. L. C.; RALISCH, R.; VICENSI, M.; MARX, E. F. Adoption of the no-tillage system in Paraná State: A (re)view. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 46, p. e0210104, 17 jan. 2022.

POTT, L. P.; AMADO, T. J. C.; LEAL, O. A.; CIAMPITTI, I. A. Mitigation of soil compaction for boosting crop productivity at varying yield environments in southern Brazil. **European Journal of Soil Science**, v. 71, n. 6, p. 1157–1172, 2020.

RAMOS, F. T.; DORES, E. F. de C.; WEBER, O. L. dos S.; BEBER, D. C.; CAMPELO JR, J. H.; MAIA, J. C. de S. Soil organic matter doubles the cation exchange capacity of tropical soil under no-till farming in Brazil. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 98, n. 9, p. 3595–3602, 2018.

RAMOS, M. L. G.; SILVA, V. G. da; CARVALHO, A. M. de; MALAQUIAS, J. V.; OLIVEIRA, A. D. de; SOUSA, T. R. de; SILVA, S. B. Carbon fractions in soil under no-tillage corn and cover crops in the Brazilian Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 55, 2020.

RAPHAEL, J. P. A.; CALONEGO, J. C.; MILORI, D. M. B. P.; ROSOLEM, C. A. Soil organic matter in crop rotations under no-till. **Soil and Tillage Research**, v. 155, p. 45–53, 2016.

RIBEIRO, P. H.; VARGAS MESQUITA DOS SANTOS, J. V.; MORRA COSER, S.; OLIVEIRA NOGUEIRA, N.; SILVA MARTINS, C. A. da. Adubação verde, os estoques de carbono e nitrogênio e a qualidade da matéria orgânica do solo. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 6, n. 1, seq. Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável, p. 6, 2011.

RIBEIRO, P. L.; BAMBERG, A. L.; REIS, D. A.; OLIVEIRA, A. C. B. de. Condições físico-hídricas de Planossolo cultivado com soja em plantio direto e preparo convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, p. 1484–1491, set. 2016.

RIBEIRO, R. H.; DIECKOW, J.; PIVA, J. T.; BRATTI, F. Roots and aboveground carbon and nitrogen inputs by black oats (*Avena strigosa* Schreb.) as affected by grazing and nitrogen in integrated crop-livestock system in subtropical Brazil. **Plant and Soil**, v. 451, n. 1, p. 447–458, 2020.

ROSCOE, R.; BUURMAN, P. Tillage effects on soil organic matter in density fractions of a Cerrado Oxisol. **Soil and Tillage Research**, v. 70, n. 2, p. 107–119, 1 abr. 2003.

SÁ, J. C. de M.; LAL, R. Stratification ratio of soil organic matter pools as an indicator of carbon sequestration in a tillage chronosequence on a Brazilian Oxisol. **Soil and Tillage Research**, v. 103, n. 1, p. 46–56, 1 abr. 2009.

SALTON, J. C.; HERNANI, L. C.; FONTES, C. Z. **Sistema plantio direto: o produtor pergunta, a Embrapa responde**. [S. l.]: Brasília, DF: Embrapa-SPI; Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 1998. Acesso em: 3 ago. 2022.

SANTOS, I. L. dos; CAIXETA, C. F.; SOUSA, A. A. T. C. de; FIGUEIREDO, C. C. de; RAMOS, M. L. G.; CARVALHO, A. M. de. Cover plants and mineral nitrogen: effects on organic matter fractions in an oxisol under no-tillage in the cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 1874–1881, dez. 2014.

SANTOS, N. Z. dos; DIECKOW, J.; BAYER, C.; MOLIN, R.; FAVARETTO, N.; PAULETTI, V.; PIVA, J. T. Forages, cover crops and related shoot and root additions in no-till rotations to C sequestration in a subtropical Ferralsol. **Soil and Tillage Research**, v. 111, n. 2, p. 208–218, 1 jan. 2011.

SAPKOTA, T. B.; MAZZONCINI, M.; BÀRBERI, P.; ANTICHI, D.; SILVESTRI, N. Fifteen years of no till increase soil organic matter, microbial biomass and arthropod diversity in cover crop-based arable cropping systems. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 32, n. 4, p. 853–863, 2012.

SISTI, C. P. J.; DOS SANTOS, H. P.; KOHHANN, R.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 76, n. 1, p. 39–58, mar. 2004.

SOUZA, G. P. de; FIGUEIREDO, C. C. de; SOUSA, D. M. G. de. Relationships between labile soil organic carbon fractions under different soil management systems. **Scientia Agricola**, v. 73, p. 535–542, dez. 2016.

SUNDERMEIER, A.; ISLAM, K.; RAUT, Y.; REEDER, R.; DICK, W. Continuous No-Till Impacts on Soil Biophysical Carbon Sequestration. **Soil Science Society of America Journal**, v. 75, n. 5, p. 1779–1788, 2011.

TEDESCO, M.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. Análise de solo, plantas e outros materiais. Porto Alegre: Departamento de Solos, UFRGS, 1995. 174p. **Boletim técnico**, v. 5, n. 2, p. 174, 1995.

TIECHER, T.; GUBIANI, E.; SANTANNA, M. A.; VELOSO, M. G.; CALEGARI, A.; CANALLI, L. B. dos S.; FINCKH, M. R.; CANER, L.; RHEINHEIMER, D. dos S. Effect

of 26-years of soil tillage systems and winter cover crops on C and N stocks in a Southern Brazilian Oxisol. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 44, 2020.

TIVET, F.; DE MORAES SÁ, J. C.; LAL, R.; BORSZOWSKI, P. R.; BRIEDIS, C.; DOS SANTOS, J. B.; SÁ, M. F. M.; DA CRUZ HARTMAN, D.; EURICH, G.; FARIAS, A.; BOUZINAC, S.; SÉGUY, L. Soil organic carbon fraction losses upon continuous plow-based tillage and its restoration by diverse biomass-C inputs under no-till in sub-tropical and tropical regions of Brazil. **Geoderma**, v. 209–210, p. 214–225, 1 nov. 2013.

VELOSO, M. G.; ANGERS, D. A.; TIECHER, T.; GIACOMINI, S.; DIECKOW, J.; BAYER, C. High carbon storage in a previously degraded subtropical soil under no-tillage with legume cover crops. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 268, p. 15–23, 2018.

VELOSO, M. G.; CECAGNO, D.; BAYER, C. Legume cover crops under no-tillage favor organomineral association in microaggregates and soil C accumulation. **Soil and Tillage Research**, v. 190, p. 139–146, 2019.

VON LÜTZOW, M.; KÖGEL-KNABNER, I.; LUDWIG, B.; MATZNER, E.; FLESSA, H.; EKSCHMITT, K.; GUGGENBERGER, G.; MARSCHNER, B.; KALBITZ, K. Stabilization mechanisms of organic matter in four temperate soils: Development and application of a conceptual model. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 171, n. 1, p. 111–124, fev. 2008.

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.

WOLSCHICK, N.; BARBOSA, F.; BERTOL, I.; FIORENTIN DOS SANTOS, K.; WERNER, R.; BAGIO, B. Cobertura do solo, produção de biomassa e acúmulo de nutrientes por plantas de cobertura. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 15, p. 134–143, 15 ago. 2016.

WULANNINGTYAS, H. S.; GONG, Y.; LI, P.; SAKAGAMI, N.; NISHIWAKI, J.; KOMATSUZAKI, M. A cover crop and no-tillage system for enhancing soil health by increasing soil organic matter in soybean cultivation. **Soil and Tillage Research**, v. 205, p. 104749, jan. 2021.

XIAO, L.; ZHOU, S.; ZHAO, R.; GREENWOOD, P.; KUHN, N. J. Evaluating soil organic carbon stock changes induced by no-tillage based on fixed depth and equivalent soil mass approaches. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 300, p. 106982, set. 2020.

APENDICE A – ANOVA: MS, componentes de rendimento e produtividade da soja

Quadrados médios e graus de liberdade (GL) do experimento bi fatorial 3x3 (sistemas de cultivo x plantas de cobertura) em parcelas subdivididas, com o fator A (sistemas de cultivo) na parcela e o fator D (Plantas de cobertura) na subparcela, no delineamento de blocos ao acaso com três repetições, sobre as variáveis Matéria Seca – MS (Kg ha⁻¹) das plantas de cobertura; Produtividade PROD (Kg ha⁻¹), Peso de mil grãos – PMG (g), Vagens por planta – VP e Grãos por Vagem GV, referentes à cultura da soja. Pato Branco, 2024.

Causas de Variação	GL	Variáveis						
		MS-22	MS-23	MS-ACUM	PROD	PMG	VP	GV
Blocos	2	0,00	0,00	0,00	1440593,44	144,44	130,28	0,08
Sistemas de cultivo-A	2	0,00 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,00 ^{ns}	897780,33*	33,33 ^{ns}	6,74 ^{ns}	0,01 ^{ns}
Erro A	4	0,00	0,00	0,00	115036,78	48,61	61,97	0,00
Plantas de cobertura-D	2	0,00*	0,00 ^{ns}	0,00*	69536,44 ^{ns}	8,33 ^{ns}	39,68 ^{ns}	0,00 ^{ns}
Interação AxD	4	0,00 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,00 ^{ns}	40741,94 ^{ns}	50,00 ^{ns}	25,70 ^{ns}	0,01 ^{ns}
Erro D	12	0,00	0,00	0,00	241784,28	36,11	71,46	0,00
Média Geral		4776,30	4237,04	9013,33	3391,56	151,67	55,73	2,38
CV ¹ parcela (%)		49,37	21,93	59,29	10,00	4,60	14,13	2,46
CV Subparcela (%)		40,76	25,14	67,39	14,50	3,96	15,17	1,92

*Significativo à nível de 5% de probabilidade de erro. ^{ns} Não significativo à nível de 5% de probabilidade de erro. ¹CV: Coeficiente de Variação. Fonte: Autoria Própria

APENDICE B – ANOVA concentração de COT e COP

Quadrados médios e graus de liberdade (GL) do experimento bi fatorial 3x3 (sistemas de cultivo x plantas de cobertura) em parcelas subdivididas, com o fator A (sistemas de cultivo) na parcela e o fator D (Plantas de cobertura) na subparcela, no delineamento de blocos ao acaso com três repetições, sobre a concentração de COP (g kg⁻¹) e COT (g kg⁻¹) ambos nas profundidades 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-45, 45-60, 60-80 e 80-100 cm. Pato Branco, 2024.

Causas de Variação	GL	COP							
		0-5	5-10	10-20	20-30	30-45	45-60	60-80	0-100
Blocos	2	1,96	0,54	0,96	0,02	0,01	0,09	0,05	0,01
Sistemas de cultivo-A	2	53,90*	0,74 ^{ns}	1,19 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,02 ^{ns}
Erro A	4	0,23	0,33	0,30	0,02	0,00	0,03	0,01	0,01
Plantas de cobertura-D	2	2,37*	0,83*	0,09 ^{ns}	0,00 ^{ns}				
Interação AxD	4	6,08*	0,18 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,02 ^{ns}	0,00 ^{ns}
Erro D	12	0,60	0,15	0,18	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01
Média Geral		6,06	2,29	1,59	1,05	0,63	0,48	0,41	0,32
CV ¹ parcela (%)		7,95	25,12	34,56	46,46	23,38	34,53	19,12	22,13
CV Subparcela (%)		12,84	16,61	26,91	19,27	25,37	23,15	24,78	31,61

Causas de Variação	GL	COT							
		0-5	5-10	10-20	20-30	30-45	45-60	60-80	80-100
Blocos	2	0,83	0,00	13,94	15,99	0,00	7,31	6,88	0,00
Sistemas de cultivo-A	2	128,93 ^{ns}	0,00 ^{ns}	29,85 ^{ns}	3,51 ^{ns}	0,00 ^{ns}	7,84 ^{ns}	10,56 ^{ns}	0,00 ^{ns}
Erro A	4	19,798	0,00	8,99	22,94	0,00	12,07	4,48	0,00
Plantas de cobertura-D	2	9,01 ^{ns}	0,00 ^{ns}	17,79 ^{ns}	28,75*	0,00 ^{ns}	6,18 ^{ns}	4,29 ^{ns}	0,00 ^{ns}
Interação AxD	4	5,88 ^{ns}	0,00 ^{ns}	6,02 ^{ns}	4,79 ^{ns}	0,00 ^{ns}	4,26 ^{ns}	2,97 ^{ns}	0,00 ^{ns}
Erro D	12	18,02	0,00	7,03	5,11	0,00	3,66	4,29	0,00
Média Geral		32,32	26,52	23,78	20,95	17,46	16,38	14,60	12,41
CV parcela (%)		13,77	12,86	12,61	22,86	22,23	21,21	14,49	17,32
CV Subparcela (%)		13,14	8,86	11,15	10,79	12,30	11,68	14,18	15,43

*Significativo à nível de 5% de probabilidade de erro. ^{ns} Não significativo à nível de 5% de probabilidade de erro. ¹CV: Coeficiente de Variação. Fonte: Autoria Própria

APENDICE C – ANOVA estoque de COT, COP e COAM

Quadrados médios e graus de liberdade (GL) do experimento bi fatorial 3x3 (sistemas de cultivo x plantas de cobertura) em parcelas subdivididas, com o fator A (sistemas de cultivo) na parcela e o fator D (Plantas de cobertura) na subparcela, no delineamento de blocos ao acaso com três repetições, sobre o estoque de COT (Mg ha⁻¹), estoque de COP (Mg ha⁻¹) e estoque de COAM (Mg ha⁻¹) nas profundidades 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-45, 45-60, 60-80 e 80-100 cm. Pato Branco, 2024.

Causas de Variação	GL	COT							
		0-5	5-10	10-20	20-30	30-45	45-60	60-80	80-100
Blocos	2	20,45	0,01	5,54	7,57	0,00	17,69	14,27	6,021
Sistemas de cultivo-A	2	0,07 ^{ns}	0,02 ^{ns}	40,65*	13,56 ^{ns}	0,00 ^{ns}	9,61 ^{ns}	18,60 ^{ns}	6,084 ^{ns}
Erro A	4	1,24	0,00	4,44	21,34	0,00	17,43	10,80	13,082
Plantas de cobertura-D	2	5,34 ^{ns}	0,00 ^{ns}	34,74*	23,41*	0,00 ^{ns}	25,98 ^{ns}	8,92 ^{ns}	10,224 ^{ns}
Interação AxD	4	1,86 ^{ns}	0,00 ^{ns}	13,55 ^{ns}	3,15 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,74 ^{ns}	2,75 ^{ns}	5,199 ^{ns}
Erro D	12	3,08	0,00	8,63	5,29	0,00	167,17	5,57	11,10
Média Geral		11,49	13,08	23,89	19,52	17,95	17,40	17,88	15,37
CV ¹ parcela (%)		9,68	5,64	8,82	23,67	54,81	24,00	18,39	23,53
CV Subparcela (%)		15,28	4,81	12,30	11,78	29,24	21,45	13,20	21,68

Causas de Variação	GL	COP							
		0-5	5-10	10-20	20-30	30-45	45-60	60-80	80-100
Blocos	2	1,04	0,08	0,19	0,09	0,01	24,59	0,01	11,45
Sistemas de cultivo-A	2	2,58*	0,16 ^{ns}	0,29 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,03 ^{ns}	4,12 ^{ns}	0,01 ^{ns}	20,38 ^{ns}
Erro A	4	0,07	0,06	0,08	0,10	0,01	9,95	0,01	8,05
Plantas de cobertura-D	2	0,24 ^{ns}	0,11 ^{ns}	0,10 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,01 ^{ns}	7,59 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,69 ^{ns}
Interação AxD	4	0,22 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,02 ^{ns}	0,02 ^{ns}	2,09 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,30 ^{ns}
Erro D	12	0,08	0,03	0,05	0,04	0,02	7,65	0,00	198,96
Média Geral		1,87	1,05	0,78	0,49	0,24	0,18	0,13	0,11
CV parcela (%)		14,01	23,35	35,31	63,54	19,42	46,94	15,26	25,72
CV Subparcela (%)		14,69	17,22	29,37	40,63	20,94	41,15	10,12	36,91

Causas de Variação	GL	COAM							
		0-5	5-10	10-20	20-30	30-45	45-60	60-80	80-100
Blocos	2	12,61	0,01	6,77	6,30	0,00	17,41	14,30	53,53
Sistemas de cultivo-A	2	2,76 ^{ns}	0,02 ^{ns}	36,46*	13,74 ^{ns}	0,00 ^{ns}	10,25 ^{ns}	18,88 ^{ns}	6,08 ^{ns}
Erro A	4	1,34	0,01	4,84	21,75	0,00	17,37	10,97	13,48
Plantas de cobertura-D	2	3,31 ^{ns}	0,00 ^{ns}	31,19*	21,55*	0,00 ^{ns}	24,84 ^{ns}	8,59 ^{ns}	9,96 ^{ns}
Interação AxD	4	2,04 ^{ns}	0,00 ^{ns}	14,44 ^{ns}	3,21 ^{ns}	0,00 ^{ns}	10,24 ^{ns}	2,87 ^{ns}	5,17 ^{ns}
Erro D	12	2,98	0,00	7,70	4,94	0,00	13,38	5,68	11,03
Média Geral		9,62	12,03	23,12	19,03	17,71	17,22	17,74	15,26
CV parcela (%)		12,02	6,60	9,52	24,50	54,92	24,21	18,66	24,06
CV Subparcela (%)		17,93	5,01	12,01	11,68	29,06	21,25	13,43	21,77

*Significativo à nível de 5% de probabilidade de erro. ^{ns} Não significativo à nível de 5% de probabilidade de erro. ¹CV: Coeficiente de Variação. Fonte: Autoria Própria

APENDICE D – ANOVA: estoques acumulados de COT, COP e COAM

Quadrados médios e graus de liberdade (GL) do experimento bi fatorial 3x3 (sistemas de cultivo x plantas de cobertura) em parcelas subdivididas, com o fator A (sistemas de cultivo) na parcela e o fator D (Plantas de cobertura) na subparcela, no delineamento de blocos ao acaso com três repetições, sobre o estoque de COT (Mg ha⁻¹), COP (Mg ha⁻¹) e COAM (Mg ha⁻¹) nas profundidades 0-30 cm e 0-100 cm. Pato Branco, 2024.

Causas de Variação	GL	COT		COP		COAM	
		0-30	0-100	0-30	0-100	0-30	0-100
Blocos	2	14,17	0,00	0,01	0,01	6,40	0,00
Sistemas de cultivo-A	2	176,17 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,00 ^{ns}	186,68 ^{ns}	0,00 ^{ns}
Erro A	4	62,264	0,00	0,00	0,00	68,42	0,00
Plantas de cobertura-D	2	171,58*	0,00*	0,00 ^{ns}	0,00 ^{ns}	158,85*	0,00*
Interação AxD	4	13,11 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,00 ^{ns}	19,78 ^{ns}	0,00 ^{ns}
Erro D	12	22,02	0,00	0,00	0,00	20,45	0,00
Média Geral		67,98	136,58	4,19	4,86	63,79	131,72
CV ¹ parcela (%)		11,61	30,26	24,48	27,30	12,97	15,83
CV Subparcela (%)		6,90	12,85	12,98	14,29	7,09	6,31

*Significativo à nível de 5% de probabilidade de erro. ^{ns} Não significativo à nível de 5% de probabilidade de erro. ¹CV: Coeficiente de Variação. Fonte: Autoria Própria