

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

LUCIANO BORGES KRAEMER

**DESCOMPACTAÇÃO E CORREÇÃO DA ACIDEZ DO SOLO SUBSUPERFICIAL
EM SISTEMA DE PLANTIO DIRETO**

DOIS VIZINHOS

2022

LUCIANO BORGES KRAEMER

**DESCOMPACTAÇÃO E CORREÇÃO DA ACIDEZ DO SOLO SUBSUPERFICIAL
EM SISTEMA DE PLANTIO DIRETO**

Decompaction and Correction of subsurface soil acidity in no-till system

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Programa de Pós-graduação em Agronomia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador(a): Prof. Dr. Paulo Cesar Conceição
Coorientador(a): Prof. Dr. Laércio Ricardo Sartor

DOIS VIZINHOS

2022



[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



LUCIANO BORGES KRAEMER

DESCOMPACTAÇÃO E CORREÇÃO DA ACIDEZ DO SOLO SUBSUPERFICIAL EM SISTEMA PLANTIO DIRETO

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: 04 de Agosto de 2022

Paulo Cesar Conceicao, - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Carlos Alberto Casali, - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Vitor Cauduro Girardello, Doutorado - Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões (Uri)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 21/08/2022.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Espiritualidade presente em minha vida e à minha esposa Prof^a Dr^a. Márcia Adriana Dias Kraemer, pelo incentivo ao meu estudo continuado e apoio irrestrito em todas as minhas ações.

Agradeço ao meu orientador, Prof.^o Dr.^o Paulo César Conceição pelo aceite em ser seu aluno e ao meu coorientador Prof.^o Dr.^o Laércio Ricardo Sartor, pelo incentivo à pesquisa.

A todos os colegas do meu Grupo de Pesquisa em Ciência do Solo (GPCS), que não mediram esforços para me ajudarem na instalação e no desenvolvimento do experimento. Em especial à Me. Maiara Karine Haskel, representando as colegas e o Me. Cidimar Cassol representando os colegas.

À secretaria do curso, por sanar minhas dúvidas acadêmicas.

Ao Laboratório de Análises de Solo da UTFPR de Pato Branco, pela emissão dos laudos de análises de solo.

Enfim, a todos que de uma forma ou de outra contribuíram para a realização desse trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio para a realização do presente estudo. À Fundação Araucária pelo apoio financeiro mediante Termo de Cooperação TC 073/2017.

“A rentabilidade é proporcional ao conhecimento aplicado por planta, em todo o metro quadrado, que resulta em Kg ou R\$ por hectare”
(Dirceu Gassen)

“Nenhuma tecnologia é capaz de fazer a planta extrair do solo o que ele não tiver”
(Rattan Lal)

RESUMO

O Sistema de Plantio Direto (SPD) trouxe inúmeros benefícios à agricultura, elevando o patamar de produtividade das culturas. No entanto, ao longo dos anos, com a perda de alguns conceitos aplicados à prática do sistema de manejo dos solos e o aumento do trânsito de máquinas cada vez mais pesadas na lavoura, houve a compactação do solo em subsuperfície, principalmente em solos argilosos. Além disso, devido ao não revolvimento do solo, a eficiência da aplicação dos corretivos agrícolas, ficou limitada às camadas superficiais. O objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência da descompactadora e fertilizadora *Fertillus 700* para a melhoria química e física do solo na camada subsuperficial de um Latossolo Vermelho e de seus efeitos no enraizamento profundo no Sistema de Plantio Direto. O trabalho foi conduzido na Área Experimental da Universidade Federal do Paraná (UTFPR), Campus Dois Vizinhos, implantado em Agosto de 2020. O delineamento utilizado foi de blocos ao acaso com parcelas de 5,6 m x 20 m que receberam cinco tratamentos e quatro repetições cada. Toda a área foi manejada sob sistema de plantio direto consolidado e a cobertura verde de aveia preta (*Avena strigosa*). Na sequência plantou-se soja-feijão-aveia preta-soja. Os tratamentos foram constituídos por T0: testemunha; T1: somente subsolagem; T2: subsolagem corretiva no perfil de 0,30-0,40 m com $\text{Ca}(\text{OH})_2$; T3: aplicação do corretivo $\text{Ca}(\text{OH})_2$ somente em superfície; T4: subsolagem corretiva no perfil de 0,15-0,30 m com $\text{Ca}(\text{OH})_2$. O corretivo utilizado foi o hidróxido de cálcio (7000i – 70% CaO) na forma de pó fino e seco, com PRNT de 135%. A dosagem utilizada foi 1 Mg ha^{-1} para os tratamentos em superfície e subsuperfície. Foram avaliadas ao longo do perfil das hastas sulcadoras, as diferentes camadas de 0,00-0,05 m; 0,05-0,10 m; 0,10-0,20 m; 0,20-0,30 m e 0,30-0,40 m, os atributos físicos (RP, densidade, macroporosidade, microporosidade, porosidade total), e atributos químicos (pH, MO, V%, H+Al, Al^{+3} , m%, Ca^{+2} , Mg^{+2} , P, K^+). Após 12 meses à intervenção mecânica nos tratamentos de subsolagem, as leituras de RP ficaram abaixo de 2 MPa, sendo que este critério não era fator limitante ao desenvolvimento das culturas utilizadas no sistema de manejo. Apesar de haver melhoria nas condições físicas do solo com relação a Ma, Mi, PT e Ds do solo, 14 meses após a intervenção mecânica, essas variáveis não refletiram significativamente para MS de aveia preta, produtividade do feijão, e soja safra segundo ano entre os tratamentos. A produtividade da soja no primeiro ano de avaliação, apresentou significância no tratamento em que houve a subsolagem corretiva na profundidade de 0,15 a 0,30 m do solo em relação à testemunha.

Palavras-chave: Compactação do solo; subsolagem corretiva; subsuperfície; hidróxido de cálcio.

ABSTRACT

The No-Tillage System has brought numberless benefits to agriculture, increasing the level of crop productivity as from its implementation. However, throughout the years, the loss of some of the concepts applied in the practice of soil management system, and the increase in the traffic of heavier and heavier machinery in the field, have caused a subsurface soil compaction, especially in clayey soils. Furthermore, due to the non-revolving of the soil, the efficiency of the application of chemical soil amendments was limited to the superficial layers. The aim of this study was to evaluate the efficiency of the soil decompressor and fertilizer *Fertillus 700* in the chemical and physical improvement of the soil in the subsurface of a Red Latosol and its effects in the deep rooting in the no-tillage system. The survey was carried out in the Experimental Area of the Federal University of Paraná (UTFPR), Dois Vizinhos Campus. The demarcation used was one of randomized blocks of 5.6 m x 20 m which received 5 treatments and 4 repetitions each, the entire area was managed under consolidated no-tillage system and the green cover of Black Oats (*Avena strigosa*). Soybeans-beans-black oat-soybeans were planted in sequence. The treatments consisted of T0: witness, T1: only subsoiling, T2: Amendment Subsoiling in 30 to 40-cm profile with Ca(OH)₂, T3: Ca(OH)₂ Amendment Application on surface, T4: Ca(OH)₂ Amendment Subsoiling in 0,15 to 0,30 m profile. The product used was Calcium Hydroxide (7000i – 70% CaO) in the form of a 135%-PRNT dry fine powder. The dosage used was 1 mg ha⁻¹ for the surface and subsurface treatments. Along the profile of the furrow stems, the different layers of 0,00-0,05 m; 0,05-0,10 m; 0,10-0,20 m; 0,20-0,30 m and 0,30-0,40 m. were evaluated as well as the physical attributes (RP, density, macroporosity, microporosity, total porosity), and the chemical attributes (pH, MO, V%, H+Al, Al⁺³, m%, Ca⁺², Mg⁺², P, K⁺). After 12 months of mechanical intervention in the subsoiling treatments, the RP readings were below 2 MPa, and this criterion was not a limiting factor for the development of the crops used in the management system. Although there was an improvement in the physical conditions of the soil in relation to Ma, Mi, PT and Ds of the soil, 14 months after the mechanical intervention, these variables did not significantly reflect for MS of black oat, bean yield, and soybean crop second year between the treatments. Soybean productivity in the first year of evaluation showed significance in the treatment in which there was corrective subsoiling at a depth of 0.15 to 0.30 m from the soil in relation to the control.

Keywords: Soil compaction; amendment; subsoiling; subsurface; calcium hydroxide.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Localização do experimento.....	25
Figura 2 – Temperatura e precipitação média em Dois Vizinhos entre os meses de maio de 2020 e abril de 2022.....	26
Fotografia 1 - Descompactadora e Fertilizadora Fertillus 700.....	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Graus de liberdade (G.L.) e quadrado médio (Q.M.) para as variáveis resistência a penetração final (RP), umidade final (UF), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), porosidade total (PT) e densidade do solo (Ds) após a aplicação dos tratamentos.	33
Tabela 2 - Resistência a penetração (MPa) do solo submetido a tratamentos de subsolagem para as quatro profundidades de 0 a 40 centímetros de solo nos quatro blocos (Bl)	33
Tabela 3 - Resistência a penetração (MPa) do solo submetido a tratamentos de subsolagem e aplicação de hidróxido de cálcio em superfície para as quatro profundidades de 0 a 40 centímetros de solo.....	33
Tabela 4 – Umidade inicial (UI, %), macroporosidade (Ma, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), microporosidade (Mi, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), porosidade total (PT, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) e densidade do solo (Ds, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) na caracterização inicial do solo.....	35
Tabela 5 - Umidade final (UF, %), macroporosidade (Ma, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), microporosidade (Mi, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), porosidade total (PT, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) e densidade do solo (Ds, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) após a execução dos tratamentos (14 meses).....	36
Tabela 6 - Graus de liberdade (G.L.) e quadrado médio (Q.M.) para as variáveis matéria orgânica do solo (MOS), fósforo (P), potássio (K), potencial hidrogênionico (pH), acidez do solo (SMP), acidez potencial ou total, (H+Al), cálcio (Ca^{+2}), magnésio (Mg^{+2}), soma de bases (SB) e saturação de base (V%) do solo no primeiro ano de avaliação na entre linha.	38
Tabela 7 - Matéria orgânica (MO, g dm^{-3}), fósforo (P, mg dm^{-3}), potássio (K^+ , mg dm^{-3}), potencial hidrogênionico (pH), acidez do solo (SMP), acidez potencial ou total, (H+Al), cálcio (Ca^{+2} , $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), magnésio (Mg^{+2} , $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), soma de bases (SB, $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) e saturação de base (V, %) do solo no primeiro ano de avaliação na entre linha em relação a profundidade e aos tratamentos avaliados.....	39
Tabela 8 - Graus de liberdade (G.L.) e quadrado médio (Q.M.) para as variáveis matéria orgânica do solo (MOS), fósforo (P), potássio (K^+), potencial hidrogênionico (pH), acidez do solo (SMP), acidez potencial ou total, (H+Al), cálcio (Ca^{+2}), magnésio (Mg^{+2}), soma de bases (SB) e saturação de base (V%) do solo no primeiro ano de avaliação na linha.....	43
Tabela 9 - Matéria orgânica (MO, g dm^{-3}), fósforo (P, mg dm^{-3}), potássio (K, mg dm^{-3}), potencial hidrogênionico (pH), acidez do solo (SMP), acidez potencial ou total, (H+Al, $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), cálcio (Ca^{+2} , $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), magnésio (Mg^{+2} , $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), soma de bases (SB, $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) e saturação de base (V, %) do solo no primeiro ano de avaliação na linha em relação aos tratamentos avaliados	43
Tabela 10 - Matéria orgânica (MO, g dm^{-3}), fósforo (P, mg dm^{-3}), potássio (K^+ , mg dm^{-3}), potencial hidrogênionico (pH), acidez do solo (SMP), acidez potencial ou total, (H+Al, $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), cálcio (Ca^{+2} , $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), magnésio (Mg^{+2} , $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), soma de bases (SB, $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) e saturação de base (V, %) do solo no primeiro ano de avaliação na linha da passagem das hastas sulcadoras em relação a profundidade de avaliação	44

Tabela 11 - Graus de liberdade (G.L.) e quadrado médio (Q.M.) para as variáveis matéria orgânica do solo (MOS), fósforo (P), potássio (K ⁺), potencial hidrogênionico (pH), acidez do solo (SMP), acidez potencial ou total, (H+Al), cálcio (Ca ⁺²), magnésio (Mg ⁺²), soma de bases (SB) e saturação de base (V%) do solo no segundo ano ...	45
Tabela 12 - Matéria orgânica (MO, g dm ⁻³), fósforo (P, mg dm ⁻³), potássio (K ⁺ , mg dm ⁻³), potencial hidrogênionico (pH), acidez do solo (SMP), acidez potencial ou total, (H+Al, cmol _c dm ⁻³), cálcio (Ca ⁺² , cmol _c dm ⁻³), magnésio (Mg ⁺² , cmol _c dm ⁻³), soma de bases (SB, cmol _c dm ⁻³) e saturação de base (V, %) do solo no segundo ano de avaliação em relação a profundidade de avaliação.....	46
Tabela 13 - Matéria orgânica do solo (MOS, g dm ⁻³), fósforo (P, mg dm ⁻³), potássio (K ⁺ , mg dm ⁻³), potencial hidrogênionico (pH), acidez do solo (SMP), acidez potencial ou total, (H+Al, cmol _c dm ⁻³), cálcio (Ca ⁺² , cmol _c dm ⁻³), magnésio (Mg ⁺² , cmol _c dm ⁻³), soma de bases (SB, cmol _c dm ⁻³) e saturação de base (V, %) do solo no segundo ano de avaliação em relação aos tratamento adotados	47
Tabela 14 - Graus de liberdade (G.L.) e quadrado médio (Q.M.) para a variável massa seca da aveia (Mg ha ⁻¹) após a aplicação dos tratamentos de subsolagem e aplicação de hidróxido de cálcio em superfície (2021).	48
Tabela 15 - Massa seca da aveia (Mg ha ⁻¹) após a aplicação dos tratamentos (14 meses após).....	49
Tabela 16 - Graus de liberdade (G.L.) e quadrado médio (Q.M.) para as variáveis massa de mil grãos de feijão (g) e produtividade (Mg ha ⁻¹) do feijão em 2021.	50
Tabela 17 - Massa de mil grãos de feijão (MMG, g) e produtividade (Prod., Mg ha ⁻¹) do feijão após a aplicação dos tratamentos de subsolagem e aplicação de cálcio em superfície (2021).....	50
Tabela 18 - Graus de liberdade (G.L.) e quadrado médio (Q.M.) para as variáveis altura da planta (AP, cm), número de ramificações, número de vagens por planta (NV/P), número de grãos por planta (NG/P), número de grãos por vagem (NG/V) e número de plantas por hectare (Pla ha ⁻¹) de soja no ano I (2021).	51
Tabela 19 - Graus de liberdade (G.L.) e quadrado médio (Q.M.) para a variáveis massa fresca (MF, g), massa seca (MS, g) e massa seca da planta inteira (MSPI, g) no ano II (2022).....	51
Tabela 20 - Graus de liberdade (G.L.) e quadrado médio (Q.M.) para as variáveis produtividade e massa de mil grãos de soja em duas safras (Ano I – 2021 e Ano II – 2022).	51
Tabela 21 – Massa fresca (MF, g), massa seca (MS, g), massa seca de planta inteira (MSPI, g) e massa de mil grãos (MMG, g) da soja após a aplicação dos tratamentos de subsolagem e aplicação de hidróxido de cálcio em superfície no primeiro ano (Ano I - 2021).....	52
Tabela 22 – Altura da planta (AP, cm), número de ramificações, número de vagens por planta (NV/P), número de grãos por planta (NG/P), número de grãos por vagem (NG/V), massa de mil grãos (g) e número de plantas por hectare (Pla ha ⁻¹) de soja após a aplicação dos tratamentos de subsolagem e aplicação de cálcio em superfície no primeiro ano de cultivo	52
Tabela 23 – Produtividade (Prod., Mg ha ⁻¹) e massa de mil grãos (MMG, g) de soja em duas safras (Ano I – 2021 e Ano II – 2022).....	53

LISTA DE ABREVIATURAS, SIMBOLOS E SIGLAS

Al ³⁺	Alumínio
Ca ²⁺	Cálcio
CaO	Óxido de cálcio
Mg ²⁺	Magnésio
Ca(OH) ₂	Hidróxido de cálcio
Fe ²⁺	Ferro
K ⁺	Potássio
m%	Saturação por alumínio
Mn ⁴⁺	Manganês
P	Fósforo
MO	Matéria orgânica
pH	Potencial hidrogeniônico
H+Al	Hidrogênio + Alumínio
SB	Soma de bases
V%	Saturação de bases
ANANDA	Associação Nacional para a Difusão de Adubos
CC	Capacidade de campo
Ds	Densidade
FEBRAPDP	Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha
MMG	Massa de mil grãos
Ma	Macroporosidade
Mi	Microporosidade
Mpa	Mega Pascal
PD	Plantio Direto
PN	Poder de neutralização total
PRNT	Poder relativo de neutralização total
PT	Porosidade total
RE	Reatividade
RP	Resistência à penetração
SPD	Sistema de Plantio Direto
CESB	Comitê estratégico soja Brasil
C/N	Carbono/Nitrogênio
MOS	Matéria orgânica do solo
GL	Graus de liberdade
QM	Quadrado médio
UF	Umidade final
AP	Altura de plantas
MF	Massa fresca
MS	Massa seca
MSPI	Massa seca de planta inteira
NV	Número de vagens
NG	Número de grãos
PL	Planta
NR	Número de ramificações
Prod	Produtividade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
3	MATERIAL E MÉTODOS	25
3.1	Área experimental	25
3.2	Delineamento experimental e tratamentos	26
3.3	Descompactadora e Fertilizadora	27
3.3.1	Características do produto utilizado com o equipamento	28
3.4	Determinações e metodologia.....	28
3.4.1	Amostragens de solo.....	28
3.4.2	Determinação da resistência à penetração do solo.....	28
3.4.3	Determinação da Ds do solo	29
3.4.4	Determinação da PT, Ma e Mi do solo	29
3.4.5	Cultivo e determinação da massa seca da aveia	30
3.4.6	Cultivo e determinação da produtividade da soja.....	31
3.4.7	Cultivo e determinação da produtividade do feijão.....	31
3.5	Análise de dados.....	32
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
4.1	Estrutura do solo.....	33
4.1.1	Atributos químicos do solo no ano I de avaliação – entre linha A	38
4.1.2	Atributos químicos do solo no ano I de avaliação – na linha B.....	43
4.1.3	Atributos químicos do solo no ano II de avaliação.....	45
4.2	Produtividade de massa seca da aveia	48
4.3	Produtividade do feijão.....	49
4.4	Produtividade da soja	50
5	CONCLUSÕES	55
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	56
	REFERÊNCIAS.....	57
	APÊNDICE A - Subsolagem corretiva.....	61
	APÊNDICE B - Aplicação do corretivo em superfície	63
	APÊNDICE C - Resistência à penetração	65
	APÊNDICE D - Retirada de amostras do solo	67
	APÊNDICE E - Cronograma do experimento	69

1 INTRODUÇÃO

O Sistema de Plantio Direto no mundo são mais de 110 milhões de hectares e no Brasil mais de 30 milhões de hectares, segundo a Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha (FEBRAPDP, 2022). Sua implantação trouxe inúmeros benefícios à agricultura, elevando o patamar de produtividade das culturas, e tornado o ambiente muito mais sustentável. Nasceu sob três pilares: O não revolvimento da terra, a cobertura permanente do solo e o sistema de rotação de culturas (FEBRAPDP, 2022).

Entretanto ao longo dos anos, perdeu-se alguns conceitos aplicados à prática do sistema, originando falta de palhada na superfície e um sistema compactado, causado pelo aumento do trânsito de máquinas cada vez mais pesadas na lavoura, em desacordo com a umidade no solo; uma redução das áreas de cereais nos sistema de produção como milho no verão e aveia no inverno; um sistema de sucessão de culturas focado em extração de grãos, e despreocupado com a manutenção da cobertura verde; e uso indiscriminado de grade niveladora, contribuindo para a degradação da matéria orgânica do solo (MOS) e aumento da compactação em subsuperfície (FLOSS, 2022).

Pela origem da formação rochosa dos nossos solos tropicais, que sofreram a intemperização ao longo dos anos, a grande maioria dos solos brasileiros possuem óxidos de ferro e alumínio, acidez e baixo nível de nutrientes, necessitando de correção e manutenção desse ambiente para uma agricultura mais sustentável e produtiva (EMBRAPA, 2022).

Com a presença de um impedimento físico entre 0,10 e 0,20 m e uma barreira química com a presença de alumínio tóxico, em subsuperfície, nessa condição, há dificuldade de aprofundamento das raízes das plantas cultivadas, limitando acesso à água e nutrientes, havendo um ambiente mais favorável na superfície para um maior desenvolvimento radicular, limitando o potencial genético das culturas (AMADO, *et al.* 2015).

Conforme informações do Desafio Nacional de Máxima Produtividade, promovido pelo CESB (2014/2015), constatou-se nas áreas dos participantes onde a produtividade passou dos 90 sc ha⁻¹ (5.400 kg ha⁻¹), foi observado na profundidade de 0,40 a 1 m, uma saturação de bases acima de 30% e uma participação de cálcio acima de 20% na CTC efetiva. O Ca⁺² é importante para o crescimento radicular da soja em grandes profundidades e isto tem relação decisiva na tolerância a estresses hídricos.

Foi constatado valores acima de 8 mmol de $\text{Ca}^{+2} \text{ dm}^{-3}$, e resistência ao solo avaliados em capacidade de campo se mostrou no máximo 1,5 MPa (SAKO, *et al.* 2015).

O presente estudo visa validar cientificamente uma proposta de equipamento inovador, denominado Fertillus 700 da empresa JAN Implementos Agrícolas S/A, com o objetivo de romper a barreira física da compactação do solo, bem como injetar uma fonte corretiva e nutricional de cálcio ao longo do perfil do solo, através de hastes sulcadoras, atingindo de 0,00 à 0,40 m de profundidade, com o intuito de criar um caminho para as raízes livre de compactação e acidez de alumínio, facilitando a penetração e desenvolvimento do sistema radicular das culturas, buscando o acesso à água disponível em subsuperfície, contribuindo à expressão máxima do potencial genético para o aumento da produtividade.

Em que medida a descompactadora e fertilizadora Fertillus 700 é eficiente para a melhoria física e química do solo na camada subsuperficial de um Latossolo Vermelho, com efeitos no enraizamento profundo no sistema de plantio direto sob plantas de cobertura de aveia preta?

Acredita-se que a combinação de estratégia física (subsolagem) e química (fonte corretiva e nutricional de cálcio) melhoram as condições subsuperficiais do solo para o aprofundamento de raízes da soja e culturas subsequentes, com efeito duradouro e reflectivo na produtividade.

O objetivo foi avaliar a eficiência da descompactadora e fertilizadora Fertillus 700 para a melhoria física e química do solo na camada subsuperficial de um Latossolo Vermelho e de seus efeitos no enraizamento profundo no sistema de plantio direto sob plantas de cobertura de Aveia preta (*Avena strigosa*), de soja (*Glycine max* L.) e do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

No mundo hoje, são mais de 110 milhões de hectares sob o Sistema de Plantio Direto (SPD), sendo que mais de 35 milhões manejados em solos brasileiros (FEBRAPDP, 2022). O SPD foi fundado sob três pilares: plantio na palha com mínimo revolvimento de solo, manutenção da cobertura permanente e um planejamento de rotação de culturas.

De acordo com o histórico da Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha, essa técnica surgiu na região Sul, a partir dos anos 70, devido à problemática de um processo erosivo em grande escala, ocasionado pelas chuvas (principalmente na primavera e no verão), sobre o solo desnudo, preparado no sistema de cultivo mínimo. Assim, precisou-se buscar alternativa de sistema de produção, para combater a erosão, que estava ocasionando arrastamento do solo, e perda da fertilidade na camada superficial.

No Brasil entre 2006 e 2017 houve um incremento de mais de 50% na área de plantio direto. Com a expansão da área agrícola para as regiões do Mato Grosso, e principalmente a região conhecida por MATOPIBA (Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia), no sistema de cultivo das culturas de soja, milho e algodão, houve a necessidade de implantar um sistema na defesa da conservação do solo. No entanto, o sistema não tem sido manejado de acordo com os conceitos iniciais da época de implantação dessa tecnologia.

Dentre os preceitos da agricultura conservacionista, indispensáveis a um SPD, o processo constante de colheita e semeadura, sempre com o solo coberto, é o caminho que viabiliza a sustentabilidade do sistema a longo prazo, pois a diversificação de culturas aporta a todo o momento matéria prima para a produção de material orgânico, requerido pela atividade biológica do solo para manter sua qualidade estrutural desejada (DENARDIN, et al, 2019).

Possamai *et al* (2021), através de uma revisão bibliográfica sobre as técnicas adotadas pelos agricultores, apontaram a necessidade de conceituar claramente os termos PD e SPD, entendendo como diferentes práticas adotadas, referente a qualidade do manejo adequado do solo nas propriedades.

De acordo com Possamai *et al.* (2021), enquanto o “Plantio Direto” (PD) é uma prática conservacionista, o “Sistema de Plantio Direto” (SPD) apresenta-se como um

sistema de produção agrícola baseado na adoção simultânea de perturbação mínima do solo, manutenção da cobertura permanente do solo e rotação de culturas.

A adoção permanente do SPD, trouxe vários benefícios ao longo dos anos, tais como, o aumento da matéria orgânica do solo (MOS) com benefício direto na microbiota do solo, promovendo o equilíbrio biológico no combate as doenças de solo, sequestro e incorporação de carbono ao solo, aumento da porosidade do solo com maior armazenamento de água disponível às plantas, ciclagem de nutrientes, aumento da produtividade, enfim, uma série de melhoria nas propriedades físicas, químicas e biológicas do sistema, contribuindo para uma agricultura conservacionista, e de boas práticas na produção de alimentos (POSSAMAI *et al.*, 2021).

Segundo Possamai *et al.* (2021), estima-se que 10% dos agricultores Paranaenses, estão classificados dentro dos parâmetros da qualidade do verdadeiro SPD. Pela informação, podemos prospectar que a maioria das propriedades não executa totalmente as práticas recomendadas pela pesquisa, e com isso justifica o grande avanço da problemática da compactação do solo, desencadeando uma série de problemas indiretos.

Nas regiões subtropical e tropical do Brasil, a redução da intensidade do preparo do solo e a manutenção dos restos culturais na superfície do solo não são suficientes para imprimir caráter de sustentabilidade à agricultura, com aporte de palha abaixo de 12 toneladas por hectares anuais, fornecidos pelo sistema. Os modelos de produção dominantes no país, viabilizam o PD em detrimento do SPD, devido ao baixo aporte de carbono, produzido pelas espécies anuais, priorizando uma sucessão de culturas com foco na produção de grãos, minimizando a rotação com plantas de cobertura (DENARDIN *et al.*, 2019).

No cenário agrícola brasileiro, áreas manejadas em plantio direto ocupam mais de 35 milhões do total de 48,8 milhões de hectares cultivados com espécies temporárias segundo a FEBRAPDP (2022). Nessas áreas, há registros de aumento da compactação do solo na camada localizada entre 0,07 e 0,15 m, decorrente de descuidos no manejo, como ausência de diversificação de culturas, excesso de calagem, uso de semeadoras desprovidas de hastes sulcadoras com deposição de adubo na superfície ou na camada superficial do solo, pastejo intensivo e aumento da frequência de tráfego de máquinas agrícolas (DRESCHER *et al.*, 2016).

As principais culturas que observamos plantadas sob SPD na região Sul, são a soja (*Glycine max* L.), o milho (*Zea mays* L.) e o trigo (*Triticum aestivum* L.). Nessas

áreas, o aumento da compactação do solo tem provocado restrição ao crescimento radicular das plantas e consequente concentração de raízes na camada superficial do solo, o que pode resultar na diminuição da absorção de água e nutrientes, mesmo em curtos períodos de déficit hídrico, e na redução do crescimento da parte aérea e da produtividade das culturas (KLEIN *et al.*, 2009).

A modernização da agricultura, visando à otimização de práticas agrícolas, tem levado ao uso intensivo de máquinas agrícolas de grande porte. É preciso atenção especial ao porte e o tráfego intenso do maquinário na lavoura (REICHERT, 2016).

Com a entrada da ferrugem asiática no Brasil a partir de 2001, e a necessidade de um controle químico preventivo, houve uma maior dinâmica na entrada de equipamentos pulverizadores, esses cada vez maiores e mais pesados, produzidos pela indústria, para garantir rendimento operacional por área tratada. Aplicações realizadas de uma forma calendarizada, muitas vezes não obedecendo as condições de umidade do solo para a entrada desses maquinários na área. (SILVEIRA JÚNIOR *et al.*, 2012).

Segundo Nicoloso *et al.* (2008), a compactação se expressa pelo aumento da densidade do solo e pela redução do seu espaço poroso em resposta a um histórico de cargas ou pressões exercidas na sua superfície, especialmente em elevada umidade.

A compactação reduz a taxa de infiltração de água no solo e aumenta o escoamento superficial, o que limita a disponibilidade de água para as plantas (LANZANOVA *et al.*, 2007).

Em um solo compactado, o sistema radicular concentra-se próximo da superfície, torna as plantas mais susceptíveis a estiagens, por não conseguir um sistema de distribuição de raízes em profundidade, o que limita a absorção de água principalmente. Nessa condição, dependendo do grau de compactação, poderá prejudicar as trocas gasosas entre o solo e a atmosfera e, conseqüentemente, o desenvolvimento das plantas. (NICOLOSO *et al.*, 2008).

Para Silveira Júnior *et al.* (2012), a renovação do ar do solo e o aumento da concentração de oxigênio são necessários para que o processo de respiração radicular e o metabolismo microbiano aeróbico sejam mantidos em níveis adequados.

Entender o processo de compactação do solo e buscar soluções para minimizar os seus efeitos, tem sido uma constante pesquisa em busca de alternativas

satisfatórias que venham amenizar a principal causa que é a perda de potencial produtivo das culturas (DENARDIN *et al*, 2019).

Devido a esse impedimento físico no aprofundamento das raízes na busca principalmente por água e nutrientes, há uma limitação da expressão do potencial genético das culturas de grãos, principalmente em condições adversas, como estiagens prolongadas que ocorrem frequentemente em diversas regiões do país (VIEIRA; KLEIN, 2007).

De acordo com Bengough, *et al* (2011), as principais limitações físicas para o crescimento e desenvolvimento das raízes das plantas é o estresse hídrico, o estresse anóxico e a impedância mecânica do solo, os quais se relacionam diretamente com a estrutura e compactação do solo. Estas limitações do solo podem afetar a taxa de crescimento, desenvolvimento e distribuição das raízes no solo e, conseqüentemente, a área de solo explorada por elas em busca de água e nutrientes.

As condições físicas e químicas do subsolo, podem afetar diretamente o desenvolvimento do sistema radicular das plantas, pois estão associadas à fatores; como aeração do solo, água disponível às raízes, baixa oferta de nutrientes ou toxidez de minerais, contribuindo assim, à resistência mecânica do solo ao aprofundamento do sistema radicular das plantas (PICCIN, 2019).

É importante conhecer o nível de compactação do solo, através de um diagnóstico. A prática mais comum utilizada é através da medição da RP (resistência à penetração). Como o próprio nome designa, é a resistência do solo à penetração das raízes das plantas (PICCIN, 2019).

Para Ramos, *et al* (2015):

“A formação de camada compactada nas diversas formas de manejo de solo é quantificada pelos valores de resistência à penetração (RP), sendo que valores em torno de 2 a 4 MPa, segundo Arshad *et al.* (1996), e valores maiores de 2,0 MPa, segundo Tormena *et al.* (1998), são considerados limite crítico para influenciar o desenvolvimento das plantas. (CAMARGO; ALLEONI, 1997), concluíram que valores de RP acima de 2,5 MPa restringem o crescimento das raízes”.

Sabe-se que acima de 2,5 MPa já é um indicativo de redução da produtividade para a cultura da soja, dependendo da estrutura do solo. Essa medida é realizada na prática por um equipamento chamado penetrômetro, que ao aplicar uma pressão no solo, ele imita o mais próximo possível, à força que uma raiz faz para se aprofundar em subsuperfície, a cada cm de solo. Com isso, conseguimos através de um relatório digital identificar em qual camada está o solo compactado, e obter um diagnóstico

para recomendar alguma intervenção mecânica ou uma escarificação biológica através de mix de plantas de cobertura, com diferentes sistemas radiculares, a fim de melhorar a estrutura do solo. (BENGOUGH *et al.*, 2011).

Para a região Sul do Brasil, o vazio outonal deverá ser preenchido por uma cultura de cobertura, antecedendo a próxima cultura de grãos.

A aveia preta faz muito bem esse papel. O cultivo de plantas de cobertura é de suma importância para a sustentabilidade do SPD. Uma das culturas mais utilizadas na cobertura desse sistema no Sul do Brasil é a aveia preta (*Avena strigosa*). Segundo Tiecher (2016), a parte aérea da aveia preta pode produzir quantidade de matéria seca superior a 7.000 kg ha⁻¹, e devido a sua relação C/N (Carbono/Nitrogênio) alta, a palha permanecerá por mais tempo até a sua decomposição.

Entretanto, a alta relação C/N de seus resíduos, acima de 31, pode haver imobilização do nitrogênio durante a decomposição para as culturas sucessoras, e se no caso for uma gramínea como milho, recomenda-se cuidado com esse nutriente. (DICK *et al.*, 2003).

Relação C/N alta significa que há pouco nitrogênio e excesso de carbono. A falta de nitrogênio irá limitar o crescimento microbiano e o carbono não será todo degradado, disponibilizando menos nutriente para a próxima cultura.

A aveia preta é mais comumente utilizada, por atender diversas características, tais como: produzir grande quantidade de matéria seca (MS), boa cobertura do solo e fácil adaptação em diferentes tipos de solos. Possui sementes disponíveis e de baixo custo no mercado do agronegócio, apresentando um sistema radicular vigoroso, servindo para abertura de porosidade e agregação do solo (SALTON *et al.*, 1998).

Devido a sua rusticidade, é adaptável a solos de baixa fertilidade. Com potencial de perfilhamento e resistente à estiagem é utilizada como proteção rápida do solo e manejada na fase de grão leitoso, para aproveitar o máximo potencial de fitomassa (LIMA FILHO *et al.*, 2014).

Avaliando a taxa de decomposição de nutrientes reciclados pela aveia preta, Cruciol *et al.* (2008), observou uma liberação gradual de N, Ca⁺², P e S após o manejo da aveia com rolo faca e dessecação, o que beneficia a cultura subsequente.

A cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), é considerada como alternativa para agricultura familiar de acordo com a EMBRAPA. Possui ciclo curto e ampla adaptação edafoclimática podendo ser cultivada em várias épocas do ano, dependendo da região, o qual possibilita realizar a rotação com outras culturas comerciais pelo fato do seu cultivo ser possível em três safras anuais. (SALVADOR, 2014)

No Sudoeste do Paraná, entra como alternativa de grãos, para aumento de rentabilidade da propriedade, e oportunidade no sistema de manejo de rotação de culturas. Devido ao seu rápido desenvolvimento, com ciclo de vida no máximo até 90 dias, podemos afirmar que seu sistema radicular é mais superficial do que estar presente ao longo do perfil do solo.

A cultura do feijoeiro é uma opção de cobertura de área em sucessão a soja, preenchendo o vazio outonal com a perspectiva de uma renda rápida na comercialização dos grãos. Os grãos de feijão presente na mesa dos brasileiros é uma fonte rica em proteínas, fibra, vitaminas, ferro, cálcio e outros minerais (PADILHA *et al.*, 2017).

Segundo dados da Conab (2021), a área cultivada do feijão safrinha no Brasil foi de 1.459,5 mil hectares, com uma produção de 1.152,9 mil toneladas e produtividade média de 790 kg ha⁻¹. No Estado do Paraná tem-se uma área plantada de 252,9 mil hectares, com uma produção de 279,0 mil toneladas e uma produtividade média de 1,103 kg ha⁻¹.

Mesmo as plantas de coberturas, podem ter dificuldades de se desenvolverem em um sistema compactado e as culturas de grãos são ainda mais sensíveis à compactação do solo. Por isso é muito importante fazermos um diagnóstico das áreas cultivadas. Uma leitura da RP (resistência à penetração) mais precisa com o penetrômetro, vai depender de identificarmos a umidade do solo. Isso é muito importante para não superestimar ou subestimar números que possam nos enganar. Um solo após a chuva, é mais penetrável do que um solo mais seco. A condição ideal seria uma boa chuva que atinja a CC (capacidade de campo) e após três dias realizar o diagnóstico (BENGOUGH *et al.*, 2011).

Além de identificarmos a RP de um solo, é importante saber em conjunto o nível de densidade do solo, bem como sua textura, para avaliarmos a eventual compactação.

De acordo com o livro “Maximizando o Rendimento da Soja: Ecofisiologia, Nutrição e Manejo” (FLOSS, 2022):

“Tomando por base inúmeras pesquisas e evidências observadas a campo, pode-se considerar que um solo ideal deve apresentar uma densidade aparente menor que $1,25 \text{ g cm}^{-3}$ (ou resistência à penetração menor que 1,5 MPa); $1,25$ até $1,5 \text{ g cm}^{-3}$ ou $1,5$ a 3 MPa , são toleradas e podem ser rompidas pelo crescimento radicular de culturas de cobertura (descompactação biológica); densidade aparente acima de $1,5 \text{ g cm}^{-3}$ ou mais que 3 MPa é limitante e requer a descompactação mecânica, associada à biológica. Em SPD consolidado, os valores tolerados de resistência à penetração (RP) são de 2 MPa , e em solos argilosos, até 3 MPa , obtidos com teor de água equivalente à capacidade de campo (CC) e elevação da densidade, especialmente na camada de 10 a 20 cm , sem influenciar, significativamente, no desempenho produtivo da soja (MORAES *et al*, 2014). No entanto, em levantamento realizado pelo Cesb (SAKO *et al*, 2016), em 26 lavouras de soja que produziram mais de 70 sacas por ha ($+4.200 \text{ kg ha}^{-1}$), a resistência à penetração foi inferior a $1,4 \text{ MPa}$ avaliado até 120 cm de profundidade. Isso não significa, sob o ponto de vista técnico e econômico, a descompactação mecânica com qualquer valor de RP acima de $1,4 \text{ MPa}$.”

A compactação diminui os espaços dos macroporos (Ma) e microporos (Mi), prejudicando a infiltração, movimentação e armazenamento de água no solo. Com valores altos de RP, teremos um solo limitado quanto ao ambiente de produção. A RP está diretamente proporcional ao aumento da densidade do solo (BENGOUGH *et al.*, 2011).

Segundo BRADY; WEIL (2013) “a densidade do solo é a massa das partículas sólidas em um volume conhecido de um solo no campo (sólidos, mais espaços porosos ocupados com ar e água)”.

Sendo assim, um solo compactado apresentará menor espaço poroso e com isso um aumento da sua densidade. Com um ambiente compactado, observamos uma menor capacidade de retenção de água, menor aeração, maior dificuldade de desenvolvimento de raízes e conseqüentemente limitada capacidade de absorção de água e nutrientes diante de um estresse hídrico (BRADY; WEIL, 2013).

Além da compactação do solo, a acidez e a presença de alumínio tóxico em subsuperfície, tem limitado o crescimento de raízes em profundidade. Com a aplicação de corretivos e fertilizantes restritos à camada de $0,0$ a $0,15 \text{ m}$, observa-se uma maior concentração de nutrientes na superfície, favorecendo o crescimento de raízes, nessa faixa de solo. Em anos de maior precipitação pluviométrica, as raízes da cultura de grãos conseguem absorver água e nutrientes à vontade, porém em anos de estiagem, com o sistema radicular limitado à superfície, as culturas não conseguem

expressar o seu potencial produtivo, ocasionando perdas econômicas aos agricultores (SAKO *et al.*, 2016).

Os solos ácidos, que não são corrigidos em profundidade, apresentam uma séria limitação ao desenvolvimento radicular das plantas, diminuindo assim a sua produtividade. Ao estudar os efeitos do pH do subsolo sobre o desenvolvimento do sistema radicular das culturas, constatou-se que estes eram afetados negativamente quando ocorria déficit hídrico durante o ciclo e quando as precipitações eram suficientes não ocorriam diferenças significativas em produtividade (KLEIN *et al.*, 2007).

Para Caires *et al.* (2006) as características químicas (elevada acidez e toxidez de alumínio) são prejudiciais às plantas, pois são determinantes para o crescimento de raízes e conforme Dalla Nora e Amado (2013), também para a distribuição dessas no solo, podendo aumentar a suscetibilidade das raízes aos efeitos deletérios do déficit hídrico, quando encontram essas barreiras químicas. Situação recorrente no Sul do Brasil, devido a muitas áreas passarem do sistema convencional ao plantio direto, sem a correta correção do solo em profundidade.

As características químicas do solo geralmente são modificadas pela incorporação de fertilizantes aplicados na sua superfície ou pela colocação deles dentro da camada arável. O desenvolvimento vegetal pode ser afetado por estas mudanças, especialmente quando se trata de sementes em germinação e plântulas em estabelecimento. Quando as raízes encontram altas concentrações de alumínio tóxico, o seu crescimento tende a limitar-se, prejudicando seriamente o desenvolvimento e produção da planta (KLEIN *et al.*, 2007).

O corretivo mais utilizado nas lavouras do Brasil é o calcário (carbonato de cálcio). Segundo Caires *et al.* (2012), o carbonato de cálcio atua principalmente na camada superficial (0,0 a 0,10 m), próxima a zona de aplicação, sendo este corretivo com pouca ou nenhuma movimentação no perfil do solo.

Existe uma preocupação também quanto ao excesso de calagem na superfície do solo, pela baixa movimentação do calcário no perfil do solo, permanecendo na primeira camada. Para Rosolem *et al.* (1998) níveis adequados de calagem resultaram num sistema radicular mais longo e mais fino, ocorrendo uma baixa toxidez de Al^{3+} e Mn^{4+} , mas considerando a movimentação baixa do Ca^{+2} , a aplicação de corretivos em superfície, mesmo em doses maiores, é eficiente em lavouras não compactadas, quando associada a plantas de cobertura (FLOSS, 2022).

Para os solos de textura mais argilosa, manejados sob SPD, tem sido documentado que o calcário aplicado na superfície apresenta uma mobilidade lenta diminuindo a sua eficiência na redução da acidez subsuperficial. Para a neutralização da acidez nas camadas subsuperficiais do solo são necessárias técnicas especiais, tais como a incorporação mecânica profunda do calcário, o uso de sais de Ca^{2+} mais solúveis, e a utilização de compostos orgânicos (ZIGLIO *et al.*, 1999).

Por isso a adição de carbono ao sistema, proveniente de adubação verde com plantas de cobertura ou adição de resíduos orgânicos de origem animal, para a mineralização e transformação em compostos de cargas aniônica que podem ligar-se quimicamente ao Ca^{+2} , ajudando na descida desse nutriente no perfil do solo, e criando assim um estímulo para o desenvolvimento de raízes em subsuperfície (ZIGLIO *et al.*, 1999).

Segundo Wright *et al.* (1985) o calcário dolomítico misturado com esterco de bovino promoveu aumentos no pH e teor de Ca^{2+} e diminuiu a presença de Al^{3+} na subsuperfície do solo, enquanto para Ziglio *et al.* (1999), o calcário sem adubo orgânico não teve o mesmo efeito.

Pavan e Roth (1992) observaram que a adição de calcário na superfície de um solo coberto com resíduo vegetal (simulando o plantio direto) promoveu maior aumento nas concentrações de íons metálicos na solução lixiviada, comparado com solo descoberto.

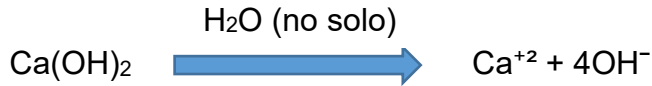
Para Dalla Nora *et al.* (2017), a aplicação associada de calcário dolomítico e gesso é uma prática que pode ser adotada para atenuar os efeitos da toxidez de alumínio, neutralizar o pH e aumentar a disponibilidade de Ca^{+2} e Mg^{2+} em camadas mais profundas do solo. De acordo com Piccin *et al.* (2019) a aplicação de óxido de cálcio e magnésio é uma alternativa que pode ser utilizada para atenuar os efeitos da acidez e toxidez de alumínio do solo reagindo de uma forma mais rápida. Este corretivo apresenta reatividade superior ao calcário, sendo que seu PRNT é mais elevado que o do calcário conforme Alcarde *et al.* (2005).

Segundo Piccin *et al.* (2019), a subsolagem associada à aplicação profunda de óxidos de cálcio e magnésio, influi no comprimento e volume de raízes em superfície e subsuperfície, bem como melhora a distribuição destas no perfil do solo.

O aumento do PRNT dos corretivos pode ser conseguido pela moagem mais fina ou pela calcinação (transformação do carbonato em óxido e hidróxido): no primeiro caso ocorre somente aumento de reatividade e no segundo ocorre aumento

de PN (poder de neutralização) e RE (reatividade). Por isso, pode-se concluir que, em geral, quanto maior o PRNT maior é a RE do corretivo (ALCARDE *et al.*, 2005).

Reação no solo:



Ao final da reação, a fonte Ca(OH)_2 (hidróxido de cálcio), libera Ca^{+2} para a solução do solo e íons hidroxilas (OH^-), promovendo uma reação com os H^+ livres do solo, e o Al^{3+} , neutralizando a acidez do solo. Por este motivo é considerado uma base forte, pois reage rapidamente liberando as hidroxilas para a solução do solo. (ALCARDE, 2005).

Com aplicação de um corretivo, estamos disponibilizando um importante elemento no sistema, o cálcio. A presença desse nutriente é fundamental para a formação de raízes. O cálcio é um macronutriente essencial, responsável pela divisão celular e catalizador de diversas enzimas. Importante em todas as fases da cultura, sendo absorvido via raízes e carregado via xilema. Praticamente imóvel na distribuição na parte foliar, via floema. Desempenha um importante papel na formação do tubo polínico, no pegamento de flores e vagens nas leguminosas. Importante sinalizador no solo para o desenvolvimento das raízes. Por isso a sua presença ao longo do perfil, estimula o crescimento de raízes em profundidade (PAULETTI, *et al* 2014).

Nos solos que predomina a argila caulínítica, no Brasil a proporção ideal de bases na CTC seria: 55-65% de Ca^{+2} ; 13-20% de Mg^{2+} , e 3-5% de K^+ , H^+ até 35% (ideal é zero), e Al^{3+} até 5% (ideal é zero), para as culturas de grãos. Essa ideia de equilíbrio de bases, foi apresentada pela primeira vez pelo Prof.º PhD Willian Albrecht, na década de 50. A quantidade maior de Ca^{2+} em relação ao Mg^{2+} e K^+ , é pela necessidade de uma pressão de concentração maior deste elemento no solo, devido a maior afinidade das raízes pelo K^+ , depois pelo Mg^{2+} e por último o Ca^{2+} (MARSCHNER, 1995).

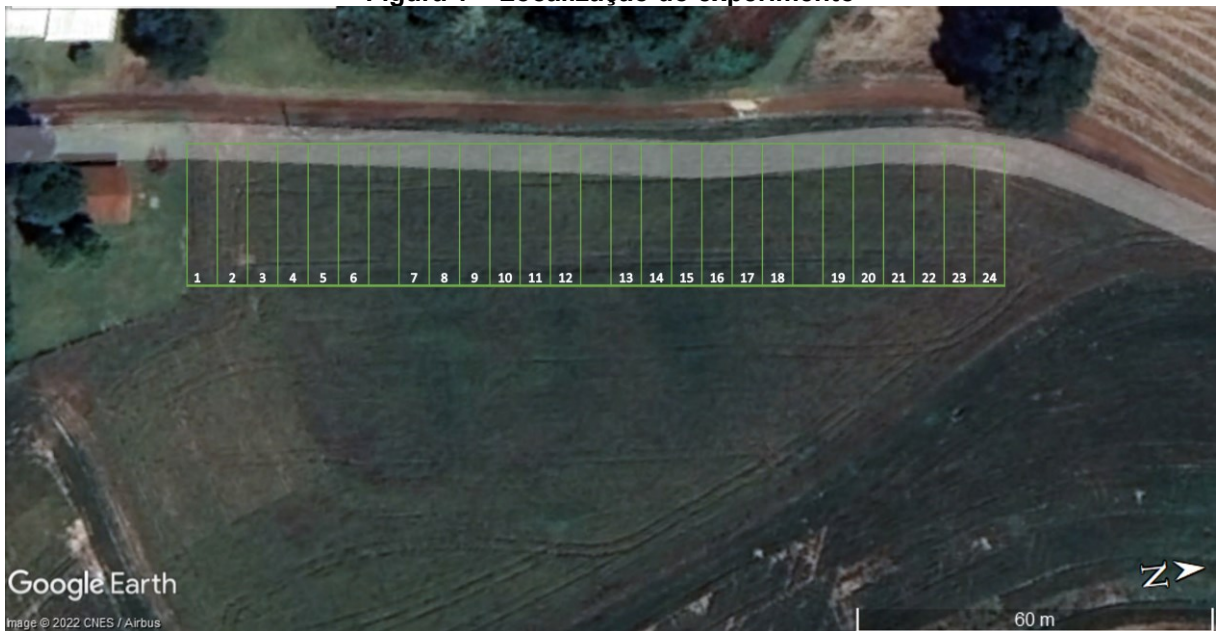
Acredita-se que utilizando o equipamento Fertillus 700 para promover a subsolagem corretiva, descompactando o solo e ao mesmo tempo introduzindo um insumo com alto PRNT e com solubilidade imediata de fornecimento de Ca^{2+} e OH^- no perfil do solo, obteremos caminho livre de Al^{3+} e acidez, para o aprofundamento do sistema radicular permitindo um acesso maior à água e nutrientes, otimizando o potencial produtivo das culturas.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área experimental

O trabalho foi realizado na área experimental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campus Dois Vizinhos, no Sudoeste do Paraná, situado em latitude sul de 25°41'32" e longitude oeste de 53°05'51", a 512 metros acima do nível do mar (Figura 1).

Figura 1 – Localização do experimento



Fonte: Google Earth (2022)

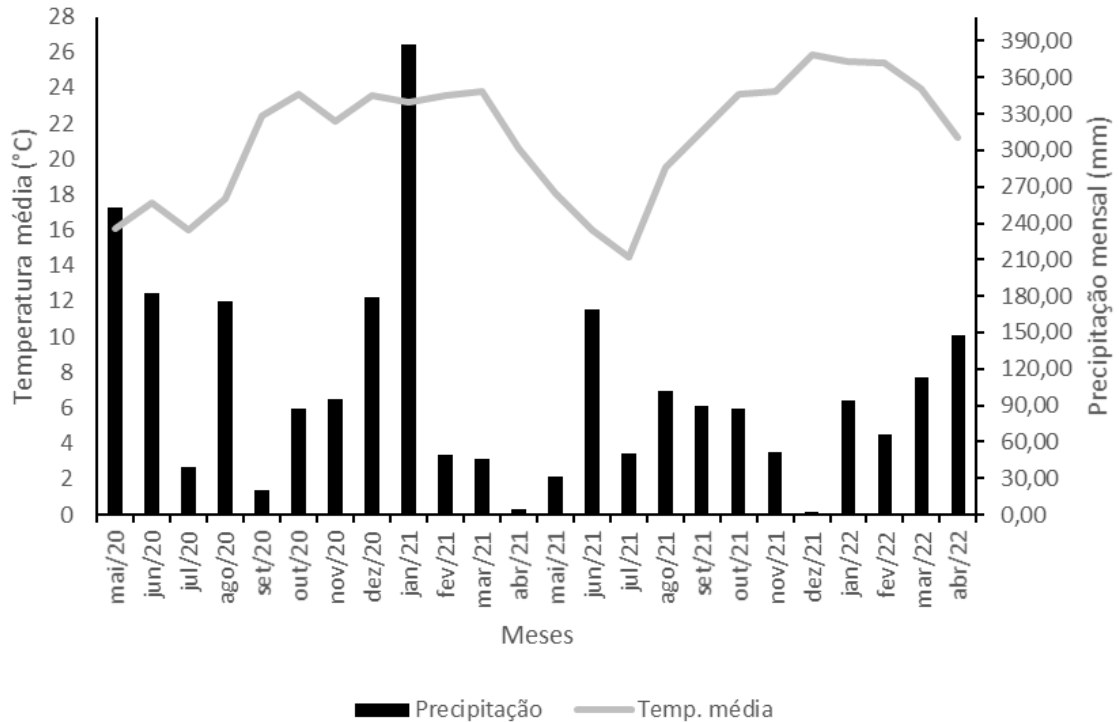
O clima da região, segundo classificação Köppen é do tipo Cfa (subtropical úmido) sem estação seca definida, com temperatura média do mês mais quente de 22 °C (ALVARES *et al.*, 2013), e com precipitações anuais de 2010,06 mm por ano (VIEIRA *et al.*, 2018).

O solo da área é classificado como Latossolo Vermelho (CABREIRA, 2015), com textura argilosa (773 g kg⁻¹ de argila, 224 g kg⁻¹ de silte, e 3 g kg⁻¹ de areia).

A área do experimento é manejada sob o SPD a mais de 15 anos.

A temperatura e precipitação média durante os meses de maio de 2020 a abril de 2022 estão demonstrados na Figura 2.

Figura 2 – Temperatura e precipitação média em Dois Vizinhos entre os meses de maio de 2020 e abril de 2022



Fonte: Estação Meteorológica Automática do Grupo de Pesquisa em Ciência do Solo (GPCS, UTFPR - DV) – 2022.

3.2 Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento utilizado foi blocos ao acaso com 5 tratamentos e com 4 repetições cada, com parcelas de 5,6 m x 20 m. Toda a área foi manejada sob plantio direto e a cobertura verde utilizada na área foi a aveia preta (*Avena strigosa*).

O Experimento foi instalado no dia 06 de agosto de 2020, sobre a cobertura de aveia preta rolada na fase de grão leitoso. A área do experimento estava com média de 5,43 Mg ha⁻¹ de massa seca entre os tratamentos.

Foi realizado coleta de solo para análise no dia 07 de agosto de 2020 com a seguinte estratificação de camadas por tratamento: 0,00-0,05 m; 0,05-0,10 m; 0,10-0,20 m; 0,20-0,30 m e 0,30-0,40 m.

Os tratamentos foram os seguintes:

T0: Testemunha sem subsolagem;

T1: Subsolagem com 0 dosagem de Ca(OH)₂ em superfície;

T2: Subsolagem corretiva no perfil de 0,30-0,40 m na dosagem de 1 Mg ha⁻¹ de Ca(OH)₂;

T3: Aplicação do corretivo somente em superfície na dosagem de 1 Mg ha⁻¹ de Ca(OH)₂;

T4: Subsolagem corretiva no perfil de 0,15-0,30 m na dosagem de 1 Mg ha⁻¹ de Ca(OH)₂.

O protocolo experimental foi desenvolvido mediante avaliação da eficiência do equipamento quanto à camada de deposição do produto Oxyfertil® 7000i e descompactação do solo e o efeito da fonte corretiva sobre as variáveis físicas e químicas do solo e resposta no desenvolvimento das culturas de grãos subsequentes.

Foi avaliado a proposta do equipamento em depositar o corretivo agrícola em duas camadas diferentes de profundidade no perfil do solo (camada de 0,15-0,30 m e camada de 0,30-0,40 m de profundidade), bem como a capacidade de descompactar o solo e injetar o insumo com qualidade de deposição.

Avaliou-se a interação do conjunto no manejo físico e químico do solo sobre o desenvolvimento da cultura comercial soja (*Glycine max*) na safra 2020/2021, a produtividade da cultura em sucessão, feijão (*Phaseolus vulgaris*) em junho de 2021 e a MS da aveia preta (*Avena strigosa*) em cobertura da área em outubro de 2021. Após dessecação da aveia foi implantado soja em novembro de 2021 e avaliado a produtividade em março de 2022, que se desenvolveu sobre forte período de estiagem durante o ciclo da cultura.

3.3 Descompactadora e Fertilizadora

Para a subsolagem e fertilização dos tratamentos, foi utilizado o equipamento Fertillus 700 da empresa (JAN Implementos Agrícolas S/A), com sete hastes e espaçamento entre linhas de 0,40 m e um alcance de profundidade no solo de até 0,40 m. Com uma turbina de ar de acionamento hidráulico, injetou-se o produto nas fissuras do solo, ocasionadas pela passagem das hastes sulcadoras, ao longo do perfil, depositando-o em diferentes camadas, conforme regulagem de posicionamento. A regulagem da profundidade de trabalho é realizada através da articulação das rodas, acionado pelo sistema hidráulico do trator. A amplitude da profundidade é determinada pela quantidade de calços limitadores de curso, localizados nas hastes dos dois cilindros hidráulicos. Conta com sistema de desarme e rearme automático dos braços (retorno via acumulador de pressão). Os braços subsoladores contam com regulagem ajustável para direcionamento do produto,

sendo 5 posições, necessitando do corretivo aplicado em condição seca e livre de impurezas.

Fotografia 1 - Descompactadora e Fertilizadora Fertillus 700



Fonte: JAN Implementos Agrícolas S/A (2020)

3.3.1 Características do produto utilizado com o equipamento

O Oxyfertil® 7000i é um fertilizante mineral simples micro pulverizado, à base de óxido de cálcio (CaO), hidratado industrialmente, com ação corretiva do pH do solo e nutrição de plantas.

Produto: Hidróxido de cálcio - Ca(OH)_2 .

Propriedades químicas: CaO – 70% (48% de Ca^{2+});

Propriedades físicas: 0,00 – 0,09 mm (pó micro pulverizado).

Poder de neutralização (PN) = 135%.

3.4 Determinações e metodologia

3.4.1 Amostragens de solo

Utilizou-se uma pá de corte reta para a coleta de solo nas camadas de 0,00-0,05 m e 0,00-0,10 m e após essas camadas foi amostrado com trado nas profundidades de 0,10-0,20 m, 0,20-0,30 m e 0,30-0,40 m. Também foram coletadas amostras indeformadas, conforme o método do anel volumétrico (EMBRAPA, 1979). Foram abertos pontos no centro de cada parcela (20 parcelas) na profundidade de até

0,40 m para a determinação de densidade do solo, macroporosidade e microporosidade.

A primeira coleta de solo foi realizada um dia após a implantação do experimento, em 07 de agosto de 2020, como caracterização da área. Foram coletadas amostras de solo estratificadas na linha da passagem das hastes sulcadoras do equipamento e nas entrelinhas.

A segunda coleta de solo foi realizada 14 meses após instalação do experimento, em outubro de 2021. Foram feitas as seguintes determinações para ambas as coletas: pH, MO, V%, H+Al, Al⁺³, m%, Ca⁺², Mg⁺², P, K⁺)

3.4.2 Determinação da resistência à penetração do solo

A determinação da resistência à penetração (RP) foi realizada após a instalação do experimento em Setembro de 2020, 30 dias após a execução dos tratamentos. Como forma de caracterização do experimento, fez-se a RP nas parcelas da testemunha e nas parcelas onde realizou-se as subsolagens (Tabela 2).

Uma segunda determinação foi realizada 12 meses após a primeira coleta, em Outubro de 2021. A determinação da RP foi realizada com o equipamento Penetro-LOG da marca Falker®, com ponta cônica de 30° e com área do cone de 129 mm². A medida de RP foi feita a cada centímetro entre 0,00 e 0,40 m.

3.4.3 Determinação da densidade do solo

Foram feitas coletas de amostras indeformadas utilizando o método do anel volumétrico. Após a coleta, as amostras foram levadas para o laboratório e submetidas aos procedimentos. Para a determinação da densidade do solo (Ds), retirou-se o solo do anel, sendo transferido para recipiente metálico e posteriormente para estufa a 105 °C por 24h. Após esse período, as amostras foram pesadas para a determinação da massa seca do solo. Com os valores obtidos, realizou-se o cálculo da Ds para cada amostra, conforme a equação: $Ds = Ms/Vs$.

3.4.4 Determinação da umidade do solo

A umidade do solo foi determinada por meio de coleta de frações de solo nas camadas de 0,00-0,05 m, 0,05-0,10 m, 0,10-0,20 m, 0,20-0,30 m e 0,30-0,40 m. Após a coleta, as amostras foram levadas para o laboratório e pesadas, sendo submetidas

a estufa a 105 °C por 24h. Após esse período, as amostras foram pesadas para a determinação da massa seca do solo através da equação: $Umidade(\%) = 100 * (peso\ úmido - peso\ seco) / peso\ seco$.

3.4.5 Determinação da porosidade total, macroporosidade e microporosidade do solo

Foi realizado logo após a implantação do experimento em agosto de 2020 e uma segunda coleta 14 meses após. Por meio de amostras de solo indeformadas, coletadas com anéis metálicos, com bordas cortantes e volume conhecido, seguindo metodologia da mesa de tensão, descrita pela Embrapa (2011), utilizou-se as seguintes fórmulas para a determinação da PT, Ma e Mi:

- Macroporosidade (Ma) ($m^3 m^{-3}$)

$$Ma = (M_{ssat} - M_{s60}) / V_c$$

Onde:

M_{ssat} = massa de solo saturado (gramas);

M_{s60} = massa do solo após 48 horas na mesa de tensão a uma sucção de 60 cm de altura de coluna de água (gramas);

V_c = volume do cilindro (cm^3).

- Microporosidade (Mi) ($m^3 m^{-3}$)

$$Mi = (M_{s60} - M_{ss}) / V_c$$

Onde:

M_{s60} = massa do solo após 48 horas na mesa de tensão a uma sucção de 60 cm de altura de coluna de água (gramas);

M_{ss} = massa de solo seco em estufa a 105 °C por 24 horas;

V_c = volume do cilindro (cm^3).

- Porosidade Total (Pt) ($m^3 m^{-3}$)

$$Pt = Ma + Mi$$

3.4.6 Cultivo e determinação da massa seca da aveia

A coleta de matéria seca referente ao ano de 2020, ocorreu na implantação do experimento para caracterização da área, em agosto de 2020, utilizando-se quadro metálico (0,50 m x 0,50 m) lançado aleatoriamente na parcela em dois pontos, coletando todo o material vegetal nele contido, seco em estufa de ventilação forçada

a 50 °C, até peso constante e pesado em balança semianalítica de precisão. Da mesma forma repetiu-se essa mesma determinação em outubro de 2021.

3.4.7 Cultivo e determinação da produtividade da soja

A cultura da soja foi semeada no dia 19/10/2020, com semeadora-adubadora espaçadas à 0,45 m, utilizando variedade Nidera 5700, e 400 kg ha⁻¹ de adubação de base do formulado 02-20-19 de NPK.

Para a cultura da soja em 2021 avaliou-se os seguintes componentes de rendimento: massa fresca (MF, g), massa seca (MS, g), massa seca da planta inteira (MSPI, g) e produtividade (Prod, kg ha⁻¹), altura da planta (AP, cm), número de ramificações, número de vagens por planta (NV/P), número de grãos por planta (NG/P), número de grãos por vagem (NG/V), massa de mil grãos (g) e número de plantas por hectare (Pla ha⁻¹) de soja.

Para a cultura da soja em 2022 avaliou-se a produtividade e MMG (massa de mil grãos). Foi coletado amostras aleatórias por parcela de duas linhas de 3 metros (2,7 m²), identificadas e levadas à estufa plástica para secagem do material por três semanas, que originou umidade de grãos abaixo de 14%. Foi realizado a debulha em um batedor estacionário e pesado as amostras. Através de quatro repetições de 50 grãos, pesado em balança semianalítica de precisão e extrapolado para mil grãos, obteve-se o MMG.

3.4.8 Cultivo e determinação da produtividade do feijão

A cultura do feijoeiro foi semeada no dia 02/03/2021, com semeadora-adubadora espaçadas à 0,45 m, utilizando variedade BRs Esteio, e 350 kg ha⁻¹ de adubação de base do formulado 8-20-15 de NPK.

A avaliação de produtividade ocorreu em 08/06/2021, sendo coletadas amostras aleatórias por parcela de três linhas de 3 m (4,05 m²), identificadas e posteriormente foram passadas em um batedor estacionário para realizar a debulha, e realizada a medição da umidade com o aparelho portátil AL-101-Agrologic®.

Para o peso de mil grão (MMG), foram feitas quatro repetições de 50 grãos totalizando 200 grãos, colocados separadamente em copinhos descartáveis, pesadas em balança semianalítica de precisão e em seguida extrapolado o peso para 1000 grãos.

3.5 Análise de dados

Os dados foram submetidos a análise de variância (ANOVA) e conforme a ausência ou presença de interação significativa, foi realizado teste de comparação de médias de Tukey ($\alpha = 0,05$), utilizando-se os softwares GENES (CRUZ, 2013).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Estrutura do solo

A análise de variância demonstrou que a resistência a penetração final (RP), apresentou interação significativa entre os tratamentos aplicados e a profundidade de avaliação do solo. Para a umidade final (UF), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), porosidade total (PT) e densidade do solo (Ds) não houve efeito significativo na interação entre os fatores avaliados, sendo que estes apresentaram efeito significativo para a profundidade do solo (Tabela 1).

Tabela 1 - Graus de liberdade (G.L.) e quadrado médio (Q.M.) para as variáveis resistência a penetração final (RP), umidade final (UF), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), porosidade total (PT) e densidade do solo (Ds) após a aplicação dos tratamentos.

Causa da Variação	G.L.	Q.M.					
		RP	UF	Ma	Mi	PT	Ds
Bloco	3	82467,41	259,53	67,14	8,49	28,00	0,07
Tratamento	4	48005,23 ^{ns}	26,14 ^{ns}	7,95 ^{ns}	5,70 ^{ns}	2,18 ^{ns}	0,04 ^{ns}
Profundidade	3	13412870,20 ^{**}	49,05	315,82 ^{**}	160,76 ^{**}	55,38 ^{**}	0,34 ^{**}
Trat, X Prof,	12	52197,98 ^{**}	18,17 ^{ns}	3,83 ^{ns}	3,58 ^{ns}	1,94 ^{ns}	0,04 ^{ns}
Erro	57	25088,23	11,60	20,90	10,11	7,65	0,49
Média		965,77	54,56	11,75	47,73	59,48	1,00
C.V. (%)		16,40	6,24	38,89	6,66	4,65	9,25

^{**} Significativo ao nível de 5% pelo teste F ($p > 0,05$); ^{ns} não significativo.

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 2 - Resistência a penetração (MPa) do solo submetido a de subsolagem para as quatro profundidades de 0,00 a 0,40 metros de solo nos quatro blocos (BI) avaliados

Profundidade (metros)	Testemunha				Subsolagem			
	BI 1	BI 2	BI 3	BI 4	BI 1	BI 2	BI 3	BI 4
0,00-0,05	0,007	0,0007	0,003	0,006	0,020	0,009	0,018	0,006
0,05-0,10	0,355	0,2497	0,455	0,470	0,260	0,211	0,332	0,197
0,10-0,20	1,894	1,899	2,107	1,910	0,746	0,686	0,712	0,571
0,20-0,40	1,965	1,848	1,656	1,694	1,451	1,161	1,289	1,132

Fonte: Autoria própria (2022)

Para todos os pontos avaliados nos quatro blocos em cada uma das profundidades a média das parcelas obtidas na testemunha para a profundidade de 0,00 a 0,05 metros foi de 0,025 MPa, na profundidade de 0,05 a 0,10 m foi de 0,38 MPa, seguido de 1,95 MPa para as profundidades de 0,10 a 0,20 m e 1,79 Mpa para as profundidades de 0,20 a 0,40 m (Tabela 2).

Onde utilizou-se o equipamento na parcela de subsolagem, a média da RP na profundidade de 0,00 a 0,05 m foi de 0,014 MPa, na profundidade de 0,05 a 0,10 m

foi de 0,250 MPa, seguido de 0,679 MPa e 1,258 MPa para as profundidades de 0,10 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m respectivamente (Tabela 2).

Os oito pontos avaliados para cada uma das profundidades apresentaram umidade de 31,93% para a profundidade de 0,00-0,05 m e de 32,35%, 32,72% e 35,00% para as profundidades de 0,05-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 m, respectivamente.

Conforme Girardello, *et al* (2011) a redução da resistência do solo à penetração, dá-se imediatamente pela ruptura do solo provocado pela passagem das hastes dos equipamentos, com resultado imediato após a operação nos aspectos físicos do solo.

Após 12 meses à primeira leitura de RP, verificou-se que a testemunha e os demais tratamentos de subsolagem e aplicação de Ca(OH)_2 em superfície, para a profundidade de 0,00-0,05 m não apresentaram diferença significativa, da mesma forma as profundidades de 0,05-0,10 m e 0,20-0,40 m (Tabela 3).

Tabela 3 - Resistência a penetração (MPa) do solo submetido a tratamentos de subsolagem e aplicação de cálcio em superfície para as quatro profundidades de 0,00 a 0,40 metros de solo.

Tratamento	Profundidade			
	0,00-0,05 m	0,05-0,10 m	0,10-0,20 m	0,20-0,40 m
Testemunha	0,075 aD*	0,488 aC	1,925 aA	1,621 aB
Ca(OH)_2 em superfície	0,027 aC	0,417 aB	1,767 abA	1,820 aA
Subsolagem	0,067 aC	0,476 aB	1,505 bA	1,616 aA
Subsolagem corretiva 15-30 cm	0,056 aC	0,506 aB	1,635 abA	1,699 aA
Subsolagem corretiva 30-40 cm	0,054 aC	0,569 aB	1,482 bA	1,509 aA

*Médias com letras minúsculas diferentes na mesma coluna diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey; Médias com letras maiúsculas diferentes na mesma linha diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Fonte: Autoria própria (2022)

Na profundidade de 0,10-0,20 m a testemunha apresentou maior resistência do solo a penetração, seguido dos tratamentos de aplicação de Ca(OH)_2 em superfície e subsolagem corretiva de 0,15-0,30 m. As menores resistências a penetração foram verificadas nos tratamentos de subsolagem e subsolagem corretiva de 0,30-0,40 m (Tabela 3).

Todos os tratamentos nas diferentes profundidades avaliadas, apresentaram valores de RP, abaixo de 2 MPa. Para Moraes *et al* (2014), em um SPD consolidado os valores de RP tolerados são de 2 MPa, chegando a 3 MPa com teor de umidade na CC, especialmente na camada de 0,10-0,20 m, sem causar perda de produtividade para a soja.

Para Klein e Câmara (2007), resistências à penetração superiores ao valor de 2 MPa, são limitantes tanto para o desenvolvimento radicular, quanto para a parte aérea das culturas. Segundo Reichert *et al* (2009), os efeitos da escarificação e subsolagem, não são observados por um médio ou longo período, podendo persistir no solo por um período de até um ano. Diferentemente observado por Drescher *et al.* (2016) onde a duração dos efeitos da escarificação tiveram durabilidade de 18 meses.

Após 12 meses a intervenção mecânica nos tratamentos de subsolagem, as leituras de RP ficaram abaixo de 2 MPa, não interferindo na produtividade das culturas utilizadas no sistema de manejo entre os tratamentos, incluindo a testemunha que apresentou a maior RP (1,925 MPa) na camada de 0,10-0,20 m.

O fato de que os valores obtidos na testemunha, como forma de caracterização da área, (0,00-0,05 m – 0,025 MPa; 0,05-0,10 m - 0,382 MPa; 0,10-0,20 m - 1,953 MPa e 0,20-0,40 m - 1,791 MPa) demonstram que mediante esse diagnóstico, a compactação do solo não era um problema para a limitação do desenvolvimento radicular das culturas de grãos e cobertura na área experimental.

A caracterização do solo em relação aos parâmetros de macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), porosidade total (PT) e densidade do solo (Ds) antes da aplicação dos tratamentos está representada na Tabela 4.

Tabela 4 – Umidade inicial (UI, %), macroporosidade (Ma, cm³ cm⁻³), microporosidade (Mi, cm³ cm⁻³), porosidade total (PT, cm³ cm⁻³) e densidade do solo (Ds, cm³ cm⁻³) na caracterização inicial do solo.

Profundidade (m)	UI	MA	Mi	PT	Ds
0,00-0,05	23,01	20,43	33,09	53,51	1,07
0,05-0,10	29,06	14,95	33,96	48,92	1,24
0,10-0,20	30,83	9,43	36,62	45,68	1,32
0,20-0,30	32,57	9,42	38,73	48,13	1,26
0,30-0,40	35,23	10,85	40,29	51,14	1,13

Fonte: A autoria própria (2022)

As análises iniciais mostraram que para a macroporosidade variou de 9,43 cm³ cm⁻³ e 9,42 cm³ cm⁻³ nas profundidades de 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m, sendo que nos primeiros centímetros do solo a macroporosidade foi de 20,43 cm³ cm⁻³ (0,00-0,05 m). A microporosidade variou de 40,29 a 33,09 cm³ cm⁻³, para as profundidades de 0,30-0,40 m e 0,00-0,05 m, respectivamente. A mesma dinâmica ocorreu para os valores de porosidade total onde a camada mais profunda do solo apresentou porosidade de 51,14 cm³ cm⁻³ e para a camada de 0,00-0,05 m a porosidade foi de 53,51 cm³ cm⁻³. A densidade do solo apresentou valores de

1,07 cm³ cm⁻³, 1,24 cm³ cm⁻³, 1,32 cm³ cm⁻³, 1,26 cm³ cm⁻³ e 1,13 cm³ cm⁻³ nas profundidades avaliadas de 0,05-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 m.

A umidade final do solo variou de 53,30% a 56,73% para as profundidades avaliadas, sendo que a camada mais profunda foi a que apresentou maior umidade do solo não havendo significância entre as camadas (Tabela 5).

Tabela 5 - Umidade final (UF, %), macroporosidade (Ma, cm³ cm⁻³), microporosidade (Mi, cm³ cm⁻³), porosidade total (PT, cm³ cm⁻³) e densidade do solo (Ds, cm³ cm⁻³) após a execução dos tratamentos (14 meses).

Profundidade (m)	UF	MA	Mi	PT	Ds
0,00-0,05	53,54 a	17,14 a	44,74 c	61,88 a	0,89 b
0,05-0,10	54,67 a	11,89 b	46,79 bc	58,68 b	1,05 a
0,10-0,20	53,30 a	10,24 bc	47,87 b	58,12 b	1,06 a
0,20-0,40	56,73 a	7,74 c	51,51 a	59,25 b	1,01 a

*Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Fonte: Autoria própria (2022)

A umidade do solo uniforme ao longo do perfil, demonstra um solo melhor estruturado, com boa retenção de água. Um solo com boa agregação, possui um volume maior de poros, conforme nos indica a PT (Tabela 5).

Para Alves e Cabeda (1999), a infiltração de água no solo, é um dos fenômenos que mais reflete a qualidade estrutural de um solo, com uma boa capacidade de armazenar essa água, de acordo com o tamanho e distribuição de poros.

A macroporosidade, microporosidade, porosidade total e densidade do solo (Tabela 5) foram avaliados 14 meses após a execução dos tratamentos, pós cultura de soja (ano I), cultura do feijão subsequente, e sobre a cultura da aveia rolada na fase de floração, anterior ao plantio da segunda safra de soja (ano II). A macroporosidade do solo apresentou valores maiores para as primeiras camadas do solo avaliadas, reduzindo o número de macroporos conforme a profundidade do solo foi aumentando (Tabela 5).

Conforme esperado, os valores de Ma diminuem à medida que nos aprofundamos no perfil e os dados da Ma da tabela 3, demonstram essa dinâmica. Os valores de Ma para as camadas de 0,00-0,05 m, 0,05-0,10 m e 0,10-0,20 m, ficaram acima de 10% de Ma, na camada de 0,20-0,40 m o valor obtido foi de 7,74 cm³ cm⁻³, sendo que valores inferiores a 0,10 cm³ cm⁻³ de Ma são restritivos para desenvolvimento radicular de culturas agrícolas, devido a inadequada difusão de oxigênio no solo (XU et al., 1992).

Da mesma forma que a macroporosidade, a microporosidade foi menor na primeira camada do solo, aumentando com a profundidade, onde na camada de 0,20-0,40 m os microporos apresentaram valores de 51,51 cm³ de poros por volume de solo, diferenciando estatisticamente das demais profundidades.

A porosidade total varia muito entre os solos, sendo que valores oscilam entre 25% em subsuperfície e 60% nas camadas superficiais, onde encontramos valores mais altos de MOS, e uma agregação consolidada do solo (BRADY; WEIL, 2013). Segundo Ranzani (1969), o volume total de poros de um solo, nunca é inferior à 30% e raramente ultrapassa 60%. A porosidade total foi maior na profundidade de 0,00-0,05 m com 61,88 cm³ cm⁻³, diferindo estatisticamente das demais profundidades que apresentaram valores de 59,25, 56,68 e 58,12 cm³ cm⁻³ para as profundidades de 0,20-0,40, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente (Tabela 5).

A densidade do solo apresentou densidades superiores a 1,0 cm³ cm⁻³ para as profundidades de 0,05-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 m, com densidades de 1,05, 1,06 e 1,01 cm³ cm⁻³, respectivamente, sendo que estes valores não diferiram estatisticamente entre si. Já a densidade de 0,89 cm³ cm⁻³ ocorreu na profundidade de 0-5 cm, diferindo estatisticamente das demais.

A tendência da densidade do solo é aumentar à medida que descemos no perfil do solo, pois encontrarmos menos MOS, menos raízes e uma menor agregação do solo. No entanto, os dados apresentados na Tabela 4, nos indicam uma densidade uniforme no perfil do solo muito próximo a 1,0 cm³ cm⁻³. Isso nos faz pensar que o ambiente formado ao longo do perfil, está estruturado, apto ao desenvolvimento de um sistema radicular, não limitante ao desenvolvimento das culturas. Reichert *et al.* (2003) determinaram que valores de Ds superiores a 1.40 Mg m⁻³ apresentam restrição para desenvolvimento radicular de culturas agrícolas, especificamente em solos argilosos, sendo que os valores encontrados foram inferiores ao mencionado. O maior valor absoluto apresentado de Ds do solo foi de 1,06 cm³ cm⁻³, na profundidade de 0,20-0,40 m na média de todos os tratamentos.

A prática da escarificação mecânica do solo possui objetivo de elevar a porosidade e a taxa de infiltração de água no solo, reduzindo a densidade e a resistência do solo à penetração, pela ruptura do solo provocadas pela passagem das hastes dos equipamentos, com resultado imediato após a operação nos aspectos físicos do solo (GIRARDELLO *et al.*, 2011).

Os valores de densidade do solo encontrados (tabela 4) após 12 meses da intervenção mecânica, pode nos indicar que no SPD manejado adequadamente, através da rotação de culturas e principalmente da presença de uma gramínea com bom sistema radicular em profundidade, como a aveia preta na cobertura da área, manteve o perfil do solo com boa formação de poros e agregação. Isso é muito importante para a próxima cultura de grãos, que busca esses caminhos formados pelos bioporos de culturas anteriores, para o aprofundamento do sistema radicular da soja., de acordo com Girardello *et al.* (2011).

4.1.1 Atributos químicos do solo no primeiro ano de avaliação – entre linha A

A análise de solo do primeiro ano de experimento em que as amostras foram retiradas na entre linha, a análise de variância demonstrou que apenas as variáveis potássio (K) e soma de bases (SB) não apresentaram significância na interação entre os tratamentos e as profundidades do solo avaliados (Tabela 6).

Tabela 6 - Graus de liberdade (G.L.) e quadrado médio (Q.M.) para as variáveis matéria orgânica do solo (MOS), fósforo (P), potássio (K⁺), potencial hidrogênionico (pH), acidez do solo (SMP), acidez potencial ou total, (H+Al), cálcio (Ca⁺²) magnésio (Mg⁺²), soma de bases (SB) e saturação de base (V%) do solo no primeiro ano de avaliação na entre linha.

Causa da Variação	GL	QM									
		MO	P	K ⁺	pH	SMP	H+Al	Ca ⁺²	Mg ⁺²	SB	V%
Bloco	3	125,71	89,71	0,04	3,79	1,37	7,24	3,74	0,13	0,21	0,84
Tratamento	4	121,66*	59,35 ^{ns}	0,02 ^{ns}	0,19 ^{ns}	0,06 ^{ns}	0,34 ^{ns}	2,80 ^{ns}	3,24*	11,06 ^{ns}	204,83*
Profundidade	3	2883,72**	771,48*	0,31**	0,09 ^{ns}	0,70 ^{ns}	0,40 ^{ns}	49,02*	0,79 ^{ns}	15,60 ^{ns}	625,58*
Trat. X Prof.	12	102,4*	83,15*	0,03 ^{ns}	0,48*	0,33*	2,70**	6,47*	1,00*	4,99 ^{ns}	64,30*
Erro	57	25,72	33,69	0,02	0,16	0,08	0,55	1,50	0,30	6,22	33,12
Média		34,04	7,49	0,27	6,04	6,5	3,56	9,21	2,22	11,59	75,71
C.V. (%)		14,90	77,49	53,48	6,64	4,23	20,82	13,32	24,85	21,52	7,60

* Significativo ao nível de 5% pelo teste F ($p > 0,05$); ns não significativo.

Fonte: Autoria própria (2022)

A testemunha não apresentou diferença nas diferentes profundidades em relação a avaliação de pH, V%, SB, Ca⁺², Mg⁺², P, K⁺ (Tabela 7).

Não foi detectado alumínio nas amostras de solo (m%).

Tabela 7 - Matéria orgânica (MO, g dm⁻³), fósforo (P, mg dm⁻³), potássio (K⁺ mg dm⁻³), potencial hidrogênionico (pH), acidez do solo (SMP), acidez potencial ou total, (H+Al), cálcio (Ca⁺², mol_c dm⁻³), magnésio (Mg⁺², cmol_c dm⁻³), soma de bases (SB, cmol_c dm⁻³) e saturação de base (V, %) do solo no primeiro ano de avaliação na entre linha em relação a profundidade e aos tratamentos avaliados.

Profundidade (m)	MO	P	K ⁺	pH	SMP	H+Al	Ca ⁺²	Mg ⁺²	SB	V%
Testemunha										
0,00-0,05	47,92 a A	16,03 a A	0,43 ^{ns}	5,88 a A	6,20 ab B	4,34 ab A	10,25 a AB	1,68 a A	9,20 ^{ns}	60,07 b B
0,05-0,10	55,12 a A	10,88 a AB	0,42	6,34 a A	6,64 a AB	3,16 b AB	11,70 a A	2,39 a A	11,34	64,67 ab B
0,10-0,20	50,53 a A	14,87 a A	0,40	6,30 a A	6,68 a A	3,03 b B	11,23 a A	2,03 a A	10,73	71,69 a A
0,20-0,30	55,09 a A	20,33 a A	0,56	6,25 a A	6,60 a AB	3,06 b B	11,20 a A	1,50 a A	9,11	65,96 ab B
0,30-0,40	37,20 a A	10,61 a A	0,30	5,63 a A	6,05 a B	4,97 a A	9,33 a AB	2,08 a B	11,16	74,76 a B
Subsolagem										
0,00-0,05	40,55 ab AB	12,69 ab AB	0,38	6,25 ab A	6,60 ab AB	3,32 ab AB	11,23 a A	2,05 b A	12,20	77,22 ab A
0,05-0,10	40,21 ab B	12,12 ab A	0,29	6,40 a A	6,75 a A	2,96 b B	10,73 a AB	2,10 b A	12,60	77,58 ab A
0,10-0,20	41,65 A a	21,69 a A	0,43	5,83 ab A	6,33 ab AB	3,91 ab AB	10,53 a A	2,08 b A	11,63	74,67 b A
0,20-0,30	30,82 b B	2,51 b B	0,18	5,53 b A	6,10 b B	4,74 a A	7,93 b B	1,70 b A	10,25	70,98 b AB
0,30-0,40	35,19 ab AB	4,79 b A	0,26	6,15 ab A	6,60 ab A	3,31 ab B	10,73 a A	3,78 a A	14,56	87,66 a A
Subsolagem corretiva 0,30-0,40 m										
0,00-0,05	31,50 a BC	3,85 a BC	0,19	6,55 a A	6,80 a A	2,91 b B	9,68 a AB	2,45 b A	12,18	80,92 ab A
0,05-0,10	30,49 a C	6,18 a AB	0,30	6,23 ab AB	6,65 ab AB	3,13 ab AB	9,38 a B	2,03 b A	12,87	79,74 ab A
0,10-0,20	18,76 b B	1,22 a B	0,14	5,55 b A	6,15 b B	4,54 a A	6,35 b B	1,95 b A	11,46	76,81 ab A
0,20-0,30	29,82 a B	3,64 a B	0,19	6,05 ab A	6,53 ab AB	3,46 ab AB	9,03 a AB	1,63 b A	10,19	73,77 b AB
0,30-0,40	26,13 ab BC	1,81 a A	0,12	6,18 ab A	6,73 a A	2,96 b B	8,35 ab B	3,78 a A	13,79	87,34 a A
Subsolagem corretiva 0,15-0,30 m										
0,00-0,05	25,46 a C	1,47 a C	0,19	6,05 a A	6,68 a AB	3,02 b AB	8,40 aB	2,10 a A	11,45	77,65 a A
0,05-0,10	19,77 a D	1,14 a B	0,06	5,58 a B	6,18 a B	4,51 a A	5,53 bC	1,95 a A	12,66	77,45 a A
0,10-0,20	21,78 a B	1,39 a B	0,16	6,03 a A	6,60 a AB	3,25 ab AB	7,38 abB	2,63 a A	12,23	79,77 a A
0,20-0,30	22,45 a B	1,30 a B	0,15	6,18 a A	6,68 a A	3,06 ab B	7,53 abB	2,25 a A	12,08	78,50 a A
0,30-0,40	20,44 a C	1,30 a A	0,17	5,95 a A	6,43 a AB	3,67 ab AB	7,80 abB	2,28 a B	10,07	77,02 a AB

*Médias com letras minúsculas diferentes na mesma coluna diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey; Médias com letras maiúsculas diferentes para o mesmo tratamento nas diferentes profundidades diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey; ^{ns} não significativo.

Fonte: Autoria própria (2022)

O teor de MO foi menor apenas na profundidade de 0,30-0,40 m. A acidez do solo (SMP), manteve-se superior nas profundidades de 0,05-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m, com acidez de 6,64; 6,68 e 6,60, respectivamente, já a acidez potencial H+Al, nessas mesmas camadas apresentou valores inferiores em relação a primeira e a última camada analisada (Tabela 7).

O tratamento em que a subsolagem foi realizada, não teve efeito estatístico para as profundidades analisadas para as variáveis K⁺ e SB. O teor de MOS foi maior na profundidade entre 0,10 e 0,20 m com 41,65 g dm⁻³ e o menor teor foi na camada subsequente com 30,62 g dm⁻³. O fósforo na terceira profundidade avaliada (0,10-0,20 m) apresentou 21,69 mg dm⁻³, já as profundidades abaixo (0,20-0,30 m e 0,30-0,40 m), o teor baixou para 2,51 e 4,79 mg dm⁻³, respectivamente. O teor de Ca⁺² foi superior nas três primeiras camadas do solo já o magnésio apenas a camada de 0,30-40 m teve teor de 3,78 cmol_c dm⁻³ (Tabela 7).

O pH variou entre 6,75 e 5,53 para as profundidades 0,05-0,10 m e 0,20-0,30 m. A acidez do solo e a acidez potencial, foram maiores nas profundidades de 0,05-0,10 m com 6,75 e de 4,74 cmol_c dm⁻³ na profundidade de 0,20-0,30 m, respectivamente. A saturação de base foi maior na profundidade maior (0,30-0,40 m) de 3,78 cmol_c dm⁻³ no tratamento em que foi realizada a subsolagem (Tabela 7).

A análise de solo na entre linha no primeiro ano de cultivo não houve diferença significativa para a subsolagem corretiva 0,30-0,40 m para as variáveis P, K⁺ e SB para a aplicação da subsolagem corretiva 0,15-0,30 m, o mesmo ocorreu para fósforo, potássio, pH, acidez do solo, cálcio, magnésio, soma de bases e saturação de base. Neste tratamento, acidez total apresentou diferença significativa para a profundidade de 0,05-0,10 m sendo que não diferiu estatisticamente das apenas da primeira profundidade em que o valor foi de 3,02 cmol_c dm⁻³ (Tabela 7).

A subsolagem corretiva na profundidade de 0,30-0,40 m apresentou maior teor de MOS para as camadas de 0,0-0,05 m, 0,05-0,10 m e de 0,20-0,30 m. O pH foi o maior na primeira camada sendo estatisticamente diferente da camada de 0,10-0,20 m. Para o índice SMP a primeira e a última camada apresentaram maior efeito da subsolagem para esta variável com valores de 6,80 e 6,73, respectivamente. A acidez potencial foi superior na camada de 0,10-0,20 m com valor de 4,54 cmol_c dm⁻³ (Tabela 7).

O teor de Ca⁺² no solo foi de 9,68 cmol_c dm⁻³, 9,38 cmol_c dm⁻³ e 9,03 cmol_c dm⁻³ respectivamente para as camadas de 0,00-0,05 m, 0,05-0,10 m e de 0,20-0,30 m.

Esses resultados foram superiores as demais camadas. Já o magnésio apresentou o valor de $3,78 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ sendo este superior a todos os demais tratamentos para a camada para a camada de 0,30-0,40 m na subsolagem corretiva na profundidade de 0,30-0,40 m (Tabela 7).

Quando avaliada a profundidade de 0,0-0,05, 0,05-0,10 m, 0,10-0,20 m, 0,20-0,30 m e 0,30-0,40 m do solo para a variável MOS verificou-se que para o tratamento utilizado como testemunha houve efeito superior aos demais tratamentos, com valores de 47,92; 55,12; 50,53; 55,09; 37,20 g dm^{-3} . A superioridade da MOS em todas as camadas da testemunha, quando comparadas às camadas dos demais tratamentos que utilizou-se o Fertillus 700 área, nos indica que o uso desse equipamento em um SPD, traz imediatamente um ponto negativo, que é a degradação da MOS, por ocasião da oxidação no sistema, com a passagem das hastes do equipamento, sendo que a utilização de tecnologias alternativas na descompactação do solo, como plantas de serviço, seria mais recomendável em um Sistema de Plantio Direto consolidado (POTT *et al.*, 2019).

A dinâmica da matéria orgânica em suas frações, pode ser alterada pelo manejo, de acordo com o tipo de solo. Em solos de textura argilosa, ocorre formação de microagregados altamente estáveis, onde grande parte da MOS pode ser protegida fisicamente. Ao romper esses agregados, estamos expondo a MOS à oxidação e perda de C (DICK *et al.* 2009).

Os teores de P, foram superiores nas profundidades de 0,00-0,05 m e 0,20-0,30 m para a testemunha com teores de 16,03 e 20,33 mg dm^{-3} , respectivamente. Na profundidade de 0,10-0,20 m os valores mais altos para os tratamentos testemunha e subsolagem. A profundidade de 0,05-0,10 m o tratamento com maior teor de fosforo foi de 12,12 mg dm^{-3} . A profundidade de 0,30-0,40 m, apesar de significativo ambos foram tidos como iguais pelo teste de Tukey em todos os tratamentos (Tabela 7).

A quantidade de K^+ presente na profundidade de 0,00-0,05 m e de 0,30-0,40 cm apesar de significativo ambos foram tidos como iguais pelo teste de Tukey em todos os tratamentos avaliados. Nas profundidades de 0,05-0,10 m e 0,20-0,30 m a testemunha foi superior com valores de 0,42 e 0,56 mg dm^{-3} , respectivamente. A profundidade de 0,10-0,20 m a subsolagem aplicada na área mostou-se superior aos demais tratamentos.

O pH não alterou significativamente em razão das profundidade de 0,0-0,05 m, 0,10-0,20 m, 0,20-0,30 m e 0,30-0,40 m nos tratamento testemunha, subsolagem,

subsolagem corretiva 0,30-0,40 m e subsolagem corretiva 0,15-0,30 m. Apenas na profundidade de 0,05-0,10 m os tratamentos testemunha e subsolagem foram superiores com valores de 6,34 e 6,40, respectivamente (Tabela 7).

O índice SMP, mostrou-se superior para a primeira profundidade avaliada no tratamento em que foi aplicada a subsolagem corretiva na profundidade de 0,30-0,40 cm com valor de 6,80. A profundidade de 0,05-0,10 m apenas a subsolagem foi superior aos demais tratamentos, com valor de 6,75. Na profundidade de 0,10-0,20 m o tratamento com maior acidez foi a testemunha. A 0,20-0,30 m de profundidade o uso da subsolagem corretiva na profundidade de 0,15-0,30 cm foi superior aos demais tratamentos. Para a última profundidade houve efeito superior para os tratamentos subsolagem e subsolagem corretiva na profundidade de 0,30-0,40 m (Tabela 7).

A acidez potencial foi menor nas profundidade de 0,00-0,05 m para o tratamento subsolagem corretiva de 0,30-0,40 m com 2,91. De 0,05-0,10 m os menor valores de H+Al foi na subsolagem com valor de 2,96. Na profundidade de 0,10-0,20 m o tratamento com a menor acidez potencial foi apenas na testemunha, assim como para a profundidade de 0,20-0,30 m, que também foi menor em que foi aplicada a subsolagem corretiva de 0,30-0,40 m. A H+Al na profundidade de 0,30-0,40 m, os tratamentos com os menores valores foram a subsolagem e a subsolagem corretiva de 0,30-0,40 m, com valores de 3,31 e 2,96 respectivamente (Tabela 7).

O teor de Ca^{+2} na profundidade de 0,00-0,05 m foi menor no tratamento subsolagem corretiva na profundidade de 0,30-0,40 m, assim como para as profundidade de 0,05-0,10 m, já de 0,10-0,20 m e 0,30-0,40 m além da subsolagem corretiva de 0,30-0,40 m a subsolagem corretiva de 0,15-0,30 m. A profundidade de 0,20-0,30 m, os valores menor de Ca^{+2} ocorreram nos tratamentos subsolagem e subsolagem corretiva na profundidade de 0,15-0,30 m (Tabela 7).

As profundidade de 0,00-0,05 m, 0,05-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m em todos os tratamentos adotados não houve diferença significativa para a variável magnésio (Tabela 6). Ambas as profundidade avaliadas em relação aos tratamentos adotados não foram significativos para a soma de bases. Já a saturação de base (V%) teve o mesmo resultado para a profundidade de 0,10-0,20 m. Nas profundidades de 0,00-0,05 m e 0,05-0,10 cm o V% foi superior em todos os tratamentos, exceto para a testemunha e na profundidade de 0,30-0,40 m o tratamento com subsolagem corretiva de 0,15-0,30 m foi igual estatisticamente para os demais tratamentos tanto para os valores superiores como para os inferiores (Tabela 7).

4.1.2 Atributos químicos do solo no primeiro ano de avaliação – na linha B

No ano I do experimento quando as amostras foram retiradas na linha de passagem do equipamento, a análise de variância demonstrou que apenas as variáveis potássio (K^+) e soma de bases (SB) não apresentaram significância na interação entre os tratamentos e as profundidades de solo avaliadas (Tabela 8).

Tabela 8 - Graus de liberdade (G.L.) e quadrado médio (Q.M.) para as variáveis matéria orgânica do solo (MOS), fósforo (P), potássio (K^+), potencial hidrogênionico (pH), acidez do solo (SMP), acidez potencial ou total, (H+Al), cálcio (Ca^{+2}), magnésio (Mg^{+2}), soma de bases (SB) e saturação de base (V%) do solo no primeiro ano de avaliação na linha

Causa da Variação	GL	QM									
		MOS	P	K^+	pH	SMP	H+Al	Ca^{+2}	Mg^{+2}	SB	V%
Bloco	3	6,26	19,75	0,01	0,63	0,32	1,42	2,29	0,50	3,98	81,33
Tratamento	4	146,98*	23,66 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,21 ^{ns}	0,10 ^{ns}	0,42 ^{ns}	4,45 ^{ns}	0,11 ^{ns}	4,82 ^{ns}	42,50 ^{ns}
Profundidade	3	1631,76*	530,97*	0,35*	0,12 ^{ns}	0,05 ^{ns}	0,29 ^{ns}	33,04*	0,35 ^{ns}	41,50*	165,19*
Trat. X Prof.	12	30,07 ^{ns}	9,65 ^{ns}	0,05*	0,19 ^{ns}	0,10 ^{ns}	0,46 ^{ns}	2,71 ^{ns}	0,17 ^{ns}	3,39 ^{ns}	20,14 ^{ns}
Erro	57	25,27	19,98	0,02	0,32	0,12	0,60	2,82	0,19	3,85	33,44
Média		33,57	6,49	0,26	6,24	6,64	3,18	9,92	2,12	12,32	78,87
C.V. (%)		14,97	68,92	46,36	9,06	5,24	24,26	16,91	20,54	15,92	7,33

*Significativo ao nível de 5% pelo teste F ($p > 0,05$); ^{ns} não significativo.

Fonte: Autoria própria (2022)

Na avaliação de MOS, observa-se que mesmo havendo diferença estatística entre os tratamentos o teste de Tukey não foi capaz de determinar diferença entre os diferentes tratamentos aplicados (Tabela 9). Os demais parâmetros de análise do solo em relação ao tratamento aplicado na linha não foram significativos.

Tabela 9 - Matéria orgânica (MO, $g\ dm^{-3}$), fósforo (P, $mg\ dm^{-3}$), potássio (K^+ $mg\ dm^{-3}$), potencial hidrogênionico (pH), acidez do solo (SMP), acidez potencial ou total, (H+Al, $cmol_c\ dm^{-3}$), cálcio (Ca^{+2} , $cmol_c\ dm^{-3}$), magnésio (Mg^{+2} , $cmol_c\ dm^{-3}$), soma de bases (SB, $cmol_c\ dm^{-3}$) e saturação de base (V, %) do solo no primeiro ano de avaliação na linha em relação aos tratamentos avaliados

Tratamento	MO	P	K^+	pH	SMP	H+Al	Ca^{+2}	Mg^{+2}	SB	V%
Testemunha	36,14 ^a	7,14 ^{ns}	0,25 ^{ns}	6,40 ^{ns}	6,75 ^{ns}	2,99 ^{ns}	10,68 ^{ns}	2,15 ^{ns}	13,14 ^{ns}	81,15 ^{ns}
Subsolagem	36,24 a	7,45	0,26	6,14	6,63	3,13	9,88	2,01	12,16	78,91
Sub. C.15-30 cm	31,16 a	4,73	0,26	6,18	6,56	3,37	9,53	2,21	12,00	77,55
Sub. C.30-40 cm	30,74 a	6,62	0,29	6,25	6,62	3,25	9,60	2,11	12,00	77,86

*Médias com letras minúsculas diferentes na mesma coluna diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey; Médias com letras maiúsculas diferentes na mesma linha diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Fonte: Autoria própria (2022)

As variáveis, pH, SMP, H+Al, Mg^{+2} e V% do solo no primeiro ano de avaliação na linha em relação a profundidade, não apresentou significância. Para os tratamentos MO, P, K, Ca^{+2} e SB houve efeito significativo (Tabela 10).

A profundidade de 0,00 a 0,05 m do solo apresentou maior teor de MO, isso porque em um SPD manejado adequadamente, temos um maior aporte de carbono,

pela cobertura permanente do sistema e da decomposição da palha em superfície. Como se espera as camadas mais profundas não apresentam grandes teores de MO, por haver menor material orgânico originado de um sistema radicular menos desenvolvido e menor atividade biológica em subsuperfície.

Tabela 10 - Matéria orgânica (MO, g dm⁻³), fósforo (P, mg dm⁻³), potássio (K⁺ mg dm⁻³), potencial hidrogênionico (pH), acidez do solo (SMP), acidez potencial ou total, (H+Al, cmol_c dm⁻³), cálcio (Ca⁺², cmol_c dm⁻³), magnésio (Mg⁺², cmol_c dm⁻³), soma de bases (SB, cmol_c dm⁻³) e saturação de base (V, %) do solo no primeiro ano de avaliação na linha da passagem das hastes sulcadoras em relação a profundidade de avaliação

Prof. (m)	MO	P	K ⁺	pH	SMP	H+Al	Ca ⁺²	Mg ⁺²	SB	V%
0,00-0,05	46,45 a	13,88 a	0,47 a	6,28 ^{ns}	6,67 ^{ns}	3,07 ^{ns}	11,22 a	2,28 ^{ns}	13,96 a	81,92 ^{ns}
0,05-0,10	36,60 b	8,17ab	0,29 ab	6,23	6,64	3,19	10,84 ab	1,93	13,14 ab	80,03
0,10-0,20	27,12 bc	2,55 b	0,17 b	6,34	6,68	3,10	9,59 ab	2,18	11,94 ab	79,14
0,20-0,40	24,12 c	1,33 b	0,14 b	6,13	6,56	3,37	8,04 b	2,08	10,25 b	74,37

*Médias com letras minúsculas diferentes na mesma coluna diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey; Médias com letras maiúsculas diferentes na mesma linha diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Fonte: Autoria própria (2022)

A variação entre a primeira e a última camada de solo analisada foi de 46,45 g dm⁻³ e 24,12 g dm⁻³, respectivamente (Tabela 10). A dinâmica da MOS é o resultado da interação entre fatores ambientais e as interferências do homem no sistema. No SPD quanto menor a profundidade, maior a influência do aporte de C (DA SILVA. *et al*; 2012).

Para os nutrientes P, K⁺ e Ca⁺² o teor maior estava presente na camada de 0 a 5 cm passando a reduzir conforme o aprofundamento do solo, com teores nessa camada de P 13,88 mg dm⁻³, K⁺ 0,47 mg dm⁻³ e de Ca⁺² 11,22 cmol_c dm⁻³ (Tabela 10).

A soma de bases foi superior as demais profundidades na primeira porção de solo analisada. Na camada de 0,00-0,05 m foi de 13,96 cmol_c dm⁻³, sendo que na profundidade de 0,20-0,40 m a SB foi de 10,25 cmol_c dm⁻³ (Tabela 10).

Normal a SB ser superior nas primeiras camadas, devido esta camada possuir um pH de solo maior, devido a deposição de insumos corretivos em superfície no SPD, como calcário, e maior aporte de carbono por ocasião da decomposição da MOS, disponibilizando mais nutrientes para a solução do solo através da ciclagem no SPD.

Podemos avaliar que as amostras correspondentes na linha da passagem das hastes sulcadoras, nos demonstra uma normalidade dos valores, não havendo interferência do equipamento com o insumo depositado, na implantação do experimento de 1 ano.

4.1.3 Atributos químicos do solo no segundo ano de avaliação

A análise de solo para o segundo ano de avaliação demonstrou que para as variáveis pH, cálcio e soma de bases, apresentaram efeito significativo em relação aos tratamentos adotados. Ao avaliar a profundidade apresentaram efeito significativo os teores de MOS, P, K⁺, Ca⁺², Mg⁺², SB e V%. Não houve interação entre os fatores tratamento e profundidade do solo (Tabela 10).

As variáveis matéria orgânica (MO), acidez potencial ou total, (H+Al) e magnésio foram transformadas por raiz quadrada, apresentando valores significativos para a profundidade de avaliação para MO e Mg⁺², já a variável H+Al não apresentou efeito significativo para os tratamentos adotados (Tabela 11).

Tabela 11 - Graus de liberdade (G.L.) e quadrado médio (Q.M.) para as variáveis matéria orgânica do solo (MOS), fósforo (P), potássio (K⁺), potencial hidrogênionico (pH), acidez do solo (SMP), acidez potencial ou total, (H+Al), cálcio (Ca⁺²), magnésio (Mg⁺²), soma de bases (SB) e saturação de base (V%) do solo no segundo ano de avaliação

Causa da Variação	G.L.	QM									
		MOS	P	K ⁺	pH	SMP	H+Al	Ca ⁺²	Mg ⁺²	SB	V%
Bloco	3	369,05	22,33	0,28	5,14	2,46	11,53	6,54	1,03	12,50	349,62
Tratamento	4	48,95 ^{ns}	35,07 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,47*	0,12 ^{ns}	0,61 ^{ns}	3,51*	0,45*	6,40*	50,41 ^{ns}
Profundidade	3	1703,61*	457,54*	1,73*	0,34 ^{ns}	0,07 ^{ns}	0,50 ^{ns}	51,84*	0,72*	84,54*	230,98*
Trat. x Prof.	12	30,11 ^{ns}	15,57 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,06 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,42 ^{ns}	0,80 ^{ns}	0,06 ^{ns}	0,94 ^{ns}	14,40 ^{ns}
Erro	57	43,37	16,97	0,06	0,16	0,08	0,54	1,20	0,13	1,68	23,24
Média		38,3	6,34	0,38	6,1	6,56	3,38	10,57	2,08	13,05	79,05
C.V.(%)		17,2	67,97	61,42	6,55	4,22	21,79	10,37	16,99	9,94	6,10

** Significativo ao nível de 5% pelo teste F ($p > 0,05$); ^{ns} não significativo.

Fonte: Autoria própria (2022)

A dinâmica da matéria orgânica do solo é o resultado da interação entre os diversos fatores ambientais e as interferências do homem no sistema. No SPD quanto menor a profundidade, maior a influência do aporte de C (DA SILVA., *et al.*, 2012).

Quanto à relação do teor de MOS com o rendimento da soja, através de mapas de rendimentos obtidos em anos normais de precipitações, em um Latossolo Vermelho Distrófico, foram observados teores em torno de 4,1% na camada de 0,00-0,10 m, para uma máxima eficiência técnica. Presença na camada superficial, devido a maior quantidade de resíduos aportado ao solo. (LIMA FILHO, *et al.* 2014).

As classes de teores e saturação por alumínio indicadas para o Estado do Paraná, considera muito baixos teores abaixo de 0,3 cmol_c dm⁻³. Mais importante é a saturação por alumínio (m%), ideal abaixo de 5% na participação da CTC do solo. (SBCS-NEPAR, 2019).

Nessa área, não houve barreira química que impedisse o desenvolvimento das raízes das culturas de grãos e cobertura em rotação. O elemento alumínio não foi encontrado e a participação de acidez potencial (H+Al), são baixo os valores, características de um SPD manejado adequadamente.

A matéria orgânica presente no solo nas diferentes profundidades avaliadas demonstrou um gradiente de decréscimo partindo das camadas superficiais do solo em relação às camadas mais profundas, dentro da normalidade (Tabela 12).

Tabela 12 - Matéria orgânica (MO, g dm⁻³), fósforo (P, mg dm⁻³), potássio (K⁺, mg dm⁻³), potencial hidrogênionico (pH), acidez do solo (SMP), acidez potencial ou total, (H+Al, cmol_c dm⁻³), cálcio (Ca⁺², cmol_c dm⁻³), magnésio (Mg⁺², cmol_c dm⁻³), soma de bases (SB, cmol_c dm⁻³) e saturação de base (V, %) do solo no segundo ano de avaliação em relação a profundidade de avaliação

Prof. (m)	MO	P	K	pH	SMP	H+Al	Ca ⁺²	Mg ⁺²	SB	V%
0,00-0,05	49,67 a	13,04 a	0,79 a	6,28 ^{ns}	6,64 ^{ns}	3,17 ^{ns}	12,15 a	2,36 a	15,29 a	82,90 a
0,05-0,10	40,68 ab	6,30 ab	0,40 ab	6,13	6,54	3,45	11,31 a	2,07 a	13,77 ab	79,77 a
0,10-0,20	35,05 bc	3,90 b	0,23 b	6,01	6,58	3,37	10,44 ab	1,96 a	12,67 bc	78,89 a
0,20-0,40	27,81 c	2,12 b	0,11 b	6,00	6,50	3,54	8,40 b	1,95 a	10,46 c	74,66 a

*Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey

Fonte: Autoria própria (2022)

O teor de fosforo e potássio no solo apresentaram a mesma dinâmica em relação a profundidade do solo avaliada, onde na camada de 0,0-0,05 m, os valores são superiores em relação as demais profundidades, não diferindo da profundidade de 0,05-0,10 m. O cálcio apresentou valores superiores para as três primeiras camadas do solo com valores de 12,15; 11,31 e 10,44 cmol_c dm⁻³, nas camadas de 0,00-0,05 m, 0,05-0,10 m e 0,10-0,20 m do solo, respectivamente. O teor de magnésio no solo não foi influenciado pela profundidade de avaliação (Tabela 12).

A disponibilidade maior de fósforo nas camadas superficiais, é fruto de adubações contínuas no sulco de semeadura das culturas e pelo fato de que a MOS através de seus compostos orgânicos, possuem a capacidade de reduzir a fixação desse elemento no solo, tornando-o mais disponível às plantas. A diminuição das concentrações dos nutrientes no perfil, dá-se pelo fato de um gradiente de fertilidade que diminui à medida que descemos no perfil do solo, devido às características dos nossos solos tropicais intemperizados, de baixa fertilidade original (EMBRAPA, 1997).

Grande parte do fósforo na camada superficial está adsorvido a MOS. Esse elemento não é parte dela, considerado fósforo orgânico, mas ligado com ela através de pontes de cátions podendo ser liberado ao sistema, tornando-o disponível às plantas (DICK, *et al.* 2009).

O pH do solo não variou de acordo com a profundidade do solo analisada, da mesma forma que não houve efeito significativo para H+Al, SMP e V%. A soma de bases apresentou valores menores nas camadas mais profundas, variando de 82,90% na camada de 0,00-0,05 m para 74,66 % na camada de 0,20-0,40 m (Tabela 12).

Para a cultura da soja, visando à obtenção de altos rendimentos, recomenda-se para o estado do Paraná, que a saturação por bases, seja superior à 70% em solos argilosos e 50-60% em solos arenosos (SBCS/NEPAR, 2019)

Solos com alto teor de argila e MOS, implica num aumento da CTC e consequentemente os valores do V% serão altos. Encontramos na área experimental um solo com textura argilosa (773 g kg⁻¹ de argila, 224 g kg⁻¹ de silte, e 3 g kg⁻¹ de areia). Isso justifica os altos teores de V% acima de 70% no perfil desse solo.

Em relação aos tratamentos a MO não apresentou efeito significativo, variando de 41,13 g dm⁻³ no tratamento em que foi aplicado cálcio em superfície e 36,54 na testemunha (Tabela 7). Os tratamentos adotados também não influenciaram na acidez pelo índice SMP e pela acidez total, bem como em relação a soma das bases. Apenas a saturação por bases foi superior onde o tratamento com subsolagens nas camadas de 0,30-0,40 m foi adotada (Tabela 13).

Tabela 13 - Matéria orgânica do solo (MOS, g dm⁻³), fósforo (P, mg dm⁻³), potássio (K⁺, mg dm⁻³), potencial hidrogênionico (pH), acidez do solo (SMP), acidez potencial ou total, (H+Al, cmol_c dm⁻³), cálcio (Ca⁺², cmol_c dm⁻³), magnésio (Mg⁺², cmol_c dm⁻³), soma de bases (SB, cmol_c dm⁻³) e saturação de base (V, %) do solo no segundo ano de avaliação em relação aos tratamento adotados

Tratamento	MOS	P	K ⁺	pH	SMP	H+Al	Ca ⁺²	Mg ⁺²	SB	V%
Testemunha	36,54 ^{ns}	7,24 a	0,35 ^{ns}	6,03 a	6,49 ^{ns}	3,58 ^{ns}	9,93 a	1,94 a	12,22 a	76,96 d
Ca(OH) ₂ em superfície	41,13	5,14 b	0,45	6,16 a	6,60	3,24	10,98 a	2,20 a	13,63 a	80,38 ab
Subsolagem	38,45	6,38 ab	0,37	6,17 a	6,58	3,38	10,62 a	2,04 a	13,09 a	79,06 bc
Sub.corret. 15-30 cm	38,11	4,67 b	0,4	5,85 a	6,46	3,57	10,29 a	1,92 a	12,62 a	77,69 cd
Sub.corret. 30-40 cm	37,26	8,27 a	0,33	6,31 a	6,68	3,14	11,04 a	2,31 a	13,67 a	81,22 a

*Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Fonte: Autoria própria (2022)

Analisando os valores da Tabela 12, podemos observar um valor de 81,22% da saturação de bases na camada de 0,30-0,40 m, diferindo dos demais tratamentos, com exceção do tratamento com cálcio na superfície. Esse valor encontrado nessa camada de 0,30-0,40 m, indica que o houve a deposição do produto pelo equipamento Fertillus 700, e por isso o valor alto de V%. Essa observação corrobora com Piccin, *et al.* (2019), ao observar aumento de pH em subsuperfície e aumento dos teores de Ca⁺

e Mg^{2+} , ao utilizar uma fonte de alta solubilidade contendo esses nutrientes e aplicados com equipamento similar.

Os teores de fósforo foram maiores na testemunha, assim como na realização da subsolagem corretiva nas camadas de 0,30-0,40 m, apresentando teores de 7,24 e 8,27 $mg\ dm^{-3}$, respectivamente, mas não são diferentes estatisticamente. Para os teores de K^+ , Ca^{+2} e Mg^{+2} não sofreram efeito significativo dos tratamentos utilizados.

4.2 Produtividade de massa seca da aveia

A massa seca da aveia foi determinada para caracterização da área, na instalação do experimento em agosto de 2020 e após 14 meses em outubro de 2021. A massa seca inicial foi determinada em toda a área do estudo para caracterização do volume em quilos por hectare extrapolado, presente nos tratamentos (Tabela 14).

Tabela 14 - Graus de liberdade (G.L.) e quadrado médio (Q.M.) para a variável massa seca da aveia ($Mg\ ha^{-1}$) após a aplicação dos tratamentos de subsolagem e aplicação de hidróxido de cálcio em superfície (2021).

Causa da Variação	GL	QM
		MS
Bloco	3	1,68
Tratamento	4	0,50 ^{ns}
Erro	12	1,23
Média		4,50
C.V. (%)		24,67

** Significativo ao nível de 5% pelo teste F ($p>0,05$); ^{ns} não significativo.

Fonte: Autoria própria (2022)

No segundo ano, a avaliação foi realizada para cada um dos tratamentos, com o objetivo de avaliar a produção de massa seca, sob efeito dos diferentes tratamentos. Os tratamentos aplicados não apresentaram diferença significativa para massa seca da aveia avaliada (Tabela 14).

A avaliação da massa seca da aveia no primeiro ano de instalação do experimento, foi realizada conforme determinação, na área dos blocos em que seriam aplicados os experimentos. A média inicial de produção de aveia na área foi de 5,4 $Mg\ ha^{-1}$ de matéria seca.

No segundo ano, após 14 meses da aplicação dos tratamentos a média da massa seca produzida pela aveia para a testemunha foi de 4,4 $Mg\ ha^{-1}$ de MS. No tratamento em que foi realizada a subsolagem a produção de MS foi de 4,8 $Mg\ ha^{-1}$, para a subsolagem corretiva de 0,30-0,40 m e de 0,15-0,30 m, com valores de massa seca de 3,9 $Mg\ ha^{-1}$ e 4,8 de $Mg\ ha^{-1}$ aveia, respectivamente. A MS da aveia produzida

após a aplicação hidróxido de cálcio em superfície foi de 4,8 Mg ha⁻¹ de matéria seca (Tabela 15).

Tabela 15 - Massa seca da aveia (Mg ha⁻¹) após a aplicação dos tratamentos (14 meses após).

Tratamento	Massa seca (Mg ha ⁻¹)
Testemunha	4,39 ^{ns}
Ca(OH) ₂ em superfície	4,82
Subsolagem	4,49
Subsolagem corretiva 15-30 cm	4,83
Subsolagem corretiva 30-40 cm	3,99

*Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Fonte: A autoria própria (2022)

A aveia preta é mais comumente utilizada, por atender diversas características desejáveis em uma cultura de cobertura, tais como: produzir grande quantidade de matéria seca (MS), uma boa cobertura do solo e fácil adaptação em diferentes classificações de solos. Além de possuir no mercado sementes disponíveis e de baixo custo, apresenta um sistema radicular vigoroso, servindo para abertura de porosidade e agregação do solo (SALTON *et al.*, 1998).

A aveia preta desenvolveu-se no seu segundo ano, sob um baixo regime pluviométrico (Figura 2), justificando uma menor produtividade de massa seca. Não houve diferença significativa para os diferentes tratamentos. É uma das plantas de cobertura mais cultivadas no Sul do Brasil. Seu uso é recomendado, assim como outros mix de plantas de serviço, para a agregação do solo, após a intervenção de equipamentos mecânicos para prolongar o efeito da descompactação (AMADO *et al.*, 2015).

4.3 Produtividade do feijão

A produtividade do feijão foi avaliada por meio da massa de mil grãos (MMG) do feijão não apresentou diferença significativa quando comparamos os tratamentos adotados na área. Da mesma forma, a produtividade não sofreu influência significativa para os tratamentos adotados no cultivo do feijão (Tabela 16).

O MMG do feijão variou de 207,90 g e 217,55 g, para os tratamentos em que foi aplicada a subsolagem corretiva 0,30-0,40 m e a subsolagem corretiva 0,15-0,30 m, respectivamente. Os demais tratamentos tiveram médias de MMG de 214,33 g, 213,63 g e 212,81 g, nos tratamentos cálcio em superfície, subsolagem e testemunha, respectivamente (Tabela 17).

Tabela 16 - Graus de liberdade (G.L.) e quadrado médio (Q.M.) para as variáveis massa de mil grãos de feijão (g) e produtividade (Mg ha⁻¹) do feijão no ano de 2021.

Causa da Variação	GL	QM	
		Peso de mil grãos	Produtividade
Bloco	3	252,55	0,46
Tratamento	4	48,60 ^{ns}	0,24 ^{ns}
Erro	12	213,87	0,13
Média		213,24	2,35
C.V. (%)		6,86	15,25

** Significativo ao nível de 5% pelo teste F ($p > 0,05$); ^{ns} não significativo.

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 17 - Massa de mil grãos de feijão (MMG, g) e produtividade (Prod., Mg ha⁻¹) do feijão após a aplicação dos tratamentos de subsolagem e aplicação de cálcio em superfície (2021).

Tratamento	MMG	Prod
Testemunha	212,81 ^{ns}	2,28 ^{ns}
Ca(OH) ₂ em superfície	214,33	2,69
Subsolagem	213,63	2,15
Subsolagem corretiva 15-30 cm	217,55	2,12
Subsolagem corretiva 30-40 cm	207,90	2,50

^{ns} não significativo

Fonte: Autoria própria (2022)

O feijão apresentou maior produtividade para o tratamento em que foi aplicado o cálcio em superfície com produção de 2,69 Mg ha⁻¹, apesar de variar entre os tratamentos em aproximadamente 570 quilos por hectares, não houve diferença significativa entre os tratamentos adotados conforme a Tabela 16.

4.4 Produtividade da soja

A cultura da soja apresentou diferença significativa para altura das plantas da soja (Tabela 18) no primeiro ano de cultivo. Para os componentes de rendimento, não houve diferenças significativas para as variáveis massa fresca, massa seca, massa seca da planta inteira (Tabela 18), número de ramificações, número de vagens por planta, número de grãos por planta, número de grãos por vagem e número de plantas por hectare (Pla ha⁻¹) segundo a análise de variância (Tabela 19). As variáveis produtividade e massa de mil grãos também apresentaram diferença significativa (Tabela 18, 19 e 20) no primeiro ano de cultivo.

Tabela 18 - Graus de liberdade (G.L.) e quadrado médio (Q.M.) para as variáveis altura da planta (AP, cm), número de ramificações, número de vagens por planta (NV/P), número de grãos por planta (NG/P), número de grãos por vagem (NG/V) e número de plantas por hectare (Pla ha⁻¹) de soja no ano I (2021).

Causa da Variação	G.L.	QM					
		AP	NR	NV/P	NG/P	NG/V	Pla ha ⁻¹
Bloco	3	0,02	3,23	310,70	2630,80	0,01	1018,05
Tratamento	4	0,03*	0,94 ^{ns}	182,76 ^{ns}	1070,34 ^{ns}	0,00 ^{ns}	657,93 ^{ns}
Erro	12	0,00	0,47	65,09	409,95	0,00	790,76
Média		1,04	4,48	74,42	184,08	2,48	270,05
C.V. (%)		5,01	15,35	10,84	59,12	2,55	10,41

** Significativo ao nível de 5% pelo teste F ($p>0,05$); ^{ns} não significativo.

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 19 - Graus de liberdade (G.L.) e quadrado médio (Q.M.) para a variáveis massa fresca (MF, g), massa seca (MS, g) e massa seca da planta inteira (MSPI, g) no ano II (2022).

Causa da Variação	GL	QM		
		MF	MS	MSPI
Bloco	3	1237,64	42,56	2090,57
Tratamento	4	958,22 ^{ns}	46,74 ^{ns}	507,57 ^{ns}
Erro	12	1383,32	129,74	2521,01
Média		151,79	78,68	235,60
C.V. (%)		24,50	14,48	21,31

** Significativo ao nível de 5% pelo teste F ($p>0,05$); ^{ns} não significativo.

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 20 - Graus de liberdade (G.L.) e quadrado médio (Q.M.) para as variáveis produtividade e massa de mil grãos de soja em duas safras (Ano I – 2021 e Ano II – 2022).

Causa da Variação	GL	QM			
		Produt. 1º ano	Produt. 2º ano	MMG 1º ano	MMG 2º ano
Bloco	3	0,16	0,702093	60,525093	32,584
Tratamento	4	0,18*	0,630167 ^{ns}	273,97309*5	7,888 ^{ns}
Erro	12	0,04	0,352242	56,202167	15,05067
Média		1,87	2,05	158,61	133,22
C.V. (%)		10,48	28,98	4,73	2,91

** Significativo ao nível de 5% pelo teste F ($p>0,05$); ^{ns} não significativo.

Fonte: Autoria própria (2022)

A cultura da soja apresentou diferença significativa apenas para a produtividade, MMG e AP da soja no primeiro ano de cultivo. Para as variáveis NR, NV/P, NG/P, NG/V e Pla ha⁻¹ (Tabela 18) segundo a análise de variância não houve efeito significativo dos tratamentos.

A MS e MF não diferiu estatisticamente entre os tratamentos, apresentaram maiores média para a subsolagem em profundidade de 0,15-0,30 m (Tabela 21). A massa de planta inteira ao contrário dos demais tratamentos aplicados apresentou maior massa seca de planta inteira para as parcelas em que estavam a testemunha

Tabela 21 – Massa fresca (MF, g), massa seca (MS, g), massa seca de planta inteira (MSPI, g) e da soja após a aplicação dos tratamentos de subsolagem e aplicação de hidróxido de cálcio em superfície no primeiro ano (Ano I - 2021).

Tratamento	MF	MS	MSPI
Testemunha	163,32 ^{ns}	79,09 ^{ns}	252,81 ^{ns}
Ca(OH) ₂ em superfície	139,33	75,51	223,12
Subsolagem	152,25	79,51	228,58
Subsolagem corretiva 15-30 cm	170,34	83,78	235,35
Subsolagem corretiva 30-40 cm	133,74	75,54	238,15

Fonte: A autoria própria (2022)

A ausência de diferença significativa entre os tratamentos para a MF e MS, provavelmente foi porque o ambiente de desenvolvimento de um SPD mais consolidado na área do experimento, não teve limitação física e química ao desenvolvimento vegetativo da cultura nos diferentes tratamentos. Se olharmos o valor da MSPI na testemunha (Tabela 21) que apresenta o maior peso que os demais, mesmo não sendo significativo, observamos um desenvolvimento normal que corrobora com o ambiente característico do SPD.

A altura de plantas foi superior para a aplicação de cálcio em superfície em relação aos demais tratamentos utilizados (Tabela 22).

Tabela 22 – Altura da planta (AP, cm), número de ramificações, número de vagens por planta (NV/P), número de grãos por planta (NG/P), número de grãos por vagem (NG/V), massa de mil grãos (g) e número de plantas por hectare (Pla ha⁻¹) de soja após a aplicação dos tratamentos de subsolagem e aplicação de cálcio em superfície no primeiro ano de cultivo

Tratamento	AP	Nº R	NV/P	NG/P	NG/V	Pla ha ⁻¹
Testemunha	1,11 ab	3,97 ^{ns}	68,69 ^{ns}	173,59 ^{ns}	2,52 ^{ns}	266,67 ^{ns}
Ca(OH) ₂ em superfície	1,15 a	3,97	70,28	172,34	2,48	250,00
Subsolagem	1,02 bc	4,97	77,41	189,50	2,47	272,22
Sub corretiva 15-30 cm	0,98 c	4,63	84,94	210,53	2,47	277,78
Sub corretiva 30-40 cm	0,96 c	4,88	70,78	174,41	2,46	283,33

*Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. ^{ns}Não significativo.

Fonte: A autoria própria (2022)

O mesmo comportamento ocorreu para as variáveis massa de mil grãos e produtividade (Tabelas 22 e 23). Isso indica que os tratamentos que proporcionaram menor valor de altura de planta, massa de mil grãos e produtividade de soja foram os tratamentos em que foram utilizadas a subsolagem de 0,30-0,40 m e de 0,15-0,30 m, não diferindo estatisticamente da realização apenas da subsolagem. A altura de plantas das parcelas que não receberam a intervenção mecânica, a testemunha e a aplicação de Ca(OH)₂ em superfície em superfície, nos indica um desenvolvimento

normal vegetativo superior aos tratamentos onde entrou o equipamento, na soja no primeiro ano de cultivo.

O tratamento que recebeu a aplicação do corretivo somente em superfície na dosagem de 1 Mg ha⁻¹, de uma fonte altamente solúvel, pode ter contribuído para o aumento do pH do solo e liberação de nutrientes em uma zona de desenvolvimento inicial de raízes próximo à superfície, contribuindo para esta diferença de altura de plantas entre os demais tratamentos. O mesmo comportamento ocorreu para as variáveis massa de mil grãos e produtividade, onde ambas as variáveis significativas indicam que os tratamentos que proporcionaram menor valor de altura de planta, massa de mil grãos e produtividade de soja foram os tratamentos subsolagem de 0,30-0,40 m e de 0,15-0,30 m, não diferindo estatisticamente da realização apenas da subsolagem.

Não houve diferença significativa para os componentes de rendimento, NR, NV/P, NG/V, Pla ha⁻¹, provavelmente devido à área onde foi instalado o experimento estar estruturada e sem a presença de uma barreira de compactação física e química. As análises de solos para a caracterização da área e após 14 meses, não apresentaram alumínio tóxico (Al³⁺), o que refletiu uma baixa acidez potencial (H+Al), conforme Tabelas 9, 10, 12 e 13.

Tabela 22 – Produtividade (Prod., Mg ha⁻¹) e massa de mil grãos (MMG, g) de soja em duas safras (Ano I – 2021 e Ano II – 2022).

Tratamentos	Prod, 1º ano	Prod, 2º ano	MMG 1º ano	MMG 2º ano
Testemunha	1,61 b	2,22 ^{ns}	147,66 b	134,20 ^{ns}
Ca(OH) ₂ em superfície	1,86 ab	1,77	159,42 ab	134,20
Subsolagem	1,79 ab	2,64	159,47 ab	130,80
Subsolagem corret. 15-30 cm	2,19 a	1,64	155,83 ab	133,50
Subsolagem corret. 30-40 cm	1,88 ab	1,97	170,65 a	133,4

*Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey, ^{ns}Não significativo,

Fonte: Autoria própria (2022)

As produtividades da soja foram afetadas pelo déficit hídrico durante o período de formação de grãos, conforme dados da estação meteorológica da UTFPR-DV, onde foi instalado o experimento (APÊNDICE E).

A produtividade da soja na primeira safra avaliada apresentou variação de 2,19 Mg ha⁻¹ no tratamento em que houve a subsolagem a profundidade de 0,15 a 0,30 m do solo. O tratamento considerado testemunha não aumentou a produtividade em comparação com os demais tratamentos com produção de 1,61 Mg ha⁻¹. No

segundo ano a produtividade não foi significativa apesar de haver variação de 2,64 a 1,64 Mg ha⁻¹ (Tabela 23).

A massa de mil grãos para o segundo ano avaliado também não apresentou diferença significativa entre os tratamentos adotados, os resultados obtidos demonstram que a testemunha e a aplicação de hidróxido de cálcio em superfície apresentaram a mesma média de peso com 134,2 g. já a aplicação apenas da subsolagem apresentou o menor resultado com MMG de 130,8 gramas (Tabela 23).

No segundo ano a produtividade da soja não foi significativa (Tabela 23).

Em relação à fonte de Ca²⁺ corretiva, a cultura da soja não respondeu significativamente à aplicação dos tratamentos, possivelmente em função dos teores iniciais de Ca²⁺ presentes no solo, na implantação do experimento, conforme caracterização da testemunha (Tabelas 8 e 9).

Para Ribeiro, *et al* (1999), as concentrações desse nutriente acima de 4 cmol_c dm⁻³ é considerado muito bom no solo. Outros autores também elucidaram o efeito da aplicação de fontes de Ca²⁺ e Mg⁺² em cultivos. Entre esses, Cobucci et al. (2012), observaram que a aplicação de Cal Super® e Mag Flo® dentro do sulco de plantio, junto à semente, proporcionou aumento na massa de mil grãos de feijão, mesmo que as diferenças não tenham sido significativas, corroborando com os resultados deste trabalho.

Apesar de haver melhorias nos atributos físicos do solo, essa não refletiu nas produtividades das culturas de grãos e cobertura vegetal, que ratificasse a viabilidade econômica desse tipo de equipamento em solos de textura argilosa e SPD de 15 anos de manejo.

Onde não existe a barreira física e química, fica a questão sobre a eficiência da operação, apesar de que esse tipo de equipamento poderá ser influente em um solo com essa problemática, para criar um ambiente favorável à descida do sistema radicular em busca de água numa condição de impedimento físico e químico.

5 CONCLUSÕES

Após 12 meses à intervenção mecânica nos tratamentos de subsolagem, as leituras de RP ficaram abaixo de 2 MPa, sendo que este critério não era fator limitante ao desenvolvimento das culturas utilizadas no sistema de manejo.

Apesar de haver melhoria nas condições físicas do solo com relação a Ma, Mi, PT e Ds do solo, 14 meses após a intervenção mecânica, essas variáveis não refletiram significativamente para MS de aveia preta, produtividade do feijão, e soja safra segundo ano entre os tratamentos.

A produtividade da soja no primeiro ano de avaliação, apresentou significância no tratamento em que houve a subsolagem corretiva na profundidade de 0,15 a 0,30 m do solo em relação à testemunha.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Houve melhoria das condições físicas após 14 meses onde houve intervenção mecânica, porém não foram significantes para o aumento da produtividade nas culturas de grãos em rotação e cobertura vegetal.

As análises de solo, não demonstraram nitidamente a deposição da fonte corretiva, ao longo do perfil do solo na linha e nas fissuras na entrelinha da passagem do equipamento, conforme afirma o fabricante, havendo necessidade de um estudo maior para a deposição do produto no perfil pelas hastes sulcadoras.

Como o solo da área não era compactado e não tinha problema de acidez potencial em subsuperfície, é questionável o uso desse equipamento com esta finalidade, se não houver o diagnóstico da necessidade de intervenção mecânica.

Para um SPD consolidado, recomenda-se fazer um diagnóstico primeiro da área, através de levantamento de RP e parâmetros físicos de solos, para emitir uma recomendação pontual de escarificação ou subsolagem, baseado em dados.

Em um SPD consolidado, as plantas de cobertura, fazem esse serviço de melhoria do perfil do solo, sem a necessidade de entrada de subsoladores e escarificadores, que aumentam os custos e não possuem efeito desejável para o perfil de um Latossolo Vermelho sob SPD manejado por 15 anos.

Quando o diagnóstico apontar a necessidade de utilizar esse tipo de equipamento, a área deverá estar manejada sob plantas de cobertura, para prolongar o efeito através da agregação do solo.

É preciso fazer mais estudos com outros tipos de texturas de solos em regiões tropicais, onde a problemática da compactação e acidez do solo, sejam relevantes, para avaliar a viabilidade econômica do equipamento.

REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, p.711-728, 2013.
- ALCARDE, J. C. **Corretivos da acidez do solo**: Características e interpretações técnicas. São Paulo: ANDA - Boletim Técnico 6, 2005, 24 p.
- AMADO, T.J.C. *et al.*; Projeto Aquarius 15 anos: Principais resultados do mais longo Projeto de Agricultura de Precisão do Brasil. **Revista Plantio Direto**, v. 1, 2015, p. 28-43.
- ALVAREZ, V. V. *et al.* **Interpretação dos resultados das análises de solos**. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G. & ALVAREZ V., V. H., ed. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5ª Aproximação. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p.25 -32.
- ALVES, M.C.; CABEDA, M.S.V. Infiltração de água em um Podzólico Vermelho-Escuro sob dois métodos de preparo, usando chuva simulada com duas intensidades. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 753-761, 1999.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3.ed. Editora Bookman, Porto Alegre, 2013, 686 p.
- BRUCE, C. B. *et al.* Visual soil evaluation: A summary of some applications and potential developments for agriculture. **Soil & Tillage Research**, n.11, 2016.
- BENGOUGH, A. G.; MULLINS, C. E. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. **Journal of Soil Science**, v. 41, p. 341-351, 1990.
- BENGOUGH, A. G. *et al.* Root elongation, water stress and mechanical impedance: A review of limiting stresses and beneficial root tip traits. **Journal of Experimental Botany**, v. 62, n. 1, p. 59-68. 2011.
- CAIRES, E. F. *et al.* Calagem na superfície em sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 1, p. 161-169; 2000.
- CAMARA, R. K.; KLEIN, V. A.; Escarificação em plantio direto como técnica de conservação do solo e da água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 5, p. 789-796, 2005.
- CONAB, 2021. **11º Levantamento – Safra 2020/2021**. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>> Acesso em 01/09/2021.
- CRUSCIOL, C. A. C. *et al.* Taxas de decomposição e de liberação de macronutrientes da palhada de aveia preta em plantio direto. **Bragantia**, v. 67, n. 2, p. 481-489, 2008.
- CRUZ, C.D. **Programa GENES: aplicativo computacional em genética e estatística (software)**. Viçosa: Imprensa Universitária, 2013. 442p.

COBUCCI, T. *et al.* **Produtividade do feijoeiro em razão da adubação de cálcio e magnésio no sulco de semeadura.** In: CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA DE FEIJÃO. 10., 2011. Anais. Goiânia: Embrapa Arroz e Feijão, 2011.

DA SILVA, V.; *et al.* Melhoria da estrutura de um Latossolo por sistemas de culturas em plantio direto nos Campos Gerais do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, v. 3, n. 3, p. 983-992, jun. 2012.

DALLA NORA, D. **Melhoria dos atributos químicos da camada de enraizamento e seu efeito sobre a produtividade das culturas em Sistema Plantio Direto.** 2017. Tese (Doutorado em Ciência do Solo)– Programa de Pós-graduação em Ciências do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.

DENARDIN, *et al.* Converter plantio direto em sistema plantio direto – um modelo à sustentabilidade agrícola. In: REUNIÃO DA COMISSÃO BRASILEIRA DE PESQUISA DE TRIGO E TRITICALE, 12., 2018, Passo Fundo. **Ata e Resumos...** Passo Fundo: Projeto Passo Fundo, 2019. Solos e Nutrição Vegetal, p. 568-572.

DICK, D.P. *et al.* **Química da matéria orgânica do solo.** In: MELO, V.F. & ALLEONI, L.R.F., eds. Química e mineralogia do solo. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. p.1-67.

DRESCHER, M. S. *et al.* Duração das alterações em propriedades físico-hídricas de Latossolo Argiloso decorrentes da escarificação mecânica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v, 51, n, 2, p, 159-168, 2016.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** 5ª ed. Brasília: Embrapa – CNPS, 2018.

FEIJÃO, 12., 2017, Piracicaba. **Produtividade e sustentabilidade da cultura do feijão: do campo para a mesa:** Resumos. Piracicaba: CENA: IAC, 2017.

FLOSS, E. L. **Fisiologia das plantas cultivadas: O estudo que está por trás do que se vê.** 5 ed. Passo Fundo: Editora UPF. 2011. 734 p.

FLOSS, E. L. **Maximizando o rendimento da soja: Ecofisiologia, Nutrição e Manejo.** 2. Ed. Passo Fundo: Editora Aldeia Sul. 2022. 416 p.

FEDERAÇÃO BRASILEIRA DE PLANTIO DIRETO NA PALHA. **Histórico.** Disponível em: <https://febrapdp.org.br/historico>. Acesso em: 30 jan. 2022.

GIRARDELLO, V.C. **Qualidade física de um solo sob plantio direto submetido à escarificação de sítio específico e o rendimento da soja.** Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo)– Programa de Pós-graduação em Ciências do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

GIRARDELLO, V.C. *et al.* Alterações nos atributos físicos de um latossolo vermelho sob plantio direto induzidas por diferentes tipos de escarificadores e o rendimento da soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 2115-2126, 2011.

KLEIN, V. A. *et al.* Adaptação de um equipamento para a incorporação de calcário sob plantio direto. **Revista de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina**, v. 2, n. 6, 2007.

- LIMA FILHO, O. F. *et al.* **Adubação Verde e Plantas de Cobertura do Brasil: Fundamentos e Prática**. Editores Técnicos, Brasília, Embrapa 2014, v. 1, 507 p.
- LOPES, A. S.; GUIMARÃES, L. R. G. **Interpretação de Análises de Solos: Conceitos e Aplicações**. São Paulo: EDITORA, 2004. (ANDA: Boletim Técnico 2)
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**; London: Academic Press. 1995. 889p.
- MORAES, M. T. *et al.* **Critical limits of soil penetration resistance in a rhodic Eutrudox**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol.38, n.1, pp.288-298, 2014.
- MORAES, M. T. *et al.* **Soil CoMPaction IMPacts Soybean Root Growth in na Oxisol Form Subtropical**. Soil and Tillage Research, 2020.
- NEPAR, N. E. P. S.B.C.S.; PAULETTI, V.; MOTTA, A. C. V. **Manual de adubação e calagem para o estado do Paraná**. 2. ed. Editora Cubo, 2019. 289p.
- NICOLOSO, R. S., *et al.* Eficiência da escarificação mecânica e biológica na melhoria dos atributos físicos de um Latossolo muito argiloso e no incremento do rendimento de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 4, p. 1723-1734, 2008.
- PADILHA, H. C. *et al.* **Importância do consumo do feijão comum para o brasileiro**. In: Embrapa Arroz e Feijão-Resumo em anais de congresso (ALICE). In: CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA DE FEIJÃO, 12., 2017, Piracicaba. Produtividade e sustentabilidade da cultura do feijão: do campo para a mesa: resumos. Piracicaba: CENA: IAC, 2017.
- PASSIORA, J. B. Soil conditions and plant growth. **Plant, Cell and Environment**, v. 25, p. 311-318, 2002.
- PAULETTI, V. *et al.* Efeitos em longo prazo da aplicação de gesso e calcário no sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 495-505, 2014.
- PAULETTI, V.; VARGAS MOTTA, A. C. **Manual de adubação e calagem para o Estado do Paraná**. 2 ed. Curitiba: NEPAR-SBCS, 2019, 289 p.
- PICCIN, M. *et al.* Limitações físicas e químicas do subsolo para o aprofundamento radicular em Sistema de Plantio Direto. **Revista Agronomia Brasileira da Universidade Estadual Paulista**, v. 3, n. 3, 2019.
- PICCIN, M. **Estratégias de Manejo físico e químico para melhoria dos atributos da camada de enraizamento profunda em sistema plantio direto de qualidade**. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-graduação em Ciências do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.
- POTT, L. P. *et al.*; Mitigation of soil coMPaction for boosting crops productivity at varying yield environments in Southern Brazil. **Europeau Journal of Soil Science**, 2019.
- POSSAMAI, E. J. *et al.* **Adoption of the no-tillage system in Paraná State: A (re)view**. Revista Brasileira de Ciência do Solo [online]. 2022, v. 46 [Accessed 16 May

2022]: <<https://doi.org/10.36783/18069657rbc20210104>>. Epub 17 Jan 2022. ISSN 1806-9657. <https://doi.org/10.36783/18069657rbc20210104>.

PREZOTTI, L. C.; GUARÇONI, A. M. **Guia de Interpretação de Análise de Solo e Foliar**. Vitória: Incaper, 2013.

RANZANI, G. **Manual de levantamento de solos**. São Paulo, Edgard Blücher / Editora da Universidade de São Paulo, 2ª ed., 34 p, 1969.

REICHERT, J. M. *et al.* **Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils**. Soil and Tillage Research, v. 102, n 2, p. 242 – 254, 2009^a.

REICHERT, J. M. *et al.*; **Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas**. Revista Ciência e Ambiente, 27:29-48, 2003.

ROSOLEM, C.A. *et al.* **Sistema radicular e nutrição da soja em função da compactação do solo**. *Bragantia*. Instituto Agronômico de Campinas, Campinas v.53, n.2, p.259-266, 1994.

ROSOLEM, C.A. *et al.* **Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 34, n. 5, 1999.

SALVADOR, C. A. **Feijão - análise da conjuntura agropecuária**. Curitiba: DER/SAA, 2014.

SALTON, J. C. *et al.* **SISTEMA PLANTIO DIRETO: O produtor pergunta, a EMBRAPA responde**. Coleção 500 Perguntas, 500 Respostas, 1998.

SAKO, H. *et al.* CESB. Boletim Técnico n.1: **Relações de enraizamento e cálcio no solo para alta produtividade da Safra 15/16**. Sorocaba, 2015.

SAKO, H. *et al.* **Fatores decisivos para se obter produtividade de soja acima de 4.200 Kg / ha**. CESB: Sorocaba, 2016. Boletim Técnico n.2

SILVEIRA JÚNIOR, S. D. *et al.* Qualidade física de um Latossolo Vermelho sob plantio direto submetido à descompactação mecânica e biológica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 6, p. 1854-1867, 2012.

STORCK, L. *et al.* **Experimentação Vegetal**. 3. Ed. Santa Maria: Editora da UFSM, 2018, 200 p.

VILLAR, M. L. P. **Manual de interpretação de análise de plantas e solos e recomendação de adubação**. Cuiabá: EMPAER-MT, 2007. 182 p. (EMPAER-MT, Série Documentos, 35).

XU, C. H. *et al.* A transferable tight-binding potential for carbon. **Journal of physics: Condensed Matter**. 1992

ZIGLIO, C. M. *et al.* Formas orgânicas e inorgânicas de mobilização do cálcio no solo. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, v. 42, n. 2, 1999.

APÊNDICE A - Subsolagem corretiva



APÊNDICE B - Aplicação do corretivo em superfície



APÊNDICE C - Resistência à penetração



APÊNDICE D - Retirada de amostras do solo



APÊNDICE E - Cronograma do experimento

Cronograma	
Ago/20	Avaliação da MS da aveia em cobertura.
	Instalação do experimento.
	Coleta de solo para análises física e química
Set/20	Resistência à penetração (RP)
Out/20	Semeadura da soja (Ano I).
Fev/20	Coleta de plantas para componentes de rendimento da soja
Mar/21	Colheita da soja e avaliação de produtividade.
	Plantio do feijão em sucessão.
Jun/21	Colheita do feijão para avaliação de produtividade
	Semeadura da aveia em cobertura da área.
Set/21	Avaliação de MS da aveia em cobertura.
Out/21	Resistência à penetração (RP)
	Coleta de solo para análise física e química
	Semeadura da soja (Ano II)
Mar/22	Colheita da soja e avaliação de produtividade