

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CAMPUS FREDERICO WESTPHALEN  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA: AGRICULTURA  
E AMBIENTE

Felipe Puff Dapper

**ATRIBUTOS FÍSICOS E MECÂNICOS DE UM LATOSSOLO  
SUBMETIDO A DIFERENTES TEMPOS DE ESCARIFICAÇÃO EM  
SISTEMA PLANTIO DIRETO**

Frederico Westphalen, RS  
2020

**Felipe Puff Dapper**

**ATRIBUTOS FÍSICOS E MECÂNICOS DE UM LATOSSOLO SUBMETIDO A DIFERENTES  
TEMPOS DE ESCARIFICAÇÃO EM SISTEMA PLANTIO DIRETO**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia Agricultura e Ambiente da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Agronomia**.

Orientador: D.r Vanderlei Rodrigues da Silva

Frederico Westphalen, RS  
2020

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001

Dapper, Felipe Puff  
ATRIBUTOS FÍSICOS E MECÂNICOS DE UM LATOSSOLO  
SUBMETIDO A DIFERENTES TEMPOS DE ESCARIFICAÇÃO EM  
SISTEMA PLANTIO DIRETO / Felipe Puff Dapper.- 2020.  
70 p.; 30 cm

Orientador: Vanderlei Rodrigues da Silva  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Campus de Frederico Westphalen, Programa de Pós  
Graduação em Agronomia - Agricultura e Ambiente, RS, 2020

1. Plantio direto 2. qualidade física 3. compactação I.  
Rodrigues da Silva, Vanderlei II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

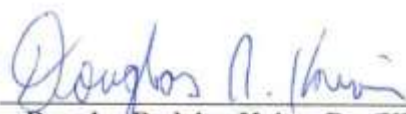
Felipe Puff Dapper

**ATRIBUTOS FÍSICOS E MECÂNICOS DE UM LATOSSOLO SUBMETIDO A  
DIFERENTES TEMPOS DE ESCARIFICAÇÃO EM SISTEMA PLANTIO DIRETO**

Dissertação de mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia Agricultura e Ambiente da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Agronomia**.

Aprovado em 20 de fevereiro de 2020:

  
Vanderlei Rodrigues da Silva, Dr. (UFSM)  
(Presidente/Orientador)

  
Douglas Rodrigo Kaiser Dr. (UFFS)

  
Rodrigo Ferreira da Silva Dr. (UFSM)

*A todos os amigos, professores da agronomia e estudantes da ciência do solo.*

**DEDICO...**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela minha dádiva da vida e pelo privilégio de conhecer pessoas incríveis com as quais posso contar em qualquer momento.

Aos meus pais Lira Puff Dapper e Airton Canisio Dapper por todo apoio e incentivo sem vocês eu jamais teria chegado até aqui, por isso sou muito grato a vocês que são os meus heróis.

A minha namorada Djaina Rieger que me acompanha, me apoia e me dá forças desde o momento em que entrou em minha vida. Agradeço por estar sempre ao meu lado, usando as palavras certas para me confortar e me manter confiante.

Ao professor Vanderlei Rodrigues da Silva pela amizade, por todas as orientações, pelo apoio e por todos os ensinamentos e conselhos valiosos que vou carregar comigo por toda vida.

Ao professor Douglas Rodrigo Kaiser pela amizade, por todos os momentos dedicados aos ensinamentos e por me incentivar a encarar novos desafios.

Ao professor Rodrigo Ferreira da Silva por todos os ensinamentos, experiências divididas e pela dedicação em compartilhar conhecimentos.

Aos meus amigos Andrea Giovenardi e Gerry Riecht por todos os momentos de diversão e de descontração, especialmente o Gerry que me acompanhou e auxiliou no início deste trabalho.

Quero deixar um agradecimento especial aos meus grandes amigos Felipe Bonini, Marcos Bonini e Daniel Aquino de Borba, a parceria com vocês foi muito importante pra mim, sou muito grato a vocês por me acompanharem nesse trabalho, jamais esquecerei da amizade e da admiração que tenho por vocês.

Agradeço aos meus amigos e colegas por todo apoio, cumplicidade e companheirismo Guilherme Araujo, Fábio Miguel Knapp e Fagner Augusto Rontani com os quais tive a oportunidade de dividir bons momentos.

Agradeço as minhas amigas e colegas Gabriela de Barros e Nádia Goergen pela companhia e pela oportunidade de dividir conhecimentos.

Quero deixar o meu muito obrigado aos integrantes do grupo de pesquisas do Laboratório de Física do Solo composto por Ijésica Luana Streck, Jovani Demarco, Ezequiel Fornari, Luis Fernando Bonini, Anna Felippi Mendes, Rodrigo Binello, Eloise Flores, Gilvan Ochoa, Sidnei Teixeira Bairros, Chaiane Basso, Francile Pavan Ourives. Sem o apoio de vocês eu jamais teria conseguido realizar este trabalho.

Deixo meu muito obrigado ao laboratorista Lucindo Somavila, por toda colaboração e ajuda na realização da pesquisa.

A gradeço a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão da bolsa durante o mestrado.

**AGRADEÇO A TODOS!**

## RESUMO

### ATRIBUTOS FÍSICOS E MECÂNICOS DE UM LATOSSOLO CONDUZIDO SOB DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO

AUTOR: Felipe Puff Dapper

ORIENTADOR: Vanderlei Rodrigues da Silva

A qualidade física do solo é de grande importância para o desenvolvimento das raízes das plantas, sendo assim áreas conduzidas sob plantio direto podem apresentar problemas de compactação acarretando em prejuízos aos cultivos realizados nestas áreas. O tráfego de máquinas é o principal agente causador da compactação, considerando que durante o ciclo de uma cultura a mesma área precisa ser trafegada várias vezes para que seja possível realizar os tratamentos culturais. Dessa forma as pressões exercidas pelo peso das máquinas causam deformações na estrutura do solo, expulsando o ar dos poros ocasionando a compactação, sendo que o principal fator que está relacionado a deformação da estrutura, é o conteúdo de água existente na matriz do solo, dessa forma quanto maior for o conteúdo de umidade do solo maior será a sua suscetibilidade a compactação. Solos compactados dificultam o desenvolvimento das raízes o que pode resultar em um pequeno volume de solo explorado prejudicando a absorção de nutrientes. O objetivo deste trabalho foi correlacionar os atributos físicos do solo, estimar modelos de capacidade de suporte de carga e estimar o intervalo hídrico ótimo (IHO) em diferentes áreas conduzidas sob plantio direto. A hipótese testada neste trabalho foi que o tempo de execução do plantio direto sem intervenção mecânica favorece a estruturação do solo garantindo que o solo seja mais resistente aos agentes causadores da compactação. Foram avaliadas cinco áreas sendo estas: plantio direto contínuo durante vinte anos (SPD 20), plantio direto contínuo durante dez anos (SPD10), plantio direto contínuo durante três anos (SPD 3), cultivo escarificado (Esc) e mata nativa (Mata). As amostras de solo foram coletadas em três camadas (0-0,5; 0,10-0,15; 0,25-0,30 m), os atributos físicos foram mensurados em laboratório, assim os modelos de capacidade de suporte de carga e intervalo hídrico ótimo foram estimados. Os atributos físicos do solo se alteram com o aumento do tempo de execução de plantio direto garantindo que o solo seja capaz de suportar uma maior carga. Para os valores de 3 e 3,5 MPa o SPD 20 apresentou IHO maior que zero, mostrando que o SPD 20 apresenta boas condições ao desenvolvimento de raízes.

Palavras-chave: Plantio direto, qualidade física, compactação.



## ABSTRACT

### PHYSICAL AND MECHANICAL ATTRIBUTES OF A OXISOL DRIVEN UNDER DIFFERENT MANAGEMENT SYSTEMS

AUTHOR: Felipe Puff Dapper  
ADVISOR: Vanderlei Rodrigues da Silva

The soil quality physical has great importance in the development of roots of the plants, therefore areas under no-tillage can present compaction problems result loss to crops grown in these areas. Machine traffic is the main causative agent of soil compaction, considering that during the cycle of a culture the same area needs to be trafficked several times in order to be able to carry out cultural treatments. Thus the pressures exerted by the weight of the machines cause deformations in the soil structure, expelling air from the pores causing densification the main factors that is related to the deformation of the structure is the water content in soil matrix, the higher the moisture content of the soil the greater its susceptibility to compaction. Compacted soils offer resistance to root development which can result in a small volume of explored soil impairing nutrient absorption. The objective of this work was to correlate the physical attributes of the soil, to estimate of load bearing capacity and to estimate last limiting water range (IHO) in different managements conducted under no-tillage. The hypothesis tested in this work was that the time of direct planting without mechanical intervention favors the structuring of the soil ensuring that the soil is more resistant to the agents the cause compaction. Five areas were evaluated namely: No-till for twenty years (SPD 20) no- for ten years (SPD 10), no-till for three years (SPD 3), chisel cultivation (Esc) and native forest (Mata). Soil samples were collected in three layers (0-5; 10-15; 25-30 cm), the physical attributes were measured in the laboratory, so the models of load bearing capacity in the last limiting water range. The physical attributes of the soil change with the increase in the time of no-tillage execution in ensuring that the soil is able to support aggregates load. For values of 3 and 3,5 MPa, the SPD 20 had and IHO greater than zero, showing that the SPD 20 has good conditions for root development.

Keywords:..No-tillage, physical quality, compaction

## LISTA DE TABELAS

### ARTIGO 2

- Tabela 1- Comparação das equações de regressão de compressibilidade entre as áreas avaliadas, utilizando o teste F para a comparação entre as áreas avaliadas e método proposto por Sari et al. (2018) para comparação dos parâmetros “a” e “b” entre as equações..... 40
- Tabela 2- Comparação das equações de regressão de compressibilidade entre as profundidades de amostragem, utilizando o teste F para as diferentes camadas da mesma área e método proposto por Sari et al. (2018) para a comparação dos parâmetros “a” e “b” entre as equações..... 43

### ARTIGO 3

- Tabela 1- Estimadores dos parâmetros de regressão para a resistência a penetração (RP), em função da umidade volumétrica do solo ( $\theta$ ), da densidade do solo (Ds) e da resistência a penetração restritiva (RP restritiva):  $RP = a.Ds^b.\theta^c$  ..... 55

## LISTA DE FIGURAS

### ARTIGO 1

Figura 1- Croqui dos pontos amostrais realizados em cada área.....	24
Figura 2- Relação entre o índice de vazios e a pressão aplicada no solo representada pela curva de compressão do solo .....	27
Figura 3- Compactação relativa das áreas estudadas, camada de 0-5 cm (a), camada de 10-15 cm (b), camada de 25-30 cm (c) .....	28
Figura 4- Correlação linear dos atributos físicos do solo com o tempo de execução do plantio direto contínuo sem perturbação mecânica da estrutura do solo. ....	29
Figura 5- Correlação linear dos atributos físicos do solo com o tempo de execução do plantio direto contínuo sem perturbação mecânica da estrutura do solo. ....	30

### ARTIGO 2

Figura 1- Modelos da capacidade de suporte de carga para diferentes camadas nos diferentes áreas avaliadas. Camada de 0 a 5 cm (a), camada de 10 a 15cm (b), camada de 25 a 30 cm(c) .....	42
Figura 2- Modelos da capacidade de suporte de carga para diferentes camadas de cada área avaliada .....	44

### ARTIGO 3

Figura 1- Variação do intervalo hídrico ótimo (IHO) em função da resistência a penetração considerada crítica. As setas indicam a densidade crítica e as e as linhas verticais indicam o intervalo de compactação relativa para a máxima produtividade das culturas. ....	56
Figura 2- Variação do IHO em função da compactação relativa e da densidade do solo.....	57
Figura 3- Valores médios do intervalo hídrico ótimo: (a) intervalo hídrico ótimo RP restritiva de 2,5 MPa; (b) intervalo hídrico ótimo RP restritiva de 3 MPa; (c) intervalo hídrico ótimo RP restritiva de 3,5 MPa .....	59
Figura 4- Variação do intervalo hídrico ótimo (IHO) no perfil de solo estudado entre o limite superior e inferior.....	60

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO GERAL .....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>ARTIGO 1: ATRIBUTOS FÍSICOS E TEMPO DE EXECUÇÃO DO PLANTIO DIRETO APÓS ESCARIFICAÇÃO .....</b>	<b>20</b>
2.1	RESUMO.....	20
2.2	ABSTRACT.....	20
2.3	INTRODUÇÃO .....	21
2.4	MATERIAL E MÉTODOS.....	23
2.4.1	Descrição dos locais de estudo .....	23
2.4.2	Análise das propriedades físicas do solo .....	24
2.4.3	Análise estatística .....	27
2.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	27
2.6	CONCLUSÃO .....	31
2.7	REFERÊNCIAS.....	31
<b>3</b>	<b>ARTIGO 2: SUSCETIBILIDADE A COMPACTAÇÃO DE UM LATOSSOLO SOB DIFERENTES TEMPOS DE PLANTIO DIRETO CONTÍNUO APÓS ESCARIFICAÇÃO .....</b>	<b>34</b>
3.1	RESUMO.....	34
3.2	ABSTRACT.....	34
3.3	INTRODUÇÃO .....	35
3.4	MATERIAL E MÉTODOS.....	39
3.4.1	Análises físicas .....	39
3.4.2	Análise Estatística .....	39
3.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	40
3.6	CONCLUSÃO .....	45
3.7	REFERÊNCIAS.....	45
<b>4</b>	<b>ARTIGO 3: ESTIMATIVA DO USO DE PLANTIO DIRETO CONTÍNUO APÓS A ESCARIFICAÇÃO SOBRE O INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO DE UM LATOSSOLO VERMELHO .....</b>	<b>50</b>
4.1	RESUMO.....	50
4.2	ABSTRACT.....	50
4.3	INTRODUÇÃO .....	51
4.4	MATERIAL E MÉTODOS.....	53
4.4.1	Análise física .....	53
4.4.2	Análise estatística .....	54
4.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	55
4.6	CONCLUSÃO .....	61

4.7	REFERÊNCIAS.....	61
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>65</b>
5.1	REFERÊNCIAS.....	67

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

A qualidade física do solo é de grande importância por estar relacionada ao crescimento de raízes para o suporte das plantas, trocas gasosas e atividade biológica (CHERUBIN et al. 2015), sendo que os indicadores utilizados em avaliações como a densidade e a macro e microporosidade possuem são dependentes da textura, (ROSSETTI; CENTURION, 2017).

O sistema plantio direto tem como princípios básicos o não revolvimento, rotação de culturas e manutenção de cobertura sobre a superfície do solo diferentemente dos demais sistemas de cultivo, onde são realizadas práticas que causam alguma alteração na estrutura do solo (ARVIDSSON; ETANA; RYDBERG, 2014). A prática do plantio direto tem como objetivo causar a menor perturbação possível na estrutura do solo dessa forma, é possível manter boas condições físicas ao desenvolvimento das plantas. Contudo é necessário que alguns cuidados sejam adotados com relação as práticas de manejo, pois é necessário que o solo seja sempre mantido com cobertura em sua superfície de forma que nos períodos de pousio, entre os cultivos das diferentes culturas o solo permaneça com palha sobre a superfície (DECHEN et al. 2015). A justificativa de manter o solo sempre coberto com plantas ou com palha é que a cobertura tem a função de proteger o solo contra os efeitos das gotas de chuva que quando impactam sobre a superfície causam desagregação da camada superficial, possibilitando que as partículas desagregadas sejam carregadas pela água que escoar na superfície, dando início ao processo de erosão, de modo que um dos principais fatores que pode evitar o início do processo erosivo é manter o solo sempre coberto, como forma de diminuir a velocidade das gotas de chuva que chegam até o solo (COMINO et al. 2016). Manejos que mantêm palha sobre a superfície do solo promovem outros efeitos sobre o solo além da proteção contra as gotas da chuva, a decomposição de todo material orgânico que contribui para a manutenção do conteúdo de carbono orgânico, sendo este um dos principais agentes na agregação do solo garantindo maior estabilidade estrutural e maior resistência aos agentes degradantes (NOVAK, et al 2019). Além de manter a atividade biológica a palha mantida sobre a superfície do solo pode proporcionar efeito de evitar compactação ocasionada pelo tráfego, considerando que produz o efeito de amortecer o peso e a pressão dos pneus sobre o solo e também aumenta a superfície de contato dos pneus com o solo, desta forma a pressão exercida pelas máquinas agrícolas se distribui em uma maior superfície de solo minimizando os efeitos da compactação pelo tráfego das máquinas (ROSIM, et al 2012).

As lavouras sob plantio direto são trafegadas intensivamente por máquinas agrícolas e a pressão exercida pelos pneus sobre o solo pode causar efeitos sobre a estrutura (STRECK et al. 2004). Áreas mantidas sob plantio direto apresentam maior grau de compactação na camada entre 10 a 15 cm de profundidade esse fenômeno acontece devido ao efeito do tráfego das máquinas agrícolas, pois as pressões aplicadas sobre a superfície do solo afetam a estrutura do até 30 cm de profundidade. Já nas camadas mais superficiais o solo apresenta menores valores de densidade onde raramente se apresenta compactado (FILHO et al. 2001).

Em situações em que o solo é considerado compactado apresentando restrições ao crescimento de raízes, ocorre redução no volume de solo explorado pelas raízes, uma vez que nestas condições as raízes se desenvolvem mais superficialmente no solo. Para minimizar os efeitos negativos da compactação a prática da escarificação ou subsolagem é utilizada para recuperação das condições físicas ideais ao crescimento radicular, entretanto esta prática não mantém seus efeitos por longo prazo, de forma que o solo tende a retornar ao estado compactado (DRESCHER et al. 2011). Sendo assim é necessário entender como a estrutura física do solo se comporta a longo prazo após a escarificação a fim de identificar se a compactação leva a densidade do solo a atingir o limite crítico para o desenvolvimento das raízes (MOREIRA et al. 2014).

Para realizar as atividades de cultivo o solo precisa ser trafegado, pois só assim é possível realizar a semeadura e colheita das culturas além dos tratos culturais realizados ao longo do ciclo das plantas, o conteúdo de água em que o solo se encontra está diretamente relacionado a suscetibilidade a compactação, de modo que conhecer a forma como a estrutura do solo é afetada pelo tráfego nos diferentes valores de umidade ajuda a entender em quais condições o solo se encontra mais suscetível ou mais resistente à compactação (SILVA et al. 2016).

A qualidade física do solo pode ser descrita de forma geral como a capacidade de proporcionar condições físicas adequadas ao desenvolvimento de raízes para as plantas cultivadas. Sendo assim, existem alguns atributos indicadores de qualidade que apresentam maior relação com o desenvolvimento de raízes, como porosidade que está relacionada com a aeração e retenção de água (CAVIGLIONE, 2018). A densidade do solo corresponde ao volume que uma determinada massa de solo ocupa apresentando correlação com principalmente com a porosidade total, uma vez que a quantidade de poros influencia diretamente sobre a densidade, sendo a densidade um indicador de qualidade amplamente utilizado para identificar a degradação física do solo (BERTOL et al. 2000).

Além da porosidade e da textura, o conteúdo de carbono orgânico também exerce influência sobre a densidade do solo. Solos com maior conteúdo de carbono orgânico apresentam menor densidade, pois a fração orgânica do solo é responsável por garantir menor densidade por apresentar menor massa quando comparada a fração mineral do solo (VIANA et al. 2011).

As variáveis densidade, porosidade e a resistência mecânica a penetração são utilizadas para indicar o estado de compactação e as condições que o solo proporciona ao crescimento radicular. O conteúdo de água do solo é o fator que apresenta maior relação com a resistência a penetração (BAIO et al. 2017). A resistência mecânica crítica que as raízes encontram para explorar o solo é variável entre as espécies de plantas, contudo de forma genérica é considerado que a resistência a penetração de 3 MPa é o valor de resistência crítica para solos de textura argilosa em sistema plantio direto (MORAES et al. 2014) a partir do qual as plantas não conseguem mais promover o desenvolvimento radicular, entretanto pode ser enfatizado que os valores de resistência a penetração crítica pode variar entre as diferentes espécies de plantas cultivadas em um intervalo entre 2 a 3,5 MPa (SINNETT et al. 2008; ROSOLEM et al. 1999; ASSIS et al. 2014; ).

Dessa forma qualidade física do solo pode ser determinada, principalmente, pela distribuição porosa e pelo conteúdo de carbono orgânico existente na matriz do solo, sendo que a porosidade exerce influência sobre a capacidade de retenção de água e o carbono orgânico exerce influência sobre a agregação do solo, de forma que os indicadores da qualidade física sempre estão relacionados a densidade (STEFANOSKI et al. 2013).

A estrutura do solo pode ser considerada como um indicador que representa qualidade de forma geral, pois a estrutura do solo envolve a densidade, porosidade, agregação e capacidade que o solo tem de permitir o crescimento de raízes (ARCOVERDE et al. 2018). A análise da estrutura de um solo pode ser feita de forma visual, sendo possível diagnosticar a qualidade de forma razoável e quantificar as condições que o solo se encontra (GIAROLA et al. 2009).

A porosidade de um solo é um indicador da qualidade por apresentar correlação com o desenvolvimento de raízes, de forma que a distribuição dos poros no solo define a qualidade. A macroporosidade corresponde aos poros com tamanho maior que 0,005 mm, considerando que o solo deve apresentar uma quantidade mínima de 10% de macroporos para que as raízes tenham uma boa aeração através da difusão de gases (GRABLE; SIEMER, 1968; DREWRY et al. 2008). A microporosidade que está relacionada com a capacidade de retenção de água e disponibilidade hídrica para as plantas, corresponde aos poros com tamanho menor que 0,005



mm, entretanto os poros extremamente finos com diâmetro inferior a 0,0002mm chamados de criptoporos retém água com grande energia de ligação de forma que as plantas não conseguem extrair a água do solo, dessa forma a distribuição da porosidade é um dos principais atributos relacionados a qualidade física (KLEIN; LIBARDI, 2002).

A densidade sendo um indicador amplamente utilizado capaz de demonstrar a qualidade do solo. Dessa forma a densidade é um indicador englobado em outros métodos que caracterizam a qualidade do solo, sobretudo nos métodos que envolvem a modelagem matemática das condições físicas do solo, onde o valor de densidade que o solo apresenta pode ser analisada em conjunto com outros indicadores a fim de expressar a qualidade de forma mais completa (BUSSCHER, 1990).

A resistência do solo a penetração é um indicador da qualidade física e que apresenta correlação com a densidade e porosidade e o conteúdo de umidade, todavia a resistência a penetração mecânica do solo é um indicador que está relacionado a condição que o solo apresenta para o crescimento de raízes, contudo não estima o grau de compactação do solo com tanta acurácia quanto a densidade e porosidade, mas ainda assim pode ser utilizado para quantificar a qualidade física em que o solo se encontra (OLIVEIRA et al. 2015). Da mesma forma que a densidade a resistência a penetração mecânica também pode ser englobada a outros métodos a fim de expressar a qualidade física do solo com maior complexidade (DIAS JR. et al 2004).

Os indicadores densidade, porosidade e a resistência mecânica a penetração em diferentes conteúdos de umidade podem ser integrados em um único método denominado intervalo hídrico ótimo que estima os valores de densidade que o solo pode apresentar sem que aconteça a restrição ao crescimento radicular (BUSSCHER, 1990).

A pressão de preconsolidação é um indicador que pode ser utilizado na quantificação da qualidade física do solo, apresentando correlação com a coesão do solo, sendo que para o método da resistência a penetração mecânica essa correlação com a coesão do solo é menos expressiva (LIMA et al. 2006). Dessa forma os valores de densidade e porosidade são correlacionados com a pressão de preconsolidação, mas este método utilizado para mensurar a pressão de preconsolidação possui a particularidade de demonstrar de forma mais expressiva o efeito que a coesão do solo pode apresentar (BRAIDA et al. 2010).

Os indicadores da qualidade física do solo são utilizados para demonstrar qual a condição que o solo apresenta de forma que, quando utilizados em conjunto, onde mais de um indicador é avaliado a qualidade física do solo pode ser determinada de forma mais satisfatória, podendo auxiliar na determinação de qual é a melhor estratégia de manejo que

deve ser adotada para que as plantas consigam apresentar um bom desenvolvimento radicular (ARAÚJO et al. 2012).

O manejo aplicado exerce influência sobre a densidade de forma que as atividades agrícolas podem ocasionar a degradação do solo, cultivo sob sistema plantio direto também pode ocasionar degradação da estrutura física, pois a compactação pode ser descrita pelo aumento da densidade que acontece devido diminuição do tamanho de poros e da macroporosidade da matriz do solo, todavia a intensidade do processo de compactação vai determinar a qualidade física do solo, onde o grau de compactação vai influenciar no crescimento das raízes (NUNES et al. 2015).

As áreas de plantio direto estão sujeitas a compactação, uma vez que são submetidas ao tráfego de máquinas pesadas que exercem pressão sobre a superfície, sendo que as operações de semeadura, colheita e tratos culturais são realizadas anualmente de forma que o solo destas áreas possui um histórico de cargas aplicadas sobre sua superfície, desta forma a condição estrutural é determinada pelas pressões aplicadas e pelo conteúdo de umidade que o solo apresenta no momento em que acontece o tráfego (AHMADI; GHOUR, 2015).

Para a compactação ocasionada pelo tráfego agrícola, a umidade do solo é o fator de maior importância a fim de determinar a suscetibilidade do solo a compactação, pois as moléculas de água funcionam como um lubrificante permitindo que as partículas do solo deslizem umas nas outras favorecendo a deformação da estrutura. Quando o solo apresenta um baixo conteúdo de umidade a coesão entre as partículas garante que o solo esteja menos suscetível a compactação e com isso é necessário a aplicação de uma maior carga para que a estrutura seja afetada, contrário ao que acontece quando o solo está com alto conteúdo de umidade onde o efeito da coesão é diminuído (PÉRTILE et al. 2016).

Após ocorrer a compactação é possível que o solo apresente resiliência pelos mecanismos de recuperação da estrutura e pela contração e expansão das argilas durante os ciclos de umedecimento e secagem que formam fendas no solo compactado, deste modo a passagem de ar e água é favorecida e as raízes acabam encontrando uma menor resistência (GUBIANI et al. 2015). O processo de resiliência do solo está relacionado a textura e ao tipo de mineral que compõem o solo, pois a resiliência para a recuperação da estrutura é dependente da expansividade da fração argila (PAIVA et al. 2016).

Assim, o diagnóstico da compactação do solo é um processo complexo, uma vez que vários fatores estão envolvidos devendo ser considerada a influência que cada propriedade do solo tem sobre a estrutura, onde os métodos devem ser utilizados de forma integrada para garantir maior coerência nos resultados.

As estratégias de manejo devem ser executadas de forma a evitar a compactação, utilizando a rotação de culturas com objetivo melhorar as condições físicas do solo, pois os diferentes tipos de sistemas radiculares que exploram são responsáveis por manter a porosidade, especialmente a macroporosidade que é formada nos espaços ocupados pelas raízes (DEGU et al. 2019).

Quando o solo é considerado compactado torna-se necessário que alguma estratégia de manejo seja adotada para reverter esta condição, de forma a proporcionar a condições ideais ao crescimento radicular, a estratégia de manejo mais utilizada em áreas de plantio direto que apresentam compactação é a prática da escarificação com o objetivo aumentar a macroporosidade e diminuir a densidade, em geral os efeitos da escarificação não são mantidos por longo período de tempo de maneira que esta prática só pode ser utilizada nos casos em que o solo apresenta grau de compactação extremamente elevado (HUSSEIN et al. 2019).

Dessa forma estudos que demonstram o comportamento da estrutura do solo em sistemas de plantio direto de longa duração, mostram a relação da porosidade e da densidade com o tempo de execução do plantio direto sem perturbação mecânica da estrutura do solo, de forma que a prática da escarificação só é indicada em situações em que o solo apresentar um grau de compactação maior que 80 a 85% quando o crescimento radicular é restringido (XU et al. 2019). Dessa forma a manutenção de palha sobre a superfície do solo pode ser a melhor estratégia para preservar a estrutura do solo sem que o grau de compactação seja elevado a níveis críticos, uma vez que a palha pode causar o efeito de aumentar a superfície de contato do pneu com o solo, mitigando o efeito da compactação.

Assim, os objetivos deste estudo foram identificar a correlação do grau de compactação e os demais atributos físicos do solo com o tempo execução do plantio direto após a escarificação. Verificar a influência do tempo de execução do plantio direto após escarificação sobre a pressão de preconsolidação. Verificar a influência de diferentes tempos de uso após a escarificação do solo sobre o intervalo hídrico ótimo.

## 2 ARTIGO 1: ATRIBUTOS FÍSICOS E TEMPO DE EXECUÇÃO DO PLANTIO DIRETO APÓS ESCARIFICAÇÃO

### 2.1 RESUMO

Áreas conduzidas sob plantio direto podem apresentar compactação do solo devido a intensidade do tráfego agrícola necessário para realizar as práticas de cultivo. Este trabalho teve como objetivo correlacionar os atributos físicos do solo a fim de identificar quais os atributos que apresentam a maior correlação com o tempo de escarificação. O estudo foi realizado em cinco áreas distintas: mata nativa (Mata), plantio direto escarificado (Esc), três anos de plantio direto após a escarificação (SPD 3), plantio direto dez anos após escarificação (SPD 10) e plantio direto vinte anos após a escarificação (SPD 20). As coletas de solo foram realizadas com cilindros metálicos em vinte pontos amostrais em três profundidades 0 a 5, 10 a 15, e 25 a 30 cm, em cada ponto amostral foram coletadas duas amostras por camada estudada. A análise estatística foi realizada pelo método da correlação Pearson utilizando o software R. Para avaliação as amostras foram submetidas a diferentes conteúdos de umidade. As variáveis analisadas em laboratório foram: pressão de preconsolidação (PPC), carbono orgânico total (COT), resistência mecânica a penetração (RP), densidade do solo (Ds), macro e microporosidade. As variáveis Ds, RP e PPC apresentaram correlação positiva com o tempo de execução do plantio direto após a escarificação. O valor médio para o grau de compactação foi menor que 85 % em todas as camadas de solo avaliadas.

**Palavras-chave:** compactação, grau de compactação, tráfego agrícola.

### PAPER 1: CORRELATION OF SOIL PHYSICAL ATTRIBUTES WITH TIME OF NO TILLAGE START AFTER CHISELING

#### 2.2 ABSTRACT

Areas conducted under no-till may have soil compaction soil compaction due to the intensity of agricultural traffic required to cultivate. This study objective to correlate the physical attributes of the soil with the time of tillage after chiseling, to identify which attributes have the highest correlation with chiseling time. The study was conducted in five distinct areas: native forest (Mata), chiseling no-tillage (Esc), three years of no-tillage after chiseling (SPD 3), no-tillage ten years after chiseling (SPD 10) and no-tillage twenty years after chiseling (SPD 20). Soil collections were carried out with metallic cylinders at twenty

sampling points at three depths 0 to 5, 10 to 15, and 25 to 30 cm, at each sampling point two samples were collected per studied layer. Statistical analysis was performed using the Pearson correlation method using software R. For evaluation the samples were submitted to different moisture contents. The variables analyzed in the laboratory were: precompaction pressure (PPC), total organic carbon (COT), soil mechanical resistance to penetration (RP), soil bulk density (Ds), total porosity, macroporosity and microporosity. The variables Ds, RP, and PPC correlated with no-tillage execution time after chiseling. The average value for the degree of compaction was less than 90% in all evaluated soil layers.

**Keywords:** compaction, degree compaction, agricultural traffic.

### 2.3 INTRODUÇÃO

Áreas conduzidas sob sistemas plantio direto estão propensas a compactação devido a intensidade do tráfego de máquinas a que estas áreas são submetidas, de forma que o tempo de uso em plantio contínuo resulta em alterações nos atributos físicos que apresentam relações entre si, apresentando variação ao longo do tempo (CERRI et al. 2012). Levando em consideração a importância das práticas de manejo aplicadas durante o desenvolvimento das culturas é preciso ressaltar que o solo precisa ser trafegado várias vezes durante cada cultivo agrícola, de forma que não é possível realizar o tráfego somente quando o solo apresenta baixo conteúdo de umidade, uma vez que esta condição proporciona maior resistência a deformações plásticas e, conseqüentemente, menor compactação (RESSIA et al. 2015).

Solos de textura argilosa tendem a ser mais suscetíveis a compactação pois apresentam maior porosidade total, isto pode contribuir para elevação do grau de compactação além dos níveis críticos destes solos acarretando em dificuldades para o desenvolvimento radicular nas áreas de plantio direto. Dessa forma, é de grande importância entender o comportamento físico do solo, a fim de compreender os efeitos do tráfego ao longo do tempo conhecendo as relações que a aplicação de cargas sucessivas realizadas pelos vários cultivos pode causar sobre a densidade e os demais atributos relacionados entre si (MARTINS et al. 2012). A qualidade física do solo está relacionada a existência de macroporos que auxiliam na aeração garantindo que pelo menos 10% de espaços porosos estejam preenchidos por ar, permitindo as trocas gasosas que o sistema radicular necessita. O nível crítico de densidade também é um fator de grande importância, pois solos de textura argilosa que apresentam densidade acima do nível crítico apresentam raízes tortuosas demonstrando aspecto característico de solo compactado. Vários fatores estão relacionados a compactação do solo, entretanto, existem dois fatores

principais envolvidos neste processo, tais como o conteúdo de água e a carga aplicada sobre o solo.

A densidade também apresenta relação com a compressão do solo, pois quanto maior for o valor da densidade do solo maior será a carga necessária para resultar em uma maior compactação. A adição de resíduos orgânicos no solo como o dejetos de suíno ou aves, embora proporcione condições para maior desenvolvimento de raízes de plantas, acontece pequena influência sobre a densidade e porosidade do solo em um curto prazo (FREITAS et al. 2018).

O carbono orgânico existente no solo é responsável por garantir maior agregação, sobretudo a fração constituinte da matéria orgânica é responsável por conferir uma maior resistência aos efeitos da degradação. Contudo a compressibilidade do solo também é afetada pelo aumento do conteúdo de carbono orgânico que proporciona maior resistência a compressão (MAZURANA et al. 2017). Já a resistência mecânica a penetração do solo também apresenta relação com o conteúdo de carbono, apresentando uma relação inversa onde a diminuição da resistência a penetração está relacionada ao aumento do conteúdo de carbono (RAUBER et al. 2012).

Quando o solo sofre uma intervenção mecânica ocasionada pela escarificação acontece a alteração de sua estrutura, de forma que os atributos físicos como densidade e macroporosidade são os que sofrem as maiores alterações, e com isso a compressibilidade e resistência mecânica a penetração também são diretamente afetadas (NAGAHMA et al. 2016). O aumento da porosidade e diminuição da densidade ocasionados pela prática da escarificação não se mantém por um longo período de tempo, pois existe influência de outros fatores que afetam estes atributos (NUNES et al. 2014), como tráfego de máquinas que é um dos principais fatores relacionados a compactação do solo, pois ao longo do tempo as sucessivas pressões exercidas sobre o solo causam alterações na densidade e na porosidade (MORAES et al. 2018). O conteúdo de água que o solo apresenta no momento do tráfego também está relacionado a intensidade da compactação que o solo pode sofrer de forma que a resistência mecânica a penetração também é alterada (MOLINA et al. 2013). Com maior conteúdo de água, aumenta a suscetibilidade a compactação pois as moléculas de água funcionam como um lubrificante entre as partículas do solo facilitando a compactação pela expulsão do ar dos espaços porosos (LOPES et al. 2011). Em condições de lavoura o tráfego acontece em condições de umidade que favorecem o aumento da densidade pela aplicação de cargas sobre a superfície, pois na maioria das vezes em que há necessidade de trafegar a área para realizar as práticas de cultivo o solo encontra-se em um conteúdo de umidade maior que o ponto de murcha permanente e menor que a capacidade de campo, sendo que nas condições em que o

conteúdo de umidade encontra-se muito próximo a capacidade de campo acontece a condição ótima para a compactação. Sendo assim é de grande importância entender como os atributos físicos estão relacionados entre si e com o tempo de cultivo em plantio direto contínuo após a aplicação da prática de escarificação do solo.

A hipótese deste trabalho é que com o aumento do tempo após a escarificação o solo tende a aumentar a resistência a deformação, tornando-se mais resistente aos efeitos da compactação.

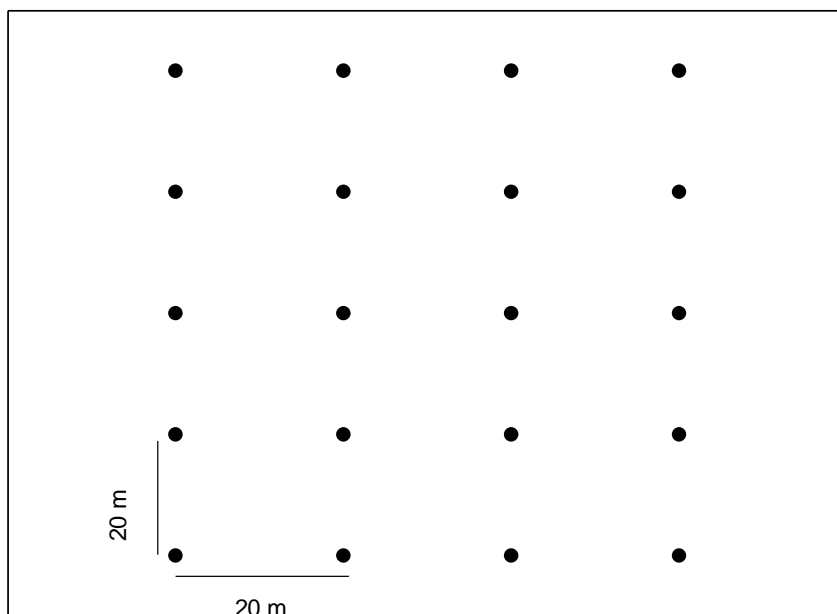
O objetivo deste estudo é correlacionar os atributos físicos do solo com o tempo de execução do plantio direto após intervenção mecânica.

## 2.4 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.4.1 Descrição dos locais de estudo

O estudo foi realizado no município de Seberi-RS. As áreas do estudo encontram-se em uma altitude média de 500 m com temperatura média anual de 18°C e precipitação pluvial anual média de 1800 mm. O relevo é suave ondulado em grandes extensões com declividade entre 3 e 8%. O solo da região é classificado como Latossolo Vermelho distrófico, com textura argilosa (EMBRAPA 2016), 662g kg<sup>-1</sup> de argila, 258 g kg<sup>-1</sup> de silte e 80 g kg<sup>-1</sup> de areia. O estudo foi feito a partir de coletas de solo realizadas em cinco áreas próximas com diferentes tempos de uso em plantio direto contínuo após a escarificação, sendo uma área de mata nativa constituída por um fragmento de mata atlântica e quatro áreas sob diferentes tempos de execução do sistema plantio direto após escarificação do solo: 4 meses após a escarificação, 3 anos de plantio direto após escarificação, 10 anos de plantio direto após escarificação, 20 anos de plantio direto após escarificação. Todas as áreas cultivadas possuem tempo de adoção do plantio direto maior que 10 anos, entretanto após identificação de degradação física por compactação essas áreas foram submetidas a escarificação para reverter os efeitos da compactação. Após a escarificação essas áreas estão sendo mantidas com sistema plantio direto o que possibilitou a avaliação nos diferentes tempos de execução do plantio direto após a escarificação

Figura 1-Croqui dos pontos amostrais realizados em cada área



Fonte: Elaborado pelo autor

As coletas foram realizadas em 20 pontos amostrais em cada área avaliada, onde foram coletadas amostras com estrutura preservada em anéis metálicos em três profundidades sendo estas: 0 a 5, 10 a 15 e 25 a 30 cm. Sendo assim, para estas avaliações foram coletadas duas amostras por profundidade em cada ponto amostral, posteriormente destinadas ao ensaio de compressibilidade e resistência a penetração mecânica. Em laboratório as amostras foram preparadas, saturadas e submetidas a tensão de 6 kPa por 48 horas na mesa de tensão, após este período as amostras foram pesadas para determinação da microporosidade, conforme metodologia descrita em Teixeira et al. (2017).

#### 2.4.2 Análise das propriedades físicas do solo

Para a determinação da microporosidade as amostras com estrutura preservada foram preparadas e logo saturadas por um período de 72 horas em uma bandeja com água. Posteriormente as mesmas amostras foram submetidas a uma tensão de 6 kPa por um período de 42 horas, após este procedimento as amostras foram pesadas para determinação da macroporosidade e secas ao ar para avaliação da resistência a penetração mecânica em laboratório e ensaio de compressão.



A microporosidade ( $M_i$ ) foi determinada pelo método da mesa de tensão, onde o volume de microporos foi considerado igual ao volume de água que permaneceu na amostra após a aplicação da tensão de 6 kPa

$$M_i = \left( \frac{M_{su} - M_{ss}}{V} \right) \quad (1)$$

$M_i$ : Microporosidade ( $m^3 m^{-3}$ );  $M_{su}$ : massa da amostra submetida a tensão de 6 kPa (Mg);  $M_{ss}$ : massa do solo seco a  $105^\circ C$  (Mg);  $V$ : volume interno do cilindro ( $m^3$ ); Densidade da água 1 Mg.

A porosidade total foi determinada pela relação entre densidade do solo e densidade de partículas utilizado para o cálculo na equação 2:

$$P_t = 1 - \left( \frac{D_s}{D_p} \right) \quad (2)$$

Em que:  $P_t$ : porosidade total ( $m^3 m^{-3}$ );  $D_s$ : densidade do solo ( $Mg m^{-3}$ );  $D_p$ : densidade de partículas (Mg).

A macroporosidade foi obtida pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade, conforme equação 3:

$$M_a = P_t - M_i \quad (3)$$

Em que,  $M_a$ : macroporosidade ( $m^3 m^{-3}$ );  $P_t$ : Porosidade total ( $m^3 m^{-3}$ );  $M_i$ : microporosidade ( $m^3 m^{-3}$ )

A densidade do solo foi calculada pela relação entre a massa o volume, conforme equação 4:

$$D_s = \left( \frac{M_{ss}}{V} \right) \quad (4)$$

Primeiramente o ensaio de Proctor foi utilizado apenas para determinação da umidade ótima de compactação. Em seguida para a determinação da densidade máxima de referência ( $D_{sref}$ ) as amostras contendo a umidade ótima de compactação foram submetidas a aplicação de sequencial de cargas crescentes até atingir a carga máxima de 1600 kPa em um consolidômetro de compressão uniaxial. A compactação relativa foi obtida pela relação entre a densidade do solo e a densidade máxima, calculado pela seguinte equação:

$$CR = \left( \frac{D_s}{D_{sref}} \right) \times 100 \quad (5)$$

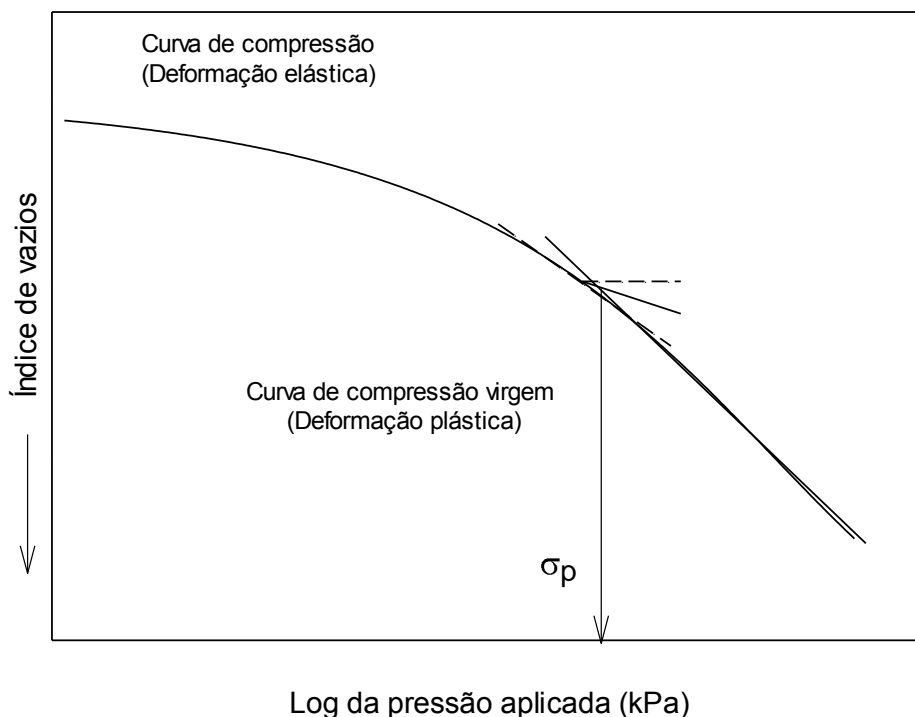
Em que: CR: compactação relativa (%);  $D_s$ : densidade do solo ( $Mg\ m^{-3}$ );  $D_{sref}$ : densidade máxima de referência ( $Mg\ m^{-3}$ ).

Para a secagem ao ar as amostras foram separadas em quatro grupos, onde o primeiro grupo perdeu 10g de água, o segundo grupo perdeu 20 g de água, e o terceiro grupo perdeu 30g de água. Após as amostras atingirem o peso desejado foram encaminhadas para o ensaio de compressão e resistência mecânica a penetração. O cálculo da pressão de preconsolidação foi realizado com dados gerados pelo ensaio de compressão conforme metodologia descrita por Gubiani et al. (2017).

Após sair da mesa de tensão as amostras foram separadas em grupos contendo cinco amostras por grupo, para secar ao ar e posteriormente submetidas ao teste de resistência a penetração. O primeiro grupo foi submetido a resistência a penetração logo após sair da mesa de tensão, o segundo grupo de amostras foi seco ao ar até perder 10g de água o terceiro grupo foi seco ao ar até perder 20g de água e o quarto grupo foi seco ao ar até perder 30g de água. Após a secagem ao ar as amostras foram submetidas ao teste de resistência a penetração mecânica.

A pressão de preconsolidação foi obtida utilizando-se o ensaio de compressão uniaxial com aplicação consecutivas de cinco cargas sobre as amostras 50, 100, 200, 400, 800 e 1600 kPa. A curva é dividida em uma região de deformações recuperáveis e uma região de deformações não recuperáveis, sendo o valor da pressão de preconsolidação o valor limite de carga aplicada para que aconteça uma deformação recuperável no solo (Figura 2).

Figura 2- Relação entre o índice de vazios e a pressão aplicada no solo representada pela curva de compressão do solo.



Fonte: Elaborado pelo autor

### 2.4.3 Análise estatística

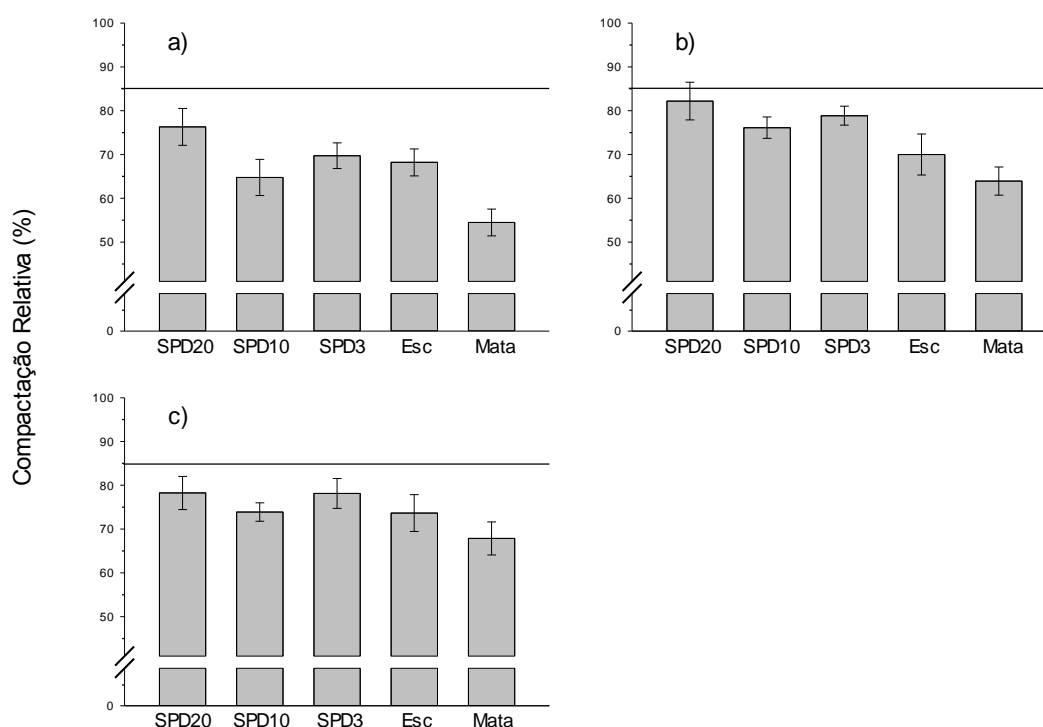
Os dados foram analisados de forma independente, sendo que a análise estatística foi realizada separadamente para os valores das amostras submetidas ao teste de resistência a penetração e ensaio de compressão, devido ao fato de que os valores não foram gerados a partir da mesma amostra. Os dados foram submetidos a correlação linear de Pearson executado pelo software R utilizando o pacote Metan para realizar as análises (OLIVOTO; DAL'COL, 2020).

## 2.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O sistema plantio direto conduzido por 20 anos após a escarificação foi o manejo que apresentou os maiores valores do grau de compactação na camada de 10 a 15 cm (Figura 3). O tráfego agrícola aumenta o grau de compactação em áreas de plantio direto especialmente na camada localizada entre 10 e 20 cm de profundidade (TRENTIN et al. 2018), contudo para

o SPD 20 o valor médio do grau de compactação ficou próximo de 80% de forma que nenhuma das áreas estudadas apresentou grau de compactação restritivo ao crescimento de raízes, considerando que valores do grau de compactação maiores que 85% podem ser considerados prejudiciais ao desenvolvimento de raízes para solos de textura argilosa (SUZUKI et al. 2013)

Figura 3- Compactação relativa das áreas estudadas, camada de 0-5 cm (a), camada de 10-15 cm (b), camada de 25-30 cm (c).



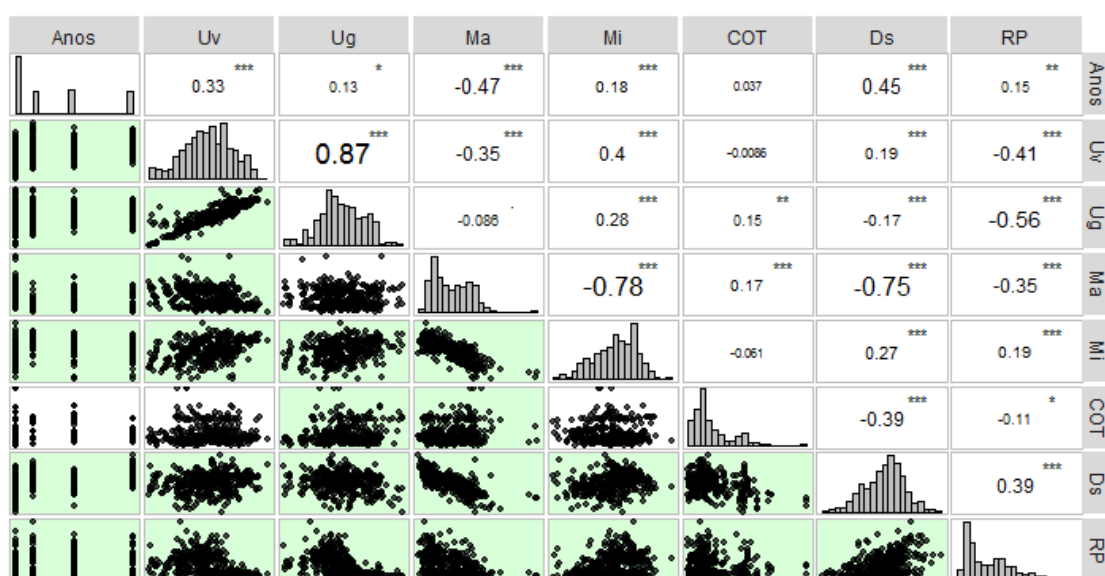
As linhas horizontais indicam o valor crítico de compactação relativa para a produtividade das culturas. Quando os limites superior e inferior do intervalo de confiança se sobrepõem não há diferença estatisticamente significativa entre os tratamentos ( $p < 0,05$ ).

A umidade ótima de compactação foi de  $0,35 \text{ g g}^{-1}$ . O tempo de plantio direto contínuo após a escarificação demonstrou correlação com a maior parte das variáveis estudadas. A resistência a penetração mecânica do solo e microporosidade apresentaram correlação significativa positiva com tempo de plantio direto contínuo demonstrando como estes atributos físicos são alterados pelo tempo (Figura 4). A mobilização do solo provoca aumento dos espaços porosos, contudo o solo tende a se adensar novamente em um período de tempo menor que três anos, apresentando valores de densidade muito semelhantes aos valores existentes antes da utilização do manejo escarificado (BONETTI et al. 2018). A macroporosidade e a porosidade total apresentam correlação negativa com a resistência mecânica a penetração, demonstrando que ao longo dos anos de cultivo após a escarificação

estas variáveis se alteram de forma a aumentar a resistência que as raízes encontram para se desenvolver. A mobilização do solo diminui a resistência a penetração o que facilita o desenvolvimento de raízes (MORAES et al. 2019).

Entretanto as plantas possuem suas particularidades quanto a resistência a penetração oferecida pelo solo, devido a plasticidade fenotípica de raízes de forma que cada espécie responde de forma diferente ao grau de compactação em que o solo cultivado se encontra (CORREA et al. 2019). As gramíneas tendem a apresentar menor suscetibilidade a compactação do solo por apresentar sistema radicular fasciculado apresentando raízes mais finas e longas que raízes pivotantes (GLAB, 2013). A determinação do grau de compactação de um solo é de grande importância para quantificar os efeitos que a densidade pode causar sobre o desenvolvimento radicular das plantas (NUNES et a. 2015).

Figura 4- Correlação linear dos atributos físicos do solo com o tempo de execução do plantio direto contínuo.

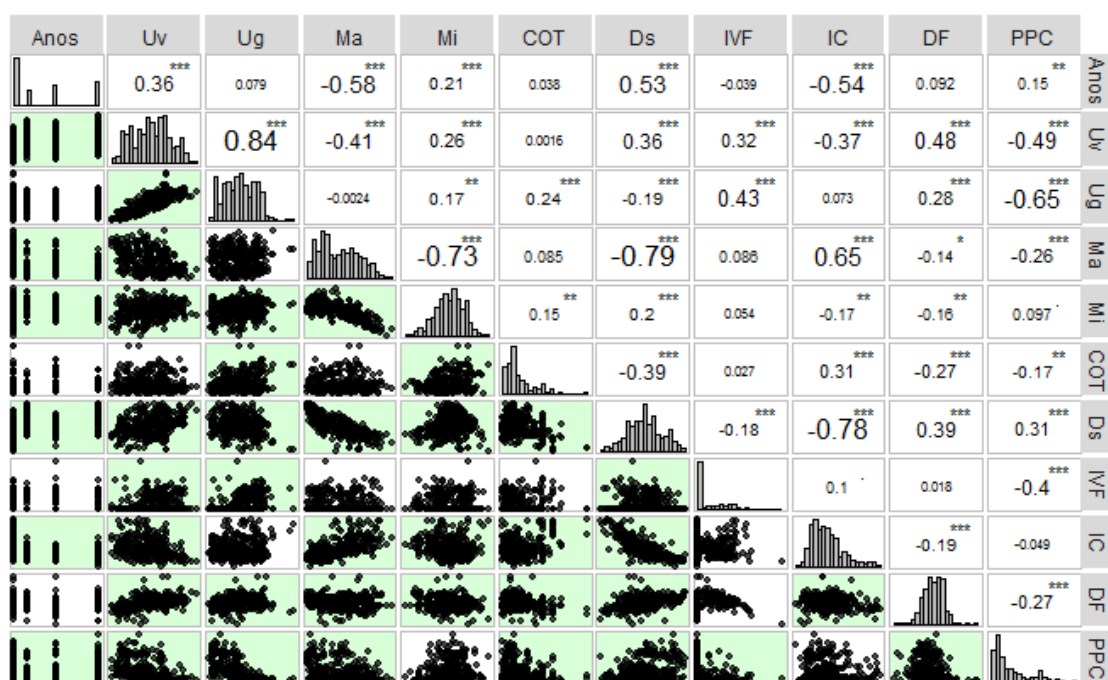


Tempo em anos de plantio direto contínuo (Anos), Umidade volumétrica em  $\text{Mg m}^{-3}$  (Uv), Umidade gravimétrica em  $\text{g g}^{-1}$  (Ug), Macroporosidade  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  (Ma), Microporosidade em  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  (Mi), Carbono orgânico total em  $\text{g kg}^{-1}$  (COT), Resistência a penetração mecânica MPa (RP), Densidade  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  (DS). \*significativo a 5%; \*\*Significativo a 1% e ns quando não significativo.

Com o aumento do tempo de uso em plantio direto após a escarificação, o não revolvimento do solo favorece um aumento da microporosidade. Este aumento de microporos apresentou correlação positiva com a resistência a penetração mecânica do solo. A macroporosidade apresenta correlação negativa com a resistência a penetração, ao contrário da microporosidade, pois o aumento da microporosidade acontece com o aumento da densidade do solo (BERGAMIN et al. 2015).

O tráfego sobre o solo ao longo dos anos de cultivo causa alterações na estrutura física, onde os atributos físicos podem ser alterados de forma a interferir no desenvolvimento radicular das culturas, pois o tempo de adoção de plantio direto apresenta relação com a estabilidade estrutural do solo onde os valores da pressão de preconsolidação aumentam com o tempo de uso solo em plantio direto (MAZURANA et al. 2017). A macroporosidade apresentou correlação negativa com a pressão de preconsolidação (Figura 5) de modo que as camadas onde o solo apresenta os maiores valores de macroporosidade a resistência a compactação é menor. Em geral solos cultivados sem intervenção mecânica apresentam maior densidade na camada de 15 a 20 cm, sendo que esta camada apresenta os menores valores de macroporosidade e, conseqüentemente, uma maior pressão de preconsolidação (MARTINS et al. 2012).

Figura 5- Correlação linear dos atributos físicos do solo com o tempo de execução do plantio direto contínuo sem perturbação mecânica da estrutura do solo.



Tempo em anos de plantio direto contínuo (Anos), Umidade volumétrica em  $\text{Mg m}^{-3}$  (Uv), Umidade gravimétrica em  $\text{g g}^{-1}$  (Ug), Macroporosidade  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  (Ma), Microporosidade em  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  (Mi), Carbono orgânico total em  $\text{g kg}^{-1}$  (COT), Pressão de preconsolidação kPa (PPC), Índice de vazios final (IVF), Densidade final (DF), Índice de compressão (IC). \*significativo a 5%; \*\*Significativo a 1% e ns quando não significativo.

O índice de compressão não apresentou correlação com a pressão de preconsolidação, entretanto apresentou correlação positiva com o tempo de execução do plantio direto após a escarificação (Figura 5), desta forma dentre as variáveis estudadas o índice de compressão pode ser o indicador mais apropriado para mensurar a qualidade física do solo em áreas de

plantio direto. Segundo Moraes et al. (2015) a densidade relativa do solo apresenta alta correlação com o índice de compressão demonstrando a condição física em que o solo se encontra. Com o tempo de utilização do plantio direto contínuo a macroporosidade do solo tende a diminuir gradativamente (DOMIT et al. 2014). de forma que a pressão de preconsolidação aumenta com a redução da macroporosidade do solo.

O conteúdo de COT não apresentou correlação com o tempo de cultivo demonstrando que um único evento de escarificação mecânica do solo não causa alterações sobre este atributo, de maneira que o COT se mantém estável com o tempo de execução de plantio direto contínuo (Figura 5). Áreas conduzidas sob plantio direto apresentam maior conteúdo de carbono orgânico quando comparadas a áreas que passam por revolvimento periódico do solo (OMARA et al. 2019). Segundo Azlan et al. (2012) solos manejados sob plantio direto apresentam pouca variação do COT em função do manejo, pois o conteúdo de argila é o atributo físico que apresenta a maior correlação positiva com o COT.

## 2.6 CONCLUSÃO

Um único evento de revolvimento do solo com o uso de escarificador de solo não alterou os valores de carbono orgânico do solo, mantendo-os constantes com o tempo de execução do plantio direto após a escarificação.

Mesmo após 20 anos sem revolvimento do solo, as áreas com plantio direto apresentam um grau inferior ao limite restritivo de 85 % da compactação máxima obtida pelo ensaio de compressibilidade a uma pressão sequencial de 1600 kPa.

A densidade do solo aumenta com o tempo de plantio direto contínuo apresentando, demonstrado pela correlação positiva ente a densidade e o tempo de plantio direto contínuo.

O tempo de plantio direto contínuo, sem intervenção mecânica garante ao solo maior resistência a alterações na estrutura física por apresentar maior resistência a penetração e maior pressão de preconsolidação.

## 2.7 REFERÊNCIAS

AZLAN, A. Correlation between Soil Organic Matter, Total Organic Matter and Water Content with Climate and Depths of Soil at Different Land use in Kelantan, Malaysia. *J. Appl. Sci. Environ. Manage.* 2012

BERGAMIN, A. C. et al. Relationship of soil physical quality parameters and maize yield in a Brazilian Oxisol. *Chilean journal of agricultural research* 75(3), 2015

- BONETTI, J. A. et al. Soil physical and biological properties in an integrated crop-livestock system in the Brazilian Cerrado. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.53, n.11, p.1239-1247, 2018
- CERRI, D. G. P. et al. Correlation of physical and chemical attributes of soil with sugarcane yield. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.47, n.4, p.613-620, abr. 2012
- CORREA, J. et al. Soil compaction and the architectural plasticity of root systems. **Journal of Experimental Botany**, Vol. 70, No. 21 pp. 6019–6034, 2019
- DOMIT, L. A. et al. Tempo de adoção do sistema plantio direto e a relação com atributos do solo. **Revista Agrarian**, Dourados, v.7, n.26, p.560-569, 2014
- FREITAS, J. A. S. et al. Soil carbon and physical-mechanical properties after successive applications of swine and poultry organic waste. **Pesq. Agropec. Trop.**, Goiânia, v. 48, n. 4, p. 390-398, 2018
- GLAB, T. Impact of soil compaction on root development and yield of meadow-grass. **Int. Agrophys.** 27, 7-13, 2013
- GUBIANI, P. I. et al. Excel Add-In to Model The Soil Compression Curve. **Eng. Agríc., Jaboticabal**, v.37, n.3, p.603-610, 2017
- LOPES, E. S. et al. AVALIAÇÃO DA UMIDADE NA COMPACTAÇÃO DO SOLO SUBMETIDO AO TRÁFEGO DE MÁQUINAS DE COLHEITA FLORESTAL. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.35, n.3, Edição Especial, p.659-667, 2011
- MARTINS, P. C. C. et al. Compactação do solo durante as operações de colheita em cinco solos tropicais com diferentes texturas sob florestas de eucalipto. **Ciênc. agrotec., Lavras**, v. 36, n. 4, p. 391-398, 2012
- MAZURANA, M. et al. Soil susceptibility to compaction under use conditions in southern Brazil. **Ciência e Agrotecnologia** 41(1):60-71, 2017
- MAZURANA, M. et al. DYNAMIC OF PRESSURE-DEFORMATION CURVE IN UNIAXIAL COMPRESSION TEST IN DIFFERENT LOAD TIMES. **Eng. Agríc., Jaboticabal**, v.37, n.5, p.973-986, 2017
- MOLINA, W. F. J. et al. Penetration resistance in a latosol under different moisture and penetration speeds. **Rev. Ceres, Viçosa**, v. 60, n.5, p. 715-721, set/out, 2013
- MORAES, M. T. Corn crop performance in an Ultisol compacted by tractor traffic **Pesq. agropec. bras.**,v.53n.4, Brasília, 2018
- MORAES, M. T. Modeling of Soil Load-Bearing Capacity as a Function of Soil Mechanical Resistance to Penetration, **R. Bras. Ci. Solo**, 39:1036-1047, 2015
- MORAES, E. R. et al. Sugarcane Root Development and Yield under Different Soil Tillage Practices. **Rev Bras Cienc Solo**;43:e0180090, 2019



NAGAHAMA, H. J. M. et al. Efeitos da escarificação mecânica nos atributos físicos do solo e agronômicos do capim elefante. **Rev. Ceres, Viçosa**, v. 63, n.5, p. 741-746, 2016

NUNES, M. R. N. et al. Persistência dos efeitos da escarificação sobre a compactação de Nitossolo sob plantio direto em região subtropical úmida. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.49, n.7, p.531-539, jul. 2014

NUNES, M. R. et al. Mitigation of clayey soil compaction managed under no-tillage. **Soil & Tillage Research**, 148, 119–126, 2015

OLIVOTO T; LUCIO A. D. “metan: an R package for multi-environment trial analysis. **bioRxiv**, 2020

OMARA, et al. Influence of No-Tillage on Soil Organic Carbon, Total Soil Nitrogen, and Winter Wheat (*Triticum aestivum* L.) Grain Yield. Article in International, **Journal of Agronomy**, 2019

RAUBER, L. P. et al. Physical properties and organic carbon content of a Rhodic Kandudox fertilized with pig slurry and poultry litter. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, vol.36 no.4 Viçosa, 2012

RESSIA, J. M. et al. Models to estimate the mechanical resistance to penetration in Argentine agricultural soils. **Transactions on Ecology and The Environment**, v. 192, 2015

SUZUKI, L. E. A. S. et al. Degree of compactness, soil physical properties and yield of soybean in six soils under no-tillage. **Soil research**, 2013

TEIXEIRA, P. C. et al. Manual de métodos de análise de solo. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF : **Embrapa**, 2017.

TRENTIN, R. G. Soybean productivity in Rhodic Hapludox compacted by the action of furrow openers. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 40, e35015, 2018

### **3 ARTIGO 2: SUSCETIBILIDADE A COMPACTAÇÃO DE UM LATOSSOLO SOB DIFERENTES TEMPOS DE PLANTIO DIRETO CONTÍNUO APÓS ESCARIFICAÇÃO**

#### **3.1 RESUMO**

O manejo plantio direto amplamente difundido no Brasil ainda apresenta problemas de compactação do solo em áreas cultivadas. O objetivo deste trabalho foi estimar modelos da capacidade de suporte de carga de um Latossolo conduzido sob diferentes tempos de execução em plantio direto. O estudo foi realizado no município de Seberi-RS, em cinco áreas distintas: mata nativa (Mata), plantio direto escarificado (Esc), três anos de plantio direto após a escarificação (SPD3), plantio direto dez anos após escarificação (SPD10) e plantio direto vinte anos após a escarificação (SPD20). As coletas de solo foram realizadas com cilindros metálicos em vinte pontos amostrais em três profundidades 0 a 5, 10 a 15, e 25 a 30 cm, em cada ponto amostral foram amostras por camada estudada. A análise estatística foi realizada pelo método da correlação Pearson utilizando o software R. Para avaliação as amostras foram submetidas a diferentes conteúdos de umidade. A pressão de preconsolidação (PPC) foi calculada por meio de ensaios de compressão com um consolidômetro automático. O conteúdo de água no solo é o fator que regula a coesão do solo. Na camada de 0 a 5 cm o SPD20 e Mata foram os manejos que apresentaram a maior capacidade de carga. Na camada de 10 a 20 cm o uso Mata não apresentou diferença quando comparado ao SPD10 mas apresentou diferença quando comparado ao SPD20. A camada de 25 a 30 apresentou a menor influência do manejo, onde somente o uso Mata apresentou diferença pelo teste F entre os manejos estudados. O tempo de uso sem intervenção mecânica garante maior coesão ao solo.

**Palavras chave:** Coesão, Preconsolidação, Latossolo

#### **PAPER 2: SUCCESSIBILITY THE COMPACTION OF A OXISOL UNDER DIFFERENT TIMES OF CONTINUOUS DIRECT PLANTING AFTER SCARIFICATION**

#### **3.2 ABSTRACT**

The no-till system in Brazil still has soil compaction problems in cultivated areas. The objective of this work was to estimate load bearing capacity models of an oxisol conducted under different tillage time. The study was conducted in the city of Seberi-RS was conducted

in five distinct areas: native forest (Mata) chiseling (Esc), three years of no-tillage after chiseling (SPD3), no-tillage ten years after chiseling (SPD10) and no-tillage twenty years after chiseling (SPD20). Soil collections were performed with metal cylinders at twenty sampling points at three depths 0 a 5, 10 a 15, e 25 a 30 cm at each sample point out samples per studied layer. Statistical analysis was performed using the Pearson correlation method using the Software R. For evaluation the samples were to different moisture contents. Preconsolidation pressure (PPC) was calculated by compression testing with a uniaxial consolidometer. In the 0 to 5 cm layer the SPD 20 presented and Mata were the management that presented the highest load capacity. In the 10 to 20 cm layer the Mata system showed no difference when compared to SPD10, but showed a difference when compared to SPD20. The 25 to 30 cm layer presented the lowest influence, where only the forest presented difference by F test between the studied systems. Use time without mechanical intervention ensures greater soil cohesion.

**Keywords:** Cohesion, Preconsolidation, Oxisol

### 3.3 INTRODUÇÃO

Embora amplamente difundido no Brasil o sistema plantio direto ainda apresenta problemas que afetam o desenvolvimento das plantas, isso acontece devido ao tráfego intenso das áreas de cultivo para a realização dos tratos culturais durante o ciclo da cultura desde a semeadura até a colheita, causando compactação do solo pela excessiva carga aplicada em grande parte da área cultivada (VALADÃO et al. 2015). Na tentativa de reverter os efeitos indesejados proporcionados pela compactação do solo as práticas de escarificação e subsolagem vem sendo adotadas como forma de aumentar a porosidade e a taxa de infiltração de água. Devido ao considerável tempo de adoção do plantio direto no país, áreas com mais de vinte anos sob plantio direto já podem ser estudadas sendo possível diagnosticar o efeito do tráfego sobre os atributos físicos do solo cultivado por um longo período, sendo que esse tipo de estudo pode auxiliar no diagnóstico da compactação na tomada de decisão sobre qual estratégia de manejo deve ser adotada para que as plantas tenham boas condições para o desenvolvimento.

Os efeitos do sistema de manejo causam impactos diretos nos atributos do solo afetando estrutura, porosidade e armazenamento de água (SALES et al. 2016), os quais influenciam no comportamento compressivo na suscetibilidade a compactação (PINTO et al.

2018). A ausência de revolvimento mecânico do solo, manutenção da cobertura vegetal e de resíduos sobre a superfície garantem que solos cultivados sob plantio direto apresentem melhorias da qualidade física com aumento do tempo de uso sem perturbação de sua estrutura (SOUZA et al. 2016), desta forma, a rotação de culturas é uma prática que associada ao sistema plantio direto apresenta grande importância no processo de melhoria da qualidade do solo através do aumento da resistência tênsil e diminuição da densidade pelo aumento do espaço poroso sem necessidade de intervenção mecânica (JUNIOR et al. 2016). Assim, o tempo de adoção do sistema plantio direto exerce influência benéfica a fim de melhorar os atributos do solo, apresentando como indicador de melhoria uma menor resistência a penetração em sistemas com mais de quinze anos de plantio direto contínuo (DOMIT et al. 2014).

O grau de compactação é diretamente dependente do manejo e da intensidade do tráfego aplicado sobre o solo (DE SÁ et al. 2016), dessa forma o tráfego de máquinas é a principal causa de compactação em áreas cultivadas, pois as tensões aplicadas pelos pneus sobre a superfície podem causar efeitos no solo a uma profundidade de até 30 cm com deformações horizontais e verticais, formando compactação em bulbos (MION et al. 2016). Dessa forma, a superfície de contato do pneu com o solo exerce influência direta na quantidade de carga aplicada, onde pneus mais largos ou com menor pressão interna distribuem o peso da máquina em uma superfície maior, reduzindo o efeito de compactação realizado pela aplicação da carga sobre o solo (FEITOSA et al. 2015). Os principais fatores relacionados a deformação do solo pela aplicação de cargas são o conteúdo de água, teor de argila e o espaço poroso, especialmente os poros com diâmetros maiores de 0,005 mm chamados de macroporos que diminuem de tamanho facilmente no processo de compactação (BRAGA et al. 2015). O tráfego controlado de máquinas pode ser uma boa alternativa para evitar a compactação total da área de cultivo (GIRARDELLO et al. 2017).

Solos sob sistema de plantio direto de longa duração com períodos maiores que 15 anos de plantio direto contínuo, podem apresentar uma maior resistência a deformação por serem caracterizados como solo que apresentam uma maior pressão de preconsolidação (PACHECO et al. 2011), este fenômeno é conhecido como “age hardening” ou endurecimento da estrutura do solo pela idade, responsável por conferir uma maior resistência a deformação e conseqüentemente um solo com estrutura que suporta maiores pressões do que os solos que sofreram alguma intervenção mecânica em um período inferior a dez anos (MORAES et al. 2017). A pressão de preconsolidação representa o valor da capacidade de suporte de carga de um solo, a qual não causa danos severos a estrutura, permitindo que o solo realize as suas funções ecológicas após sofrer o efeito desta carga, mantendo boas condições para o

crescimento de raízes e infiltração de água (PIRES et al. 2012), valores de tensões maiores que a pressão de preconsolidação excedem a capacidade de suporte de carga causando deformação plástica (JÚNIOR et al. 2015) dessa forma, acontece a diminuição do espaço poroso e aumento da densidade o que resulta em degradação da estrutura (OLIVEIRA et al. 2015). A pressão de preconsolidação pode ser utilizada como um indicador da qualidade de física de um solo sendo possível diagnosticar a presença de níveis elevados de degradação física, sendo assim este método pode ser utilizado como ferramenta de avaliação capaz de quantificar a qualidade estrutural de solos submetidos a diferentes manejos, especialmente solos de plantio direto cultivados por longo período podendo demonstrar as diferenças estruturais relacionadas a coesão resultantes do tempo em que este solo permanece sem a perturbação mecânica de sua estrutura (IORI et al. 2012).

O conteúdo de água do solo é principal fator relacionado ao comportamento compressivo, pois a fina película de água que recobre as partículas do solo atua como um lubrificante facilitando o deslizamento, assim um solo com a umidade próxima do limite de plasticidade tem maior a suscetibilidade a compactação facilitando o preenchimento dos espaços vazios por partículas sólidas (SILVA et al., 2002; LOPES et al. 2011 ). O solo possui maior coesão quando apresenta baixo conteúdo de água o que aumenta a capacidade de suporte de carga e a resistência a compactação. A aplicação de cargas sobre solo com baixos conteúdos de umidade causa menor compactação, sendo esta, a condição mais adequada para trafegar o solo sem que haja danos a estrutura física (CRISPIM et al. 2015). O histórico das pressões aplicadas sobre o solo ao longo de todos os anos de manejo é um fator relevante no diagnóstico da capacidade de suporte de carga, em solo sob sistema plantio direto de longa duração este fator está diretamente relacionado a condição de umidade em que solo apresenta quando é trafegado (CORTEZ et al. 2014). Um importante fato a ser considerado é que solos cultivados sob sistema plantio direto são trafegados em conteúdo de umidade maiores que o ponto de murcha permanente e menores do que a capacidade de campo durante todo o ciclo de desenvolvimento das espécies cultivadas, sendo assim o tráfego ocorre em condições de umidade que favorecem a compactação, uma vez que, para solos de textura argilosa os valores de umidade em áreas de plantio direto se mantém em torno de  $0,30 \text{ g g}^{-1}$  durante o desenvolvimento das culturas que é considerado valor de umidade ótima para a compactação (VIEIRA et al. 2012). Assim como a compressibilidade a resistência a penetração mecânica do solo também apresenta alta correlação com o conteúdo de água do solo (SOUZA et al. 2017), sendo também influenciada pelos demais atributos físicos do solo como teor de argila e densidade (OLIVEIRA et al. 2018).

Os solos de plantio direto apresentam grande variabilidade espacial dos atributos físicos o que dificulta sua determinação (KLEIN et al. 2016). A modelagem da compressibilidade e da pressão de preconsoidação em diferentes conteúdos de umidade considerando os demais atributos do solo que estão relacionados com estas variáveis, fornecem informações que possibilitam identificar o estado de compactação do solo, ajudando assim na tomada de decisão sobre qual a melhor estratégia de manejo deve ser adotada (LIER; GUBIANI, 2015). A escarificação é uma prática de manejo adotada em áreas de plantio direto na tentativa de reverter os efeitos da compactação, esta prática proporciona ao solo diminuição da densidade e aumento do espaço poroso, com isto as raízes não encontram impedimento ao seu desenvolvimento (SEKI et al. 2015), entretanto os efeitos da escarificação persistem por um curto período de tempo inferior ao tempo de uma safra agrícola (DRESCHER et al. 2016). Quando escarificado o solo não impede o desenvolvimento de raízes, em contrapartida uma redução na capacidade de suporte de carga ocasionada pela destruição parcial de sua estrutura e pelo aumento dos espaços porosos aumenta a suscetibilidade a compactação agravando os efeitos de degradação da estrutura física (NAGAHAMA et al. 2016). Considerando o efeito benéfico que o tempo de execução do plantio direto tem sobre a estruturação e agregação, a escarificação deve ser realizada somente se o solo apresentar níveis de compactação extremamente altos capaz de afetar o desenvolvimento das raízes (KUNZ et al. 2013), assim é necessário a utilização de métodos eficientes quanto aos indicadores de solos compactados. Torna-se importante conhecer e monitorar a dinâmica dos atributos físicos do solo em áreas escarificadas posteriormente mantidas por um longo período sob plantio direto, pois assim é possível compreender como acontece o adensamento do solo após vários anos de cultivo e qual o nível de compactação que um solo cultivado pode atingir quando não é submetido a intervenção mecânica de sua estrutura (SILVA et al. 2017).

A hipótese deste trabalho é que áreas com solo de textura argilosa conduzidas em plantio direto contínuo por um período maior que dez anos apresentam menor suscetibilidade a compactação ocasionada pelo tráfego agrícola.

O objetivo deste trabalho é estimar modelos da capacidade de suporte de carga em um Latossolo vermelho distrófico conduzido sob diferentes tempos de execução do plantio direto sem intervenção mecânica.

### 3.4 MATERIAL E MÉTODOS

A descrição dos locais onde foram coletadas as amostras e manejos do solo, podem ser consultados no item Materiais e Métodos do Artigo 1 desta dissertação.

#### 3.4.1 Análises físicas

Para a obtenção das curvas de compressibilidade as amostras foram separadas em quatro grupos contendo cinco amostras em cada grupo, cada grupo foi submetido a secagem ao ar após aplicação da tensão de 6 kPa na mesa de tensão. Os ensaios de compressão foram realizados utilizando um consolidômetro automático de compressão uniaxial. Posteriormente as amostras foram levadas a estufa sob temperatura de 105°C por 48 horas, após este procedimento as amostras foram pesadas novamente para a determinação dos atributos físicos do solo. A entrada de dados de densidade de partícula, massa do solo úmido, massa do solo seco, as dimensões internas do cilindro de metal e valor da deformação vertical de cada carga aplicada foi realizada utilizando o software Excel add-in (ACC) para os cálculos da pressão de preconsolidação (GUBIANI et al. 2017). O modelo matemático que descreve a capacidade de suporte de carga (CSC) foi ajustado de acordo com a metodologia proposta por Dias Junior e Pierce (1995), descrito pela seguinte equação:

$$\sigma_p = 10^{(a+b \cdot U_g)} \quad (1)$$

Onde  $\sigma_p$  = Pressão de preconsolidação (kPa), “a” e “b” = Parâmetros empíricos do modelo e  $U_g$  = Umidade gravimétrica ( $g \ g^{-1}$ ).

Após a realização dos ensaios de compressão as amostras foram secas em estufa a 105 °C por 48 horas para a determinação da densidade.

#### 3.4.2 Análise Estatística

A análise estatística foi realizada através do software R, sendo utilizada a função `nls` do pacote `stats` para ajuste dos parâmetros “a” e “b” da equação  $\sigma_p = 10^{(a+bU_g)}$ . O teste F foi utilizado para a comparação das variâncias entre os modelos de regressão e método proposto por Sari et al. (2018), para a comparação entre os parâmetros “a” e “b” das regressões.

### 3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A comparação entre os modelos de regressão realizadas pelo teste F mostram que para camada de 0 a 5 cm o SPD20 foi o manejo que apresentou os maiores valores de pressão de preconsolidação quando comparado aos demais manejos estudados, mas não apresentou diferença quando comparado a mata nativa (Tabela 1).

Tabela 1- Comparação das equações de regressão de compressibilidade entre as áreas avaliadas, utilizando o teste F para a comparação entre as áreas avaliadas e método proposto por Sari et al. (2018) para comparação dos parâmetros “a” e “b” entre as equações.

Áreas	F	F	
		Coeficiente angular, a	Coeficiente linear, b
<u>0 a 5 cm</u>			
SPD20 vs SPD10	3,251*	ns	ns
SPD20 vs SPD3	6,663*	ns	ns
SPD20 vs Esc	5,713**	*	ns
SPD20 vs Mata	2,176 <sup>ns</sup>	*	**
SPD10 vs SPD3	2,049 <sup>ns</sup>	ns	ns
SPD10 vs Esc	1,757 <sup>ns</sup>	ns	ns
SPD10 vs Mata	0,669 <sup>ns</sup>	ns	*
SPD3 vs Esc	0,857 <sup>ns</sup>	ns	ns
SPD3 vs Mata	0,326*	ns	*
Mata vs Esc	2,625*	*	ns
<u>10 a 15 cm</u>			
SPD20 vs SPD10	1,286 <sup>ns</sup>	ns	ns
SPD20 vs SPD3	2,060 <sup>ns</sup>	ns	ns
SPD20 vs Esc	3,216**	ns	ns
SPD20 vs Mata	2,919*	ns	ns
SPD10 vs SPD3	1,601 <sup>ns</sup>	ns	ns
SPD10 vs Esc	2,500*	ns	ns
SPD10 vs Mata	2,268 <sup>ns</sup>	ns	ns
SPD3 vs Esc	1,561 <sup>ns</sup>	*	ns
SPD3 vs Mata	1,417 <sup>ns</sup>	*	*
Mata vs Esc	1,409 <sup>ns</sup>	ns	ns
<u>25 a 30 cm</u>			
SPD20 vs SPD10	0,616 <sup>ns</sup>	ns	ns
SPD20 vs SPD3	0,923 <sup>ns</sup>	ns	ns
SPD20 vs Esc	0,501 <sup>ns</sup>	ns	ns
SPD20 vs Mata	3,825*	**	**
SPD10 vs SPD3	1,497 <sup>ns</sup>	ns	ns
SPD10 vs Esc	0,813 <sup>ns</sup>	**	**
SPD10 vs Mata	6,202**	ns	ns
SPD3 vs Esc	0,543 <sup>ns</sup>	ns	ns
SPD3 vs Mata	4,142**	**	*
Mata vs Esc	0,131**	**	**

SPD20: Sistema plantio direto contínuo por vinte anos; SPD10: Sistema plantio direto contínuo por dez anos; SPD3: Sistema plantio direto por três anos; Mata: Mata nativa; Esc: Solo escarificado.\*Significativo a 5%; \*\*Significativo a 1% e ns quando não significativo.



O solo de plantio direto SPD 20 possui maior densidade na camada superficial e o solo sob mata nativa possui maior conteúdo de carbono orgânico, essas condições garantem maior coesão e agregação entre as partículas resultando na maior capacidade de suporte de carga que estes manejos apresentam (JÚNIOR et al. 2015).

O manejo Esc apresentou diferença nos valores da pressão de preconsolidação quando comparado ao SPD 20 e Mata na camada de 0 a 5 cm, isso acontece pelo fato de que na camada superficial é o local onde acontece a maior desestruturação do solo ocasionada pela escarificação mecânica, resultando em um solo menos denso nesta camada (ROS et al. 2017). De acordo com Mendes et al. (2019), a densidade apresenta alta correlação com a pressão de preconsolidação o que explica o fato do solo escarificado ser mais suscetível a deformações quando comparado a manejos conduzidos por longos períodos sem revolvimento.

A compressibilidade do solo é dependente do conteúdo de água, quanto menor o teor de água, maior é a resistência da matriz do solo a deformação (GLUCHOWSKI et al. 2019), dessa forma o conteúdo gravimétrico de água no solo e a pressão de preconsolidação apresentam valores inversamente proporcionais. Com o aumento da umidade gravimétrica diminui a pressão de preconsolidação, uma vez que o solo úmido se deforma com maior facilidade diminuindo a capacidade de suportar carga (REIS et al. 2018).

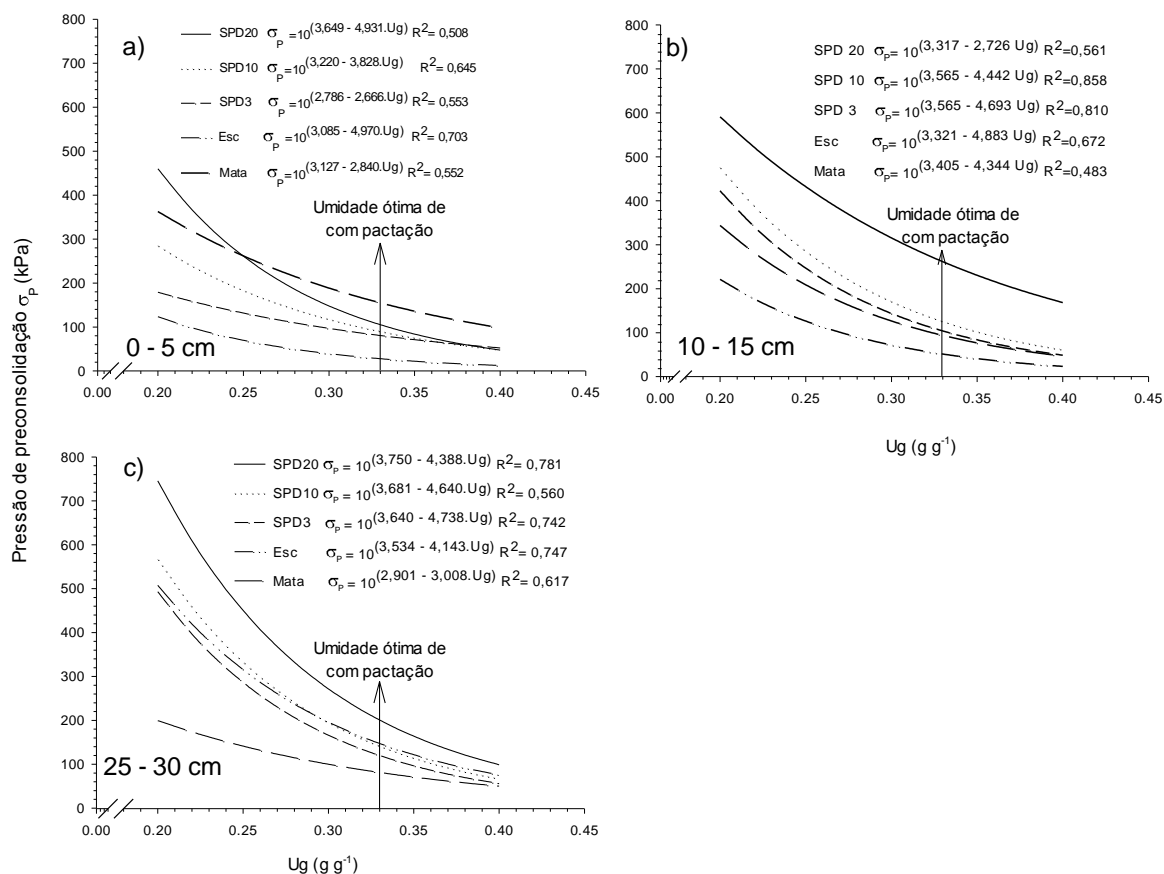
O tempo de uso do solo sem perturbação mecânica de sua estrutura é um fator que influencia os valores da pressão de preconsolidação, com maior tempo de uso em áreas de plantio direto maior é a resistência que este solo apresenta a deformações principalmente na camada de 10 a 20 cm onde o solo se mostra mais resistente a deformação quando submetido a aplicação de pressões (DAS et al. 2018).

O tempo de uso da terra em plantio direto contínuo após a escarificação favorece a estruturação do solo, uma vez que o histórico de pressões somado ao efeito de endurecimento da idade de um solo garantem maior coesão e com isso maior resistência a deformação, mantendo sua estruturação, proporcionando boas condições para o desenvolvimento de raízes das plantas (REICHERT et al. 2016). Para um solo que sofre uma alteração de sua estrutura física é necessário um período de 20 anos para que a as qualidades estruturais se reestabeleçam novamente (SOHRABI et al. 2019)

A análise das equações de regressão de compressibilidade, após a comparação pelo teste F mostra a diferença entre os sistemas de manejo. Na camada de 0 a 5 cm o SPD20 é o manejo que apresenta a curva de compressão com os maiores valores de pressão de preconsolidação (Tabela1), sendo assim nos primeiros 5 cm de profundidade o SPD 20 é mais resistente a deformação quando comparados as demais sistemas avaliados (Figura 1). O estado

de compactação nas camadas superficiais ocasionado pelo longo histórico de aplicações de cargas sobre o solo proporciona maior resistência a deformação garantindo maior capacidade de suporte de carga na camada mais superficial do solo (GUIMARÃES et al. 2019). Para a camada de 0 a 5 cm o sistema SPD10 se mostrou mais suscetível a compactação por apresentar menores valores de pressão de preconsolidação com o mesmo conteúdo de água quando comparado ao sistema SPD 20 (Figura 1).

Figura 1-Modelos da capacidade de suporte de carga para diferentes camadas nas diferentes áreas estudadas. Camada de 0 a 5 cm (a), camada de 10 a 15 cm (b), camada de 25 a 30 cm (c).



Áreas de plantio direto possuem maior compactação relativa na superfície por apresentar maior densidade (SALES et al. 2016), sendo assim os atributos físicos desta camada são severamente influenciados pelo manejo de forma que maiores valores de preconsolidação apresentados pelo SPD 20 garantem que o solo seja capaz de suportar maior carga sem causar limitações ao desenvolvimento de raízes (PIRES et al. 2012).

Entretanto o manejo Esc foi o manejo que apresentou os valores mais baixos para a pressão de preconsolidação para as camadas de 0 a 5 cm e 10 a 15 cm (Figura 1). A escarificação é uma intervenção mecânica que destrói parcialmente estrutura do solo com o objetivo aumentar a porosidade (SEIDEL et al. 2018), dessa forma com o aumento da porosidade e a diminuição da densidade o solo se torna mais suscetível a compactação, por se deformar facilmente quando submetido a aplicação de uma carga sobre a sua superfície, sobretudo em condições de alto conteúdo umidade (DRESCHER et al. 2016).

Tabela 2- Comparação das equações de regressão de compressibilidade entre as profundidades de amostragem, utilizando o teste F para as diferentes camadas da mesma área e método proposto por Sari et al. (2018) para a comparação dos parâmetros “a” e “b” entre as equações.

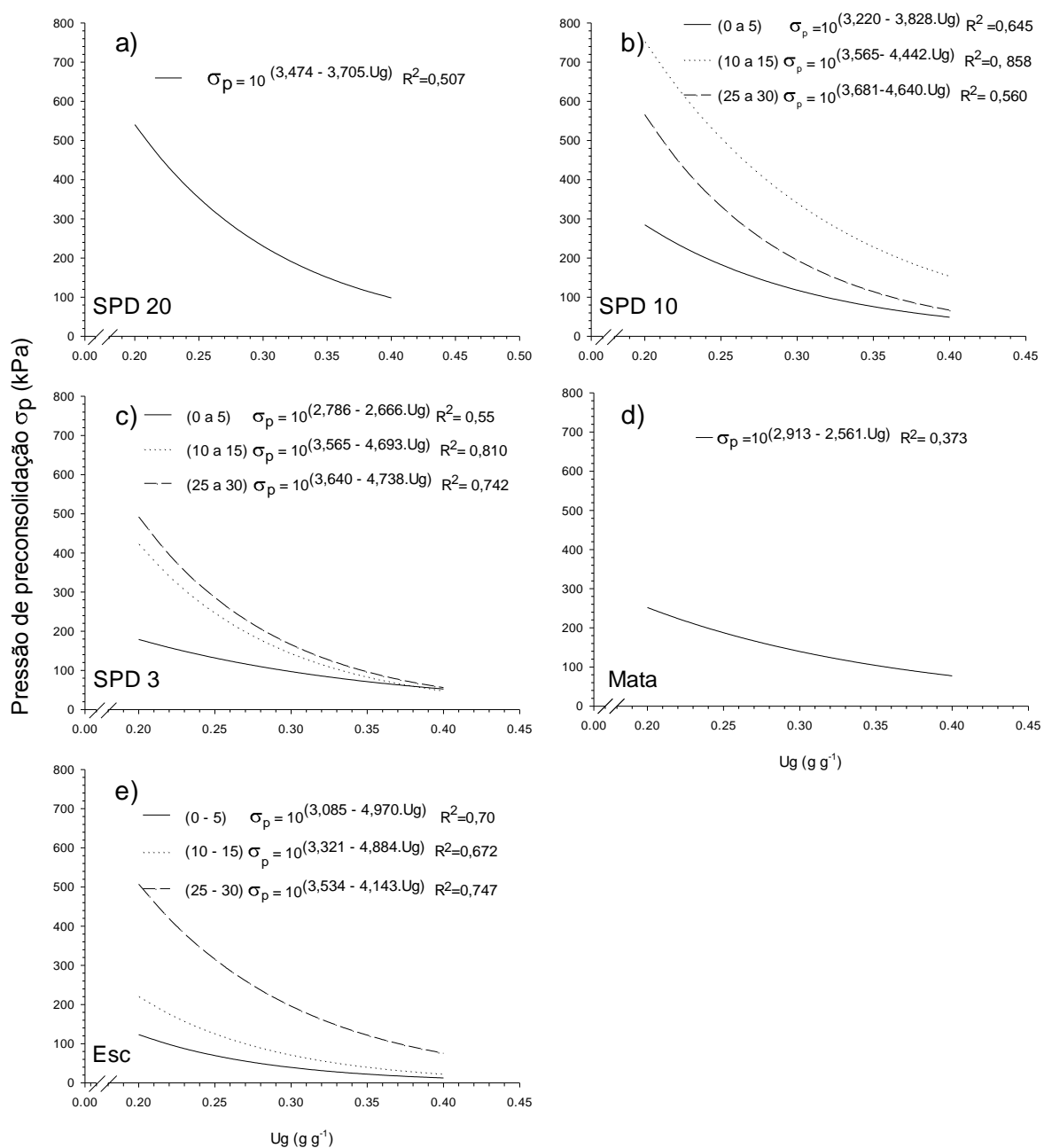
Áreas	Camada	F	F	
			Coefficiente angular, a	Coefficiente linear, b
SPD 20	(0 - 5) vs (10 - 15)	0,565 <sup>ns</sup>	ns	ns
	(10 - 15) vs (25 - 30)	0,687 <sup>ns</sup>	ns	ns
	(0 - 5) vs (25 - 30)	1,218 <sup>ns</sup>	ns	ns
SPD 10	(0 - 5) vs (10 - 15)	0,223*	ns	ns
	(10 - 15) vs (25 - 30)	0,697 <sup>ns</sup>	ns	ns
	(0 - 5) vs (25 - 30)	0,155*	ns	*
SPD 3	(0 - 5) vs (10 - 15)	5,730*	ns	ns
	(10 - 15) vs (25 - 30)	0,651 <sup>ns</sup>	ns	ns
	(0 - 5) vs (25 - 30)	0,113*	ns	ns
Mata	(0 - 5) vs (10 - 15)	0,757 <sup>ns</sup>	ns	ns
	(10 - 15) vs (25 - 30)	0,524 <sup>ns</sup>	ns	ns
	(0 - 5) vs (25 - 30)	1,443 <sup>ns</sup>	ns	ns
Esc	(0 - 5) vs (10 - 15)	0,317*	ns	ns
	(10 - 15) vs (25 - 30)	13,882**	*	ns
	(0 - 5) vs (25 - 30)	4,411**	**	*

SPD20: sistema plantio direto contínuo por vinte anos; SPD10: Sistema plantio direto contínuo por dez anos; SPD3: Sistema plantio direto contínuo por três anos; Mata: Mata nativa; Esc: Solo escarificado. \*significativo a 5%; \*\*Significativo a 1% e ns quando não significativo.

Para a camada 10 a 15 cm o manejo SPD20 apresentou diferença significativa quando comparado com a Mata, demonstrado pelo teste F (Tabela 1). Entretanto os manejos SPD10 e SPD3 não apresentaram diferença da Mata, estes resultados demonstram que o tempo de uso após escarificação exerce influência sobre o comportamento compressivo do solo também para a camada de 10 a 15 cm onde o manejo SPD20 apresentou um solo mais resistente a deformação. Contudo além da camada superficial as camadas mais profundas também são influenciadas pelo manejo, uma vez que a partir dos 10 cm de profundidade o solo apresenta maior resistência a deformação o que altera o seu comportamento compressivo (DIAS JUNIOR et al. 1995).

Com o aumento do tempo de execução do plantio direto o solo torna-se mais resistente a deformações isso pode ser verificado na camada de 0 a 5 cm e 10 a 15 cm , onde os sistemas SPD20 e o SPD10 apresentam diferença pelo teste F (Tabela 1) quando são comparados com a mata nativa, desta forma o tempo de uso sem perturbação mecânica da estrutura do solo proporciona maior resistência a compactação devido a maior coesão entre as partículas (MORAES et al, 2017).

Figura 2- Modelos da capacidade de suporte de carga para diferentes camadas de cada área estudada.



Segundo Burgreaver (2019), o solo de mata nativa apresenta maior porosidade nas camadas mais profundas quando comparado a manejos submetidos a ação antrópica. Para o manejo SPD 20 um único modelo da capacidade de suporte de carga foi ajustado para as três camadas estudadas. Dessa forma a maior porosidade na camada de 25 a 30 cm confere uma menor capacidade de suporte de carga apenas para o solo sob mata nativa que apresentou diferença quando comparado aos demais manejos. Solos conduzidos sob manejos SPD10, SPD3 e Esc apresentam alteração da capacidade de suporte de carga nas diferentes camadas estudadas (Tabela 3) sendo representados por diferentes parâmetros do modelo da pressão de preconsolidação para cada profundidade em cada manejo (Figura 2), já os manejos Mata e SPD 20 não apresentaram diferenças entre as camadas estudadas onde cada manejo apresenta um único modelo da capacidade de suporte de carga para as três camadas estudadas (Figura 2). O tempo de uso em plantio direto contínuo sem revolvimento exerce influência sobre o comportamento compressivo do solo, sendo que a partir dos 10 cm de profundidade o solo sob mata nativa se mostra mais suscetível a deformações quando comparado aos solos cultivados (ALBERT et al. 2018).

### 3.6 CONCLUSÃO

A pressão de preconsolidação aumenta com o tempo de execução de plantio direto, sobretudo nos primeiros 5 cm de profundidade.

Solo conduzido em plantio direto contínuo por vinte anos sem intervenção mecânica apresentou os maiores valores de pressão de preconsolidação nos primeiros 5 cm de profundidade quando comparado a manejos sob plantio direto com menor tempo de plantio direto contínuo após escarificação.

A camada de 25 a 30 cm é a profundidade que apresenta a menor influência do uso em sistema plantio direto.

Solo sob Mata que apresenta os menores valores de pressão de preconsolidação em relação aos solos conduzidos sob manejo agrícola na camada de 25 cm de profundidade.

### 3.7 REFERÊNCIAS

ALBERT, R. P. et al. Physico-mechanical attributes of a Typic Hapludox in areas with different sugarcane cultivation times. **Rev. Bras. Cienc. Agrar.**, Recife, v.13, n.2, e5536, 2018

BRAGA, F. V. A. et al. Propriedades Mecânicas e Permeabilidade ao Ar em Topossequência Argissolo-Gleissolo: Variação no Perfil e Efeito de Compressão. **R. Bras. Ci. Solo**, 39:1025-1035, 2015

BURGREVER, J. C. et al. Propriedades Físicas Indicadoras da Qualidade do Solo sob Sistemas de Manejo Alta-Floresta. **Revista Científica Rural**. v.21, n.2, 2019

CRISPIM, F. A. et al. COMPACTAÇÃO DE SOLOS EM LABORATÓRIO: EFEITO DO DIÂMETRO E DO NÚMERO DE CAMADAS DO CORPO DE PROVA. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.39, n.3, p.535-542, 2015

CORTEZ, J. W. et al. AVALIAÇÃO DA INTENSIDADE DE TRÁFEGO DE TRATORES EM ALGUNS ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM ARGISSOLO AMARELO. **R. Bras. Ci. Solo**, 38:1000-1010, 2014

DAS, S. M. A. et al. Impact of Tillage and Residue Management on Water and Thermal Regimes of a Sandy Loam Soil under Pigeonpea-Wheat Cropping System. **Journal of the Indian Society of Soil Science**, Vol. 66, n.1, p 40-52 (2018)

DIAS JUNIOR, M.S. ; PIERCE, F.J. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from Soil compression curves. **Soil Technol.**, 8:139-151, 1995.

DRESCHER, M. S. et al. Duração das alterações em propriedades físico-hídricas de Latossolo argiloso decorrentes da escarificação mecânica. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.51, n.2, p.159-168, fev. 2016

DOMIT, L. A. et al. Tempo de adoção do sistema plantio direto e a relação com atributos do solo. **Revista Agrarian**, Dourados, v.7, n.26, p.560-569, 2014

FEITOSA, J. R. et al. Influência da Pressão Interna dos Pneus e da Velocidade de Deslocamento nos Parâmetros Operacionais de um Trator Agrícola e nas Propriedades Físicas do Solo. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v.35, n.1, p.117-127, 2015

GIRARDELLO, V. C. et al. Resistência do Solo à Penetração e Desenvolvimento Radicular da Soja sob Sistema Plantio Direto com Tráfego Controlado de Máquinas Agrícolas. **Scientia Agraria**, Curitiba, A vol. 18n., p. 86-96 2017

GLUCHOWSKI, A. et al. Undrained Pore Pressure Development on Cohesive Soil in Triaxial Cyclic Loading. **Appl. Sci.**, 9, 3821, 2019

GUBIANI, P. I. et al. EXCEL ADD-IN TO MODEL THE SOIL COMPRESSION CURVE. **Engenharia Agrícola**, 37(3), 603-610, 2017

GUIMARÃES, J. W. S. et al. Soil compaction on traffic lane due to soil tillage and sugarcane mechanical harvesting operations. **Sci. Agric.** v.76, n.6, p.509-517, 2019

LIER, I. V.; GUBIANI, P. I. Beyond the “Least Limiting Water Range”: RETHINKING SOIL PHYSICS Research in Brazi. **R. Bras. Ci. Solo**, 39:925-939, 2015

JUNIOR, G. F. S. et al. Physical quality of an Oxisol under no-tillage subjected to different cropping systems. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.51, n.9, p.1568-1574, set. 2016

JÚNIOR, E. N. et al. Compressibility And Penetrability of Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico (Oxisol) Under Varied Management Systems And Land Uses. **R. Bras. Ci. Solo**, 39:86-93, 2015

KLEIN, V. A. et al. Variabilidade espacial do intervalo hídrico ótimo de solos cultivados em sistema plantio direto. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.51, n.11, p.1890-1898, nov. 2016

KUNZ, M. et al. COMPACTAÇÃO DO SOLO NA INTEGRAÇÃO SOJA-PECUÁRIA DE LEITE EM LATOSSOLO ARGILOSO COM SEMEADURA DIRETA E ESCARIFICAÇÃO. **R. Bras. Ci. Solo**, 37:1699-1708, 2013

LOPES, E. S. et al. AVALIAÇÃO DA UMIDADE NA COMPACTAÇÃO DO SOLO SUBMETIDO AO TRÁFEGO DE MÁQUINAS DE COLHEITA FLORESTAL. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.35, n.3, Edição Especial, p.659-667, 2011

MENDES, P. M. B. et al. Estimation of precompression stress in an Ultisol cultivated with sugarcane. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v.23, n.5, p.336-340, 2019

MION, R. L. et al. TENSÕES APLICADAS NO SOLO PELAS DIFERENTES PRESSÕES DO PNEU DE UM TRATOR AGRÍCOLA. **Eng. Agríc., Jaboticabal**, v.36, n.1, p.63-77, 2016

MORAES, M. T. Age-hardening phenomena in an oxisol from the subtropical region of Brazil. **Soil & Tillage Research** 170, 27–37, 2017

NAGAHAMA, et al. Efeitos da escarificação mecânica nos atributos físicos do solo e agronômicos do capim elefante. **Rev. Ceres**, Viçosa, v. 63, n.5, p. 741-746, set/out, 2016

IORI, P. et al. PRESSÃO DE PRECONSOLIDAÇÃO COMO FERRAMENTA DE ANÁLISE DA SUSTENTABILIDADE ESTRUTURAL DE CLASSES DE SOLOS COM DIFERENTES USOS. **R. Bras. Ci. Solo**, 36:1448-1456, 2012

OLIVEIRA, D. G. et al. Correlação espacial de atributos físicos do solo e produtividade de tomate industrial. **Revista Agro@mbiente On-line**, v. 12, n. 1, p. 1-10, janeiro-março, 2018

OLIVEIRA, D. M. S. et al. Qualidade física do solo sob diferentes sistemas de manejo e aplicação de dejetos líquidos suíno. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v.19, n.3, p.280–285, 2015

PACHECO, E. P. et al. Compressibilidade, resistência a Penetração e Intervalo hídrico Ótimo de um Argissolo Amarelo Cultivado com Cana-de-açúcar nos Tabuleiros costeiros de Alagoas. **R. Bras. Ci. Solo**, 35:403-415, 2011

PINTO, L. C. et al. Qualidade física de um Latossolo Vermelho distroférico sob diferentes usos. **Revista Agrogeoambiental**, Pouso Alegre, v. 10, n. 3, set. 2018

PIRES, B. S. Modelos de Capacidade de Suporte de Carga de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob Diferentes Usos e Manejos. **R. Bras. Ci. Solo**, 36:635-642, 2012

REIS, D. A. et al. Compressibility and water availability in Albaqualf soils under different deployment times in no-tillage. **Sci. Agric.** v.75, n.5, p.393-399, 2018

REICHARDT, J. M. et al. Conceptual framework for capacity and intensity physical soil properties affected by short and long-term (14 years) continuous no-tillage and controlled traffic. **Soill & Tillage Research**, n.158, p.123-136, 2016

ROS, B. A. et al. Sistemas de preparo do solo para o cultivo da batata-doce. **Bragantia**, Campinas, v. 76, n. 1, p.113-124, 2017

SÁ M. A. C. et al. Qualidade física do solo e produtividade da cana-de-açúcar com uso da escarificação entre as linhas de plantio. **Pesc. Agropec. Bras.**, Brasília, v.51, n.9, p.1610-1622, set. 2016

SALES, R. P. et al. Qualidade física de um Latossolo sob plantio direto e preparo convencional no semiárido. **Rev. Ciênc. Agron.**, v. 47, n. 3, p. 429-438, jul-set, 2016

SARI, B. G. et al. Nonlinear Modeling for Analyzing Data from Multiple Harvest **Crops. Agronomy Journal**, Volume 110, Issue 6, 2018

SEIDEL, E. P. et al. Soybean Yield, Soil Porosity and Soil Penetration Resistance under Mechanical Scarification in No-Tillage System. **Journal of Agricultural Science**; Vol. 10, No. 4; 2018

SEKI, A. S. et al. Efeitos de práticas de descompactação do solo em área sob sistema plantio direto. **Rev. Ciênc. Agron.**, v. 46, n. 3, p. 460-468, 2015

SILVA, R. F. et al. Impacts of land-use and management systems on organic carbon and water-physical properties of a Latossolo Amarelo (Oxisol). **Ciências Agrárias**, Londrina, v. 38, n. 1, p. 109-124, jan./fev. 2017

SILVA, V. R. et al. Fatores Controladores da Compressibilidade de Um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico Arênico e de Um Latossolo Vermelho Distrófico Típico. II - Grau De Saturação Em Água. **R. Bras. Ci. Solo**, 26:9-15, 2002

SOHRABI, H. et al. Post-Harvest Evaluation of Soil Physical Properties and Natural Regeneration Growth in Steep-Slope Terrains. **Forests**, 10, 1034, 2019

SOUSA, E. D. et al. Matéria orgânica e agregação do solo após conversão de “campos de murundus” em sistema plantio direto. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.51, n.9, p.1194-1202, set. 2016

SOUZA, G. L. et al. Soil physico-hydraulic properties under organic conilon coffee intercropped with tree and fruit species. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.52, n.7, 2017

TEIXEIRA, P. C. et al. Manual de métodos de análise de solo. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF : **Embrapa**, 2017.



VALADÃO, F.C.A. et al. ADUBAÇÃO FOSFATADA E COMPACTAÇÃO DO SOLO: SISTEMA RADICULAR DA SOJA E DO MILHO E ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO. **R. Bras. Ci. Solo**, 39:243-255, 2015

VIEIRA, R. L. et al. ATRIBUTOS FÍSICOS RELACIONADOS À COMPACTAÇÃO DE SOLOS SOB VEGETAÇÃO NATIVA EM REGIÃO DE ALTITUDE NO SUL DO BRASIL. **R. Bras. Ci. Solo**, 36:1733-1744, 2012

#### **4 ARTIGO 3: ESTIMATIVA DO USO DE PLANTIO DIRETO CONTÍNUO APÓS A ESCARIFICAÇÃO SOBRE O INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO DE UM LATOSSOLO VERMELHO**

##### 4.1 RESUMO

A modelagem dos atributos físicos do solo pode ser útil para integrar os resultados de vários indicadores de qualidade. O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito do manejo sobre o intervalo hídrico ótimo (IHO) em um Latossolo sob diferentes tempos de execução do plantio direto após a escarificação. O estudo foi realizado em cinco áreas distintas: mata nativa (Mata), plantio direto escarificado (Esc), três anos de plantio direto após a escarificação (SPD 3), dez anos de plantio direto após escarificação (SPD 10) e plantio direto vinte anos após a escarificação (SPD 20). As coletas de solo foram realizadas com cilindros metálicos em vinte pontos amostrais em três profundidades 0 a 5, 10 a 15, e 25 a 30 cm, em cada ponto amostral foi coletada uma amostra por camada estudada. Foi realizado o ajuste dos parâmetros da curva de resistência a penetração do solo. O valor médio do IHO foi obtido pela diferença entre o limite superior e inferior do IHO. O manejo Esc alterou a estrutura física exercendo influência sobre o IHO. A amplitude do IHO é fortemente influenciada pelo valor de resistência a penetração considerado restritivo. O SPD 20 apresentou amplitude de IHO diferente de zero nos primeiros 30 cm de profundidade para todas as práticas de manejo estudadas.

**Palavras chave:** Plantio direto. Tempo. Estrutura física.

#### **PAPER 2: ESTIMATED NO-TILL TIME AFTER CHISELING OVER LAST LIMITING WATER RANGE IN A RED OXISOL**

##### 4.2 ABSTRACT

Modeling soil physical attributes can be useful for integrating the results of various quality indicators. The objective of this work was to evaluate the effect of management on the last limiting water range (IHO) in a Oxisol under different no-tillage execution times after chiseling. The study was conducted in five distinct areas: native forest (Mata), chiseling (Esc), three years of no-tillage after chiseling (SPD3), no-tillage ten years after chiseling (SPD10) and no-tillage twenty years after chiseling (SPD20). Soil samples were made with metal cylinders at twenty sampling points at the three depths from 0 to 5. 10 to 15 and 25 to 30 cm, at each sampling point sample per layer was collected. The curve parameters of soil penetration resistance were adjusted. The average value of the IHO was obtained by the

difference between the upper and lower limit of the IHO. Chiseling system altered soil physical structure influencing IHO. The amplitude of the IHO is strongly influenced by the restrictive penetration resistance values. SPD20 presented non-zero IHO value at the first 30 cm depth for all soil systems studied.

**Keywords:** No-tillage. Age hardsetting Physical Structure.

#### 4.3 INTRODUÇÃO

A modelagem da dos atributos físicos vem sendo utilizada em diversos estudos de manejo do solo, frente a isto se destaca o método do Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) que tem recebido grande atenção por possibilitar a identificação da densidade crítica do solo (TAVANTI et al 2019), sendo uma ferramenta útil na quantificação da qualidade física do solo conduzido sob diferentes manejos (BEZERRA et al. 2019)

O cultivo das áreas de plantio direto é realizado com a utilização de máquinas cada vez mais pesadas onde o solo é intensamente trafegado durante todo o ciclo de desenvolvimento das culturas (ROSA et al. 2012). As condições de umidade em que o solo se encontra quando trafegado geralmente favorecem a compactação, sendo praticamente inevitável que este fenômeno aconteça (FILHO et al. 2012).

Sistemas de plantio direto de longa duração possuem um histórico de pressões aplicadas a sua superfície pelo tráfego de máquinas que pode resultar em compactação, entretanto é necessário entender como o acúmulo do efeito do tráfego ao longo tempo é capaz de provocar um nível de compactação prejudicial ao crescimento de raízes (KELLER et al. 2019).

Uma das ferramentas mais utilizadas em sistemas de plantio direto para auxiliar as decisões de manejo é determinar qual o nível de compactação prejudicial considerando a densidade e a aeração do solo (LIMA et al. 2012), assim a predição da resistência mecânica a penetração limitante ao desenvolvimento de raízes utilizando o Intervalo Hídrico Ótimo tem sido utilizada (ROSSETI; CENTURION, 2017), este método quantifica a capacidade de restringir o desenvolvimento de raízes relacionada com a densidade e com o conteúdo de água existentes na matriz do solo (PEREIRA et al. 2015).

A escarificação do solo é uma prática utilizada para aumentar a porosidade e diminuir a densidade melhorando a qualidade física de solos compactados, contudo os efeitos da escarificação perduram por um período de tempo relativamente curto, considerando a magnitude de um sistema de plantio direto (DRESCHER et al. 2016), sendo assim é necessário

determinar com maior precisão como o manejo influencia nos valores de densidade crítica em solo sob sistemas de plantio direto de longa duração, para auxiliar na decisão de aplicar a prática da escarificação como forma de melhorar a qualidade física do solo (SEKI et al. 2015). Utilizar o intervalo hídrico ótimo pode ser uma ferramenta importante para quantificar resistência mecânica restritiva para o crescimento de raízes relacionada a densidade e ao conteúdo volumétrico de água, sendo uma forma precisa para aferir os valores críticos de densidade (DIAS et al. 2016).

O termo compactação refere-se a deformação que acontece no solo devido a aplicação de uma carga com resultante aumento da densidade decorrente da redução do volume e diminuição do espaço poroso (SOBREIRA et al. 2018). As práticas de manejo podem causar alterações na estrutura do solo exercendo reflexos sobre o crescimento radicular (SILVA et al. 2017), onde a compactação causa um impedimento físico por dificultar a penetração das raízes concomitante a deficiência de aeração (MORAES et al. 2018), com isso as plantas acabam apresentando menor tamanho de raízes e reduzindo o volume de solo explorado para extrair nutrientes (BALBINOT Jr. et al. 2017) como também apresentam maior suscetibilidade aos períodos em que acontece deficiência hídrica.

Em sistemas de plantio direto a compactação do solo se concentra na camada de 10 a 30 cm de profundidade onde o solo apresenta maior densidade e com isso maior resistência a penetração ocasionada pelo tráfego de máquinas (CORTEZ et al. 2018), este efeito do aumento da densidade do solo caracterizando compactação, perdura por um longo período de tempo (SORACCO et al. 2015), entretanto pode ser mitigado em um longo prazo pelo manejo sem intervenção mecânica com a utilização de práticas de recuperação e rotação de culturas (BROWN et al. 2018). Áreas cultivadas por longos períodos sob sistema plantio direto não apresentam limites críticos de densidade com níveis prejudiciais de compactação, dessa forma não é necessária nenhuma intervenção mecânica para aumentar os espaços porosos do solo (NUNES et al. 2015).

A hipótese deste estudo é que áreas conduzidas sob plantio direto por longo prazo não apresentam nível de compactação prejudicial, pois o IHO se mantém positivo na camada de solo explorada pelo sistema radicular das culturas.

O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito do manejo sobre o intervalo hídrico ótimo em solo escarificado e plantio direto com diferentes tempos de uso após a escarificação.

#### 4.4 MATERIAL E MÉTODOS

A descrição dos locais onde foram realizadas as amostras e manejos do solo podem ser consultados no item Materiais e Métodos do Artigo 1 desta dissertação.

##### 4.4.1 Análise física

As amostras das cinco áreas onde foram realizadas as coletas foram utilizadas para elaboração do modelo matemático que representa o intervalo IHO. Em laboratório as amostras foram preparadas, saturadas e submetidas a tensão de 6 kPa por 48 horas na mesa de tensão e 10 kPa na câmara de Richards, após este período as amostras foram pesadas para determinação da microporosidade conforme metodologia descrita em Teixeira et al. (2017). Para a obtenção dos valores que compõe a curva de resistência a penetração as amostras foram separadas em quatro grupos contendo quinze amostras em cada grupo, todos os grupos foram submetidos a secagem ao ar depois que as amostras foram retiradas da mesa de tensão 6 kPa. O primeiro grupo perdeu 5 g, segundo grupo perdeu 10 g, terceiro grupo perdeu 20 g, quarto grupo perdeu 30 g. Os testes de resistência a penetração mecânica foram realizados utilizando um penetrômetro de bancada. Posteriormente as amostras foram levadas a estufa sob temperatura de 105°C por 48 horas, após este procedimento as amostras foram novamente pesadas para a determinação dos atributos físicos do solo.

A curva de resistência mecânica a penetração, descrita pela relação funcional entre RP, Ds e  $\theta$ , foi obtida pelo ajuste dos dados ao modelo não linear proposto por Busscher (1990), (equação 1), para todos os sistemas de uso e manejo:

$$RP = a.Ds^b. \theta^c \quad (1)$$

Onde: RP: resistência do solo a penetração mecânica do solo (MPa),  $\theta$  : o conteúdo volumétrico de água do solo ( $m^3 m^{-3}$ ); Ds: densidade do solo ( $Mg m^{-3}$ ), “a”, “b” e “c” são os parâmetros empíricos de ajuste do modelo.

O ajuste do modelo da curva de resistência a penetração foi feito por meio da função nls para modelos não lineares, empregando o programa estatístico do software R. Para o cálculo dos intervalos de confiança foi utilizado a função t.test. A umidade do solo a partir da qual a

resistência à penetração atingiu valores de 2,5; 3,0 e 3,5 MPa foi calculada pela equação 2, a qual representa um rearranjo da equação 1:

$$\theta = \left( \frac{\theta_{RP \text{ restritiva}}}{a \cdot D_s^b} \right)^{\left(\frac{1}{c}\right)} \quad (2)$$

A porosidade de aeração foi calculada pela equação 3 de forma a garantir que o solo apresente pelo menos 10% de espaço poroso preenchido por ar:

$$PA = PT - (PT \cdot 0,1) \quad (3)$$

Onde: PA= Porosidade de aeração ( $m^3 m^{-3}$ ), PT= Porosidade total ( $m^3 m^{-3}$ )

Os valores de  $\theta_{CC}$  foram obtidos nos potenciais de -10kPa na câmara de Richards e o  $\theta_{PMP}$  foi obtido no potencial de -1500 kPa utilizando o psicrômetro WP4. Os valores de umidade volumétrica em que a RP atinge 2,5 ; 3 e 3,5 MPa foi obtido por meio da equação 2. O IHO foi calculado como a diferença entre os limites superior e inferior de  $\theta$ , em que ocorrem os limites das propriedades físicas envolvidas. O limite superior é o menor valor de umidade, considerando  $\theta_{CC}$  ou  $\theta_{PA}$ ; e o inferior é o maior valor de umidade entre  $\theta_{PMP}$  e  $\theta_{RP}$  restritiva. Assim, a expressão do cálculo depende dos valores limites. O IHO foi calculado através da diferença entre os limites superior e inferior de umidade volumétrica, em que ocorrem os limites do IHO. O limite superior é o menor valor de umidade volumétrica, considerando  $\theta_{CC}$  ou  $\theta_{PA}$ ; e o inferior é o maior valor de umidade volumétrica entre  $\theta_{PMP}$  e  $\theta_{RP}$ . Assim, a expressão do cálculo depende dos valores limites:

$IHO = \theta_{CC} - \theta_{PMP}$ , para  $\theta_{CC} < \theta_{PA}$  e  $\theta_{PMP} > \theta_{RP}$ ;

$IHO = \theta_{CC} - \theta_{RP}$ , para  $\theta_{CC} < \theta_{PA}$  e  $\theta_{PMP} < \theta_{RP}$ ,

$IHO = \theta_{PA} - \theta_{PMP}$ , para  $\theta_{CC} > \theta_{PA}$  e  $\theta_{PMP} > \theta_{RP}$ ,

$IHO = \theta_{PA} - \theta_{RP}$ , para  $\theta_{CC} > \theta_{PA}$  e  $\theta_{PMP} < \theta_{RP}$ .

#### 4.4.2 Análise estatística

O ajuste dos parâmetros "a", "b" e "c" da equação que descreve a curva de resistência a penetração foi ajustado utilizando a função nls do software R. A comparação de médias de IHO foi realizada pelo intervalo de confiança, utilizado a função t.test do pacote Stats. A

representação gráfica da variação do IHO no perfil do solo foi realizada pela média dos valores do limite superior e inferior de cada manejo.

#### 4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com o aumento da resistência a penetração restritiva o corre o aumento dos valores de densidade em que unidade para RP restritiva substitui o PMP e conseqüentemente também acontece o aumento da área do intervalo hídrico ótimo (Figura 1).

Tabela 1- Estimadores dos parâmetros de regressão para a resistência a penetração (RP), em função da umidade volumétrica ( $\theta$ ), densidade do solo ( $D_s$ ) e da resistência a penetração restritiva (RP restritiva):  $RP = a.D_s^b . \theta^c$ .

Parâmetro	Estimados	Erro-padrão	t	Probabilidade*	R <sup>2</sup>
a	0,581	0,085	6,841	0,0001	0,73
b	2,935	0,276	10,603	0,0001	
c	-1,084	0,089	-12,118	0,0001	

\*Significância para os valores estimados dos parâmetros.

A umidade do solo a partir da qual a resistência a penetração atingiu valores 2,5; 3 e 3,5 MPa foi calculada pela equação 2.

$$\theta = \left( \frac{RP \text{ restriva}}{0,581 \cdot D_s^{2,935}} \right)^{\left( \frac{1}{-1,084} \right)} \quad (2)$$

A equação que estima a resistência restritiva ao crescimento de raízes em função da umidade e densidade do solo é descrita pela equação 1.

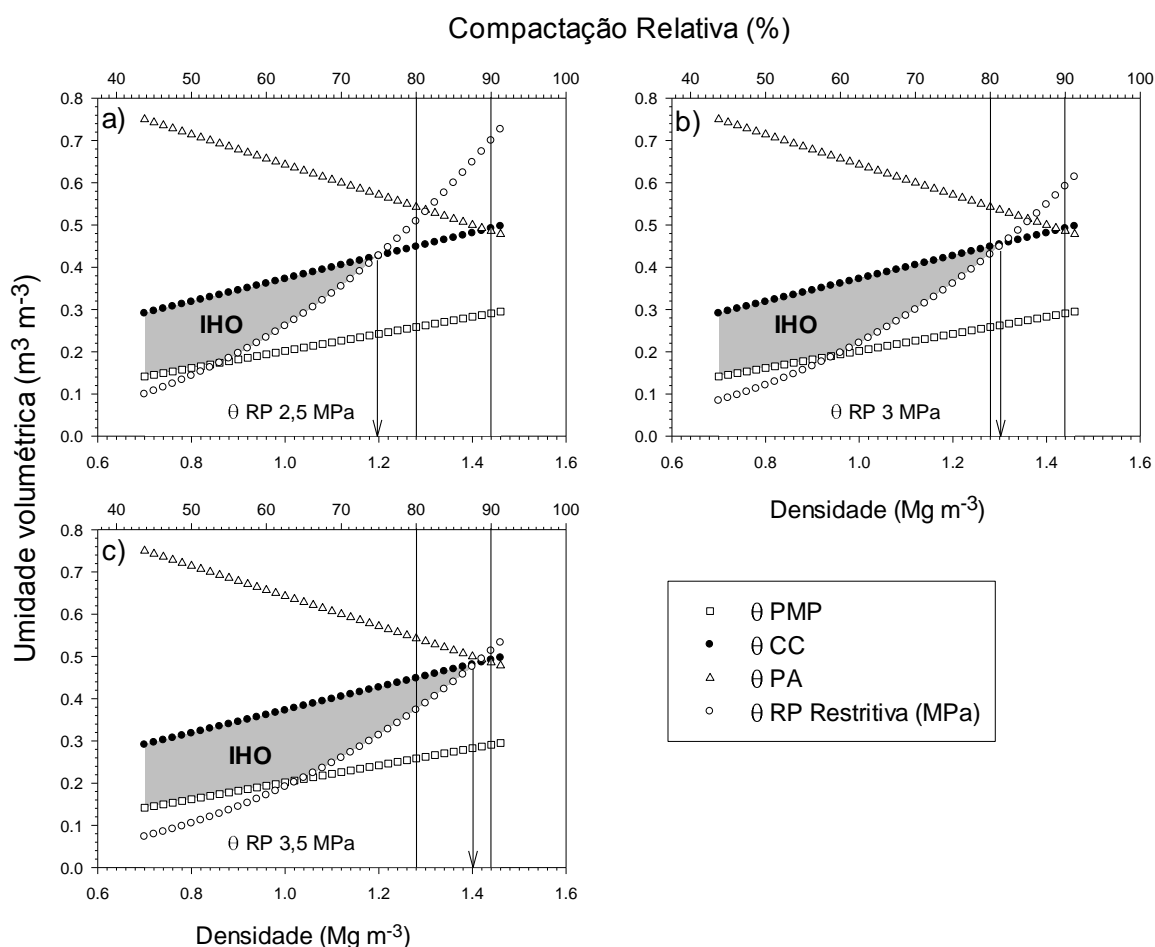
$$RP = 0,581 D_s^{2,935} \theta^{-1,084} \quad (1)$$

Segundo Tavanti et al. (2019), o intervalo hídrico ótimo indica o conteúdo de água do solo ideal para que o crescimento radicular não seja prejudicado, apresentando correlação positiva com a macroporosidade e porosidade total e correlação negativa com a densidade, microporosidade e resistência a penetração.

Considerando que os valores de resistência a penetração restritiva são variáveis entre as diferentes culturas, para a cultura do feijoeiro o valor de resistência a penetração do solo de 3 MPa inibe totalmente o desenvolvimento radicular limitando a planta de explorar o solo (KAISER et al. 2009), já para a cultura da soja a resistência a penetração 3 MPa provoca dificuldades no desenvolvimento de raízes mas não inibe totalmente o desenvolvimento radicular (RODRIGUES et al. 2017), segundo Tormena et al. (2007), para áreas mantidas em

plântio direto por longo prazo o valor de resistência a penetração crítica a ser considerado deve ser de 3,5 MPa, evidenciando que estas áreas tendem a apresentar uma boa condição estrutural para o desenvolvimento de raízes. Dessa forma as práticas de manejo adotadas exercem influência sobre o IHO onde os valores de densidade menores que o limite crítico (Figura 1) permitem o desenvolvimento normal de raízes (KAHLON; CHAWLA, 2017).

Figura 1-Variação do intervalo hídrico ótimo (IHO) em função da resistência a penetração considerada crítica. As setas indicam a densidade crítica e as e as linhas verticais indicam o intervalo de compactação relativa para a máxima produtividade das culturas.



CC= conteúdo de umidade na capacidade de campo ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ), PMP: conteúdo e umidade no ponto de murcha permanente, PA: Porosidade de aeração com espaço poroso total preenchido ar menos 10%, ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ), RP: conteúdo de umidade para o limite de resistência a penetração crítica do solo ( $\text{Mg m}^{-3}$ )

O aumento da RP restritiva provoca alteração na amplitude do IHO sendo assim conforme a RP restritiva aumenta de 2,5 MPa para 3,5 MPa ocorre o aumento dos valores de densidade em que o IHO é crescente. Restrições ao crescimento de raízes podem ser associados a um limite de densidade crítica (OHLAND et al. 2014), entretanto quando a compactação relativa é analisado em conjunto o com IHO (Figura 2), estes diferentes

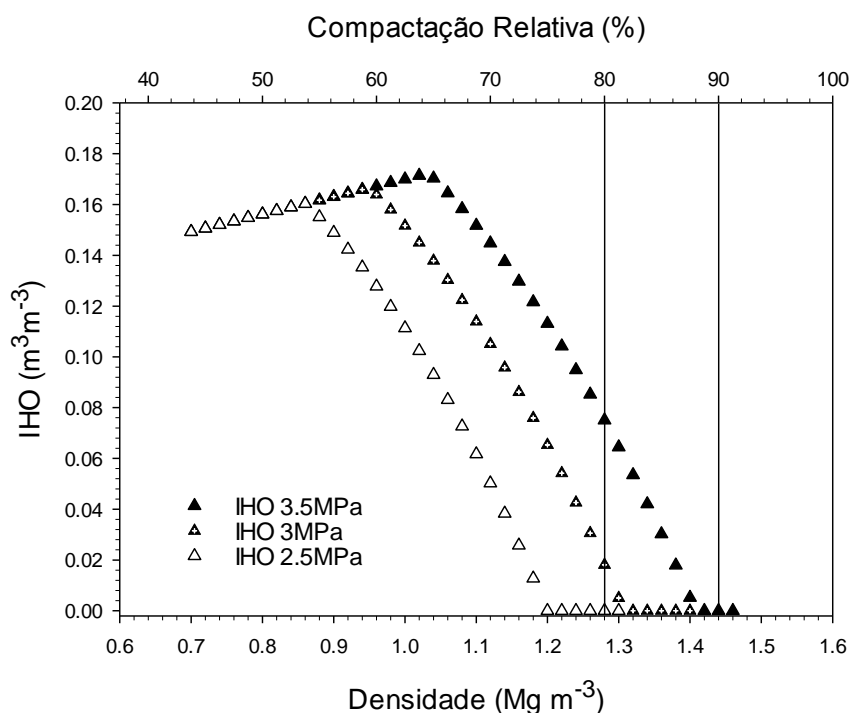


indicadores da qualidade física do solo mostram com maior precisão quais são os limites críticos de densidade (BETIOLI Jr et al. 2012), além de poder quantificar com maior discernimento como o IHO é alterado pelos valores de RP crítica.

O manejo pode exercer pequena influência sobre a densidade do solo, contudo quando considerados os valores de densidade na avaliação da amplitude do IHO é possível identificar com maior distinção as alterações provocadas (Figura 2). Sobretudo solos que apresentam valores altos de densidade refletem este efeito na amplitude do IHO (Figura 4) facilitando a avaliação da qualidade física entre os diferentes tipos de manejo utilizados (FASHI et. al. 2017).

O manejo aplicado a área de cultivo exerce influência sobre o IHO (Figura 3) uma vez que a escarificação do solo se mostra como uma alternativa eficiente para aumentar o IHO, pois o manejo Esc foi o manejo que apresentou valores de IHO mais semelhante a Mata especialmente para os valores resistência a penetração restritiva de 3 e 3,5 MPa. Intervenção mecânica deve ser utilizada para descompactação somente em situações onde solo apresenta baixa macroporosidade e densidade elevada causando efeitos prejudiciais a elongação das raízes que dificultam a exploração do perfil do solo pela planta (PEIXOTO et al. 2019).

Figura 2-Variação do IHO em função da compactação relativa e da densidade do solo.



Linhas verticais representam a compactação relativa de solos de textura argilosa onde as culturas apresentam a máxima produtividade.

Escarificar o solo periodicamente pode proporcionar boas condições para a penetração de raízes, entretanto a utilização da escarificação não proporciona somente o aumento da porosidade outros efeitos também são provocados por este tipo de manejo, segundo Campos et al. 2013, solos cultivados sob plantio direto apresentam teores de carbono orgânico mais elevados quando comparado aos solos manejados sob outros sistemas de manejo com revolvimento.

Contudo, quando o solo sofre intervenções mecânicas pela escarificação acontece uma modificação de sua estrutura podendo alterar o conteúdo de carbono orgânico em decorrência do aumento da macroporosidade que favorece a maior aeração (TORMENA et al. 2004), sendo que a estabilidade dos agregados também é um atributo afetado pela alteração estrutural, onde o solo passa a apresentar agregados menos estáveis deixando o solo mais suscetível a degradação de sua estrutura (PORTELLA, et al. 2012).

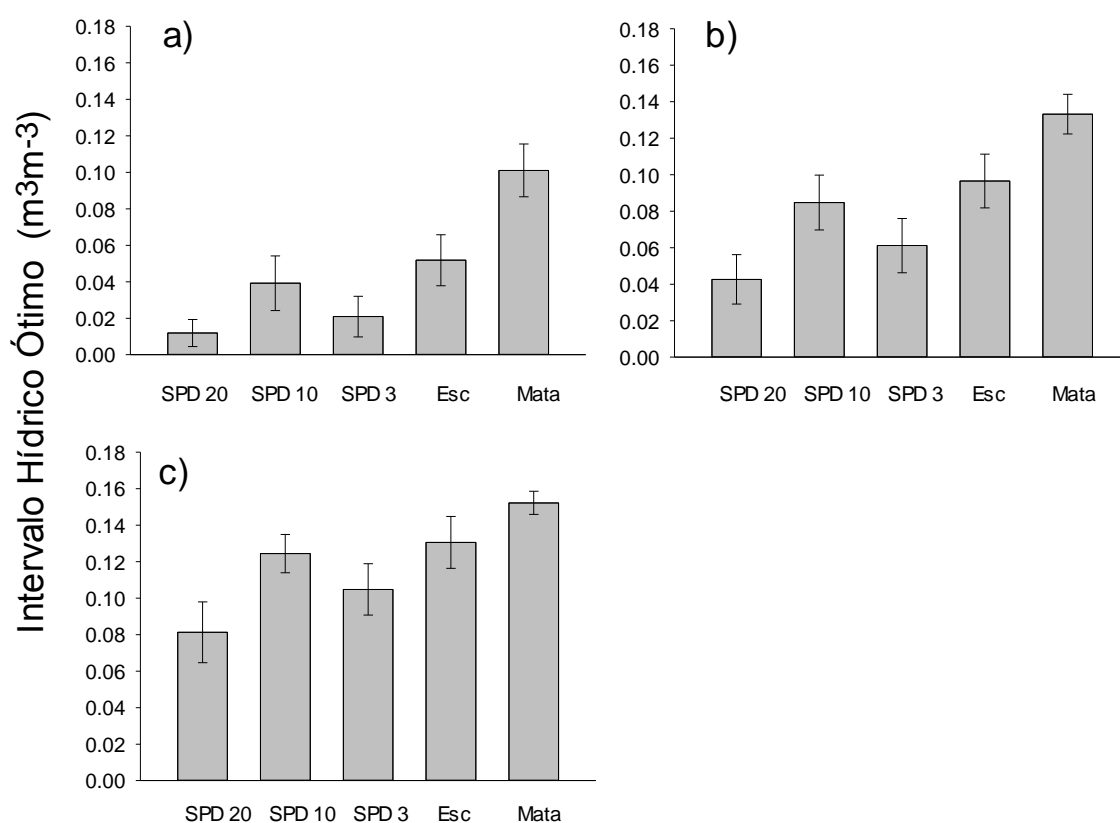
O manejo Esc apresentou valores de IHO muito semelhantes a mata nativa (Figura 3), entretanto com o aumento do tempo após a escarificação o solo tende a aumentar sua densidade refletindo diretamente na diminuição da amplitude do IHO, estes resultados mostram que embora a escarificação seja uma alternativa eficiente na descompactação do solo seus efeitos não perduram por longo prazo.

Segundo Drescher et. al. (2016) os efeitos da escarificação não são superiores a dois anos, dessa forma todo o trabalho demandado pela prática da escarificação não garante resultados por um longo prazo na manutenção dos efeitos que este manejo pode proporcionar. Com relação ao tempo de execução do plantio direto o SPD 3 apresenta uma grande redução no IHO quando comparado a Mata mas não apresenta diferença quando comparado ao SPD 20 e SPD10, isso demonstra como o aumento do IHO proporcionado pela escarificação do solo não se mantém a longo prazo, de acordo com Nunes et al. 2014, em apenas dezoito meses após a escarificação o solo apresenta valores de densidade muito semelhantes aos valores existentes antes da escarificação evidenciando que solos cultivados tendem a se adensar após a escarificação em um período de tempo inferior a dois anos.

A variação da média do IHO apresentada entre os manejos SPD 3, SPD10 e SPD 20 (Figura 3) não acontece em decorrência das intervenções mecânicas a que estes manejos foram submetidos, e sim pela variabilidade espacial que o IHO apresenta em áreas de plantio direto. O IHO de áreas conduzidas em plantio direto pode apresenta grande variabilidade mesmo quando considerada uma pequena distância em metros (KLEIN et al. 2016). A amplitude do IHO nos manejos estudados é fortemente influenciada pela RP restritiva considerada (Figura 4), apresentando variação nos primeiros 30 cm de profundidade em que o solo foi estudado,

sendo que a profundidade e o tipo de manejo adotado exercem influência sobre a amplitude do IHO (SILVA et al. 2017). A camada superficial apresenta maior macroporosidade e menor densidade quando comparada as camadas mais profundas (MILAGRES et al. 2018), isso explica como a amplitude do IHO é dependente dos valores de densidade que variam de acordo com a camada considerada (LIMA et al. 2019). Solos conduzidos sob plantio direto apresentam os maiores valores de densidade na camada de 10 a 20 cm, justificando assim a diminuição da amplitude do IHO nesta camada (Figura 4).

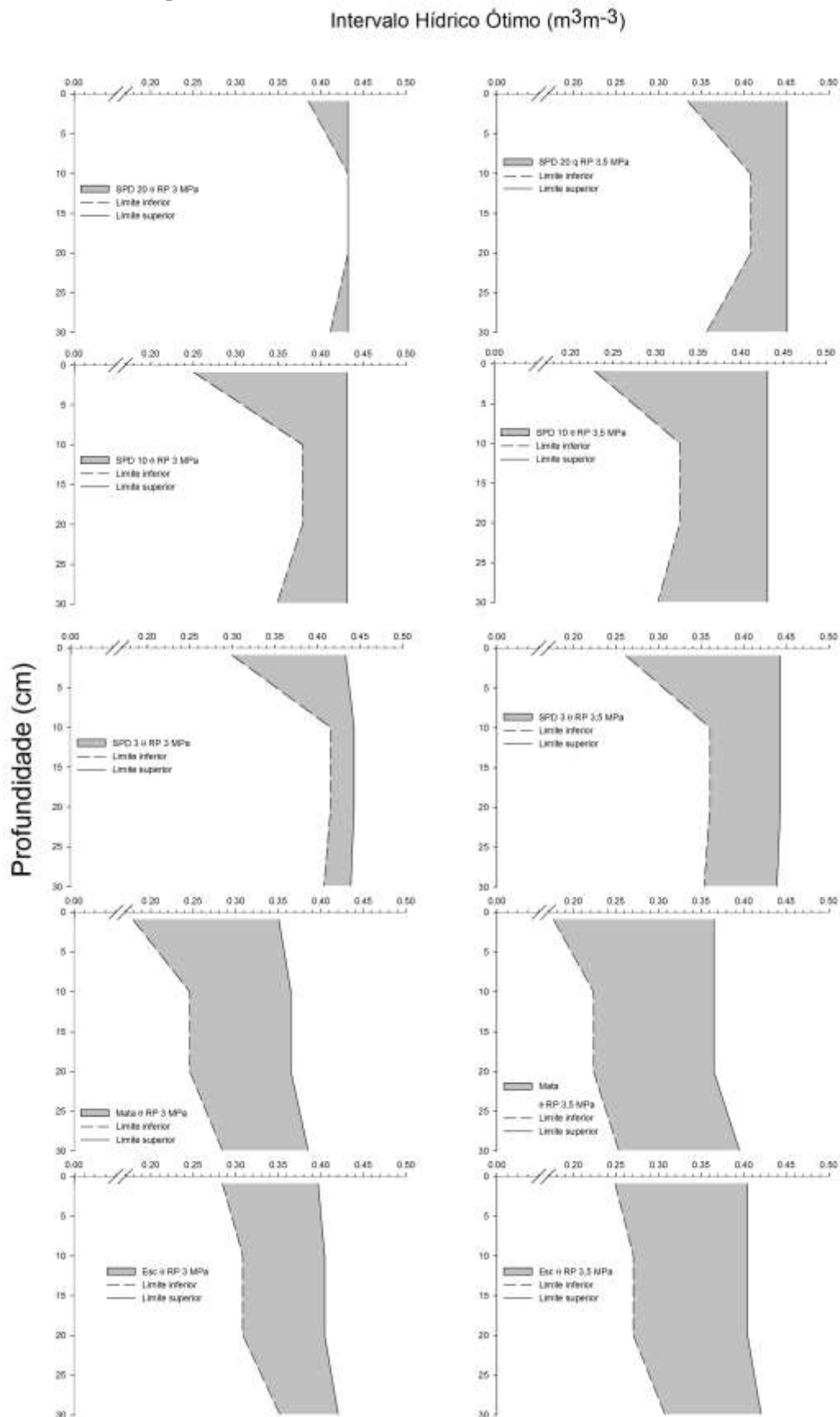
Figura 3- Valores médios do intervalo hídrico ótimo: (a) intervalo hídrico ótimo RP restritiva de 2,5 MPa; (b) intervalo hídrico ótimo RP restritiva de 3 MPa; (c) intervalo hídrico ótimo RP restritiva de 3,5 MPa



Quando os limites superior e inferior do intervalo de confiança se sobrepõem não há diferença estatisticamente significativa entre os tratamentos ( $p < 0,05$ ).

Para a camada de 10 a 20 cm a amplitude do IHO diminui para o manejo SPD 20, onde os valores de do limite superior e inferior se aproximam (Figura 4), de acordo com Pedrotti et al. (2019), áreas de plantio direto apresentam menor amplitude em relação aos demais manejos. Entretanto os manejos estudados não apresentaram amplitude nula de IHO, demonstrando assim, que mesmo após 20 anos de cultivo o solo não apresenta necessidade de intervenção mecânica, pois tem a capacidade de manter condições favoráveis para o desenvolvimento do sistema radicular.

Figura 4- Variação do intervalo hídrico ótimo (IHO) no perfil de solo estudado entre o limite superior e inferior.



As camadas superficiais de áreas conduzidas sob plantio direto apresentam baixos valores de densidade evidenciado pela maior amplitude do IHO. Isso se deve ao fato de que nos primeiros 5 cm de profundidade o solo sofre grande influência das hastes sulcadoras com mobilização do solo na linha de semeadura da culturas o que altera a densidade do solo nesta camada (SEKI et al. 2015), sendo possível identificar o aumento da densidade do solo na profundidade de 10 a 20 cm, pois nesta camada não é exercida influência das hastes sulcadoras na ocasião da semeadura permanecendo assim a compactação ocasionada pelo tráfego de máquinas (FILHO et al. 2015), este efeito se mostra ainda mais acentuado no manejo SPD 20, onde o IHO apresentou a menor amplitude.

#### 4.6 CONCLUSÃO

A prática da escarificação altera a estrutura física do solo exercendo influência positiva sobre o IHO aumentando sua amplitude.

Para os valores de resistência a penetração de 3 e 3,5 MPa o SPD20 apresentou amplitude de IHO diferente de zero nos primeiros 30 cm de profundidade para todas as áreas estudadas.

O tempo de execução do plantio direto contínuo afeta o IHO negativamente, diminuindo a sua amplitude devido as alterações da estrutura do solo no longo prazo.

O Intervalo Hídrico Ótimo apresentou a menor amplitude entre os limites inferior e superior na camada de 10 a 20 cm de profundidade.

#### 4.7 REFERÊNCIAS

BALBINOT Jr, A. A. et al. Crescimento e distribuição de raízes de soja em diferentes densidades de plantas. **Rev. Ciênc. Agrovet.**, Lages, SC, Brasil, 2017

BETIOLLI JUNIOR, E. et al. Intervalo Hídrico Ótimo e Grau de Compactação de um Latossolo Vermelho Após 30 Anos Sob Plantio Direto. **R. Bras. Ci. Solo**, 36:971-982, 2012

BEZERRA, R. R. et al. Least limiting water range in Spodosol and initial growth of sugarcane under soil bulk densities and salinities. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v.23, n.11, p.833-839, 2019.

BROWN, V. et al. Efeitos no solo e nas culturas após vinte anos de cultivo convencional e semeadura direta. **Rev. Bras. Cienc. Agrar.**, Recife, v.13, n.1, e5501, 2018

BUSSCHER, W. J. Adjustment of Flat-Tipped Penetrometer Resistance Data to a Common Water Content. Vol. 33(2):March-April 1990

CAMPOS, L. P. Estoques e frações de carbono orgânico em Latossolo Amarelo submetido a diferentes sistemas de manejo. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.48, n.3, p.304-312, mar. 2013

CORTEZ, J. W. et al. SPATIAL VARIABILITY OF SOIL RESISTANCE TO PENETRATION IN NO TILLAGE SYSTEM. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.38, n.5, p.697-704, 2018

DIAS, C. B. et al. Intervalo hídrico ótimo e densidade crítica de um Latossolo Amarelo coeso sob diferentes usos no ecossistema Tabuleiro Costeiro. **Rev. Ceres**, Viçosa, v. 63, n.6, p. 868-878, 2016

DRESCHER, M. S. et al. Duração das alterações em propriedades físico-hídricas de Latossolo argiloso decorrentes da escarificação mecânica. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.51, n.2, p.159-168, fev. 2016

FASHI, F. H. et al. Least limiting water range for different soil management practices in dryland farming in Iran. **ARCHIVES OF AGRONOMY AND SOIL SCIENCE**, v. 63, n. 13, p.1814–1822, 2017

FILHO, F. X. O. et al. Zona de manejo para preparo do solo na cultura da cana-de-açúcar. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v.19, n.2, p.186–193, 2015.

FILHO, J. T. et al. Modelling of Soil Penetration Resistance for an Oxisol under No-Tillage. **R. Bras. Ci. Solo**, 36:89-95, 2012

KELLER, T. et al. Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. **Soil & Tillage Research**, 194, 1042934, 2019

KAHLON, M. S.; CHAWLA K. Effect of tillage practices on least limiting water range in Northwest India. **Int. Agrophys.**, 2017, 31, 183-194

KAISER, D. R. et al. Intervalo hídrico ótimo no perfil explorado pelas raízes de feijoeiro em um latossolo sob diferentes níveis de compactação. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, vol.33, n.4, Viçosa, 2009

LIMA, C. L. R. et al. Least limiting water range, S-index and compressibility of a Udalf under different management systems. **Braz. Sci. agric.**, Piracicaba, vol.77 no.1 Piracicaba 2020 Epub July 01, 2019

LIMA, L.B. et al. Desempenho de plantas de cobertura sob níveis de compactação em Latossolo Vermelho de Cerrado. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v.19, n.11, p.1064–1071, 2015

KLEIN, V. A. Variabilidade espacial do intervalo hídrico ótimo de solos cultivados em sistema plantio direto. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.51, n.11, p.1890-1898, nov. 2016

LIMA, V. M. P. et al. Intervalo Hídrico Ótimo como Indicador de melhoria da Qualidade Estrutural de Latossolo Degradado. **R. Bras. Ci. Solo**, 36:71-78, 2012

MILAGRES, R. S. et al Avaliação dos Atributos Físicos do Solo Em Áreas Inclinadas com Sistema de Plantio Direto. **Ciência Agrícola**, Rio Largo, v. 16, n. 3, p. 57-63, 2018

MORAES, M. T. et al. Mechanistic framework to link root growth models with weather and soil physical properties, including example applications to soybean growth in Brazil. **Plant Soil**, 428:67–92, 2018

NUNES, M. N. et al. Persistência dos efeitos da escarificação sobre a compactação de Nitossolo sob plantio direto em região subtropical úmida. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.49, n.7, p.531-539, jul. 2014

NUNES, M. R. et al. Mitigation of clayey soil compaction managed under no-tillage. **Soil & Tillage Research**, 148, 119–126, 2015

OHLAND, T. et al. Influência da densidade do solo no desenvolvimento inicial do pinhão-mansão cultivado em Latossolo Vermelho eutroférico. **Rev. Ceres**, Viçosa, v. 61, n.5, p. 622-630, set/out, 2014

PEDROTTI, A. Soil Mechanical Resistance Penetration after Fifteen Years with Previous Crops and Tillage Systems and Productivity of Green Corn Cob in Northeast Brazil. **JEAI**, 32(3): 1-9, 2019

PEIXOTO, D. S. et al. Diagnosing, Ameliorating, and Monitoring Soil Compaction in No-Till Brazilian Soils. **Agrosyst. Geosci. Environ.** 2:180035, 2019

PEREIRA, A. H. F. Least Limiting Water Range and Load Bearing Capacity of Soil under Types of Tractor-Trailers for Mechanical Harvesting of Green Sugarcane. **R. Bras. Ci. Solo**, 39:1603-1610, 2015

PORTELLA, C. M. R. et al. Soil Aggregation Under Different Management Systems. **R. Bras. Ci. Solo**, 36:1868-1877, 2012

RODRIGUES, T. R. et al. Water availability to soybean crop as a function of the least limiting water range and evapotranspiration. **Pesq. Agropec. Trop.**, Goiânia, v. 47, n. 2, p. 161-167, 2017

ROSA, D. P. et al. Demanda de tração e propriedades físicas de um Argissolo em diferentes manejos e intensidades de tráfego . **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.47, n.1, p.118-126, jan. 2012

ROSSETI, K. V.; CENTURION, J. F. Indicadores de qualidade em Latossolos compactados e suas relações com o crescimento do sistema radicular do milho. **Revista Agro@ambiente Online**, v. 11, n. 3, p. 181-190, julho-setembro, 2017

SEKI, A. S. et al. Efeitos de práticas de descompactação do solo em área sob sistema plantio direto. **Rev. Ciênc. Agron.**, v. 46, n. 3, p. 460-468, jul-set, 2015

SILVA, L. F. S. et al. INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO PARA AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO E RENDIMENTO DO FEIJÃO. **Irriga, Botucatu**, v. 22, n. 2, p. 383-399, 2017

SOBREIRA, D. S. V. et al. ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS MÉTODOS DE COMPACTAÇÃO DE SOLOS POR IMPACTO E AMASSAMENTO. São Paulo, UNESP, **Geociências**, v. 37, n. 3, p. 683 - 693, 2018

SORACCO, C. G. et al. EFFECTS OF COMPACTION due to machinery TRAFFIC ON SOIL PORE CONFIGURATION. **R. Bras. Ci. Solo**, 39:408-415, 2015

STEFANOSKI, D. C. et al. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. Campina Grande , **Rev. bras. eng. agríc. ambient.** vol.17 no.12, 2013

TEIXEIRA, P. C. et al. Manual de Métodos de Análise de solo. **Embrapa**, 3. ed., 2018

TORMENA, C. A. Propriedades Físicas e Taxa de Estratificação de Carbono Orgânico num Latossolo Vermelho Após Dez Anos Sob Dois Sistemas De Manejo. **R. Bras. Ci. Solo**, 28:1023-1031, 2004

TORMENA, C. A. Variação Temporal Do Intervalo Hídrico Ótimo de um Latossolo Vermelho Distroférico sob Sistemas de Plantio Direto. **R. Bras. Ci. Solo**, 31:211-219, 2007

TAVANTI, R. F. R. et al. Last Limiting water as a soil indicator in an integrated crop-livestock systems of the Cerrado, Brazil. **Geoderma Regional**, 19 e 0023 ,2019

TAVANTI, R. F. R. et al. PEDOFUNCTIONS APPLIED TO THE LEAST LIMITING WATER RANGE TO ESTIMATE SOIL WATER CONTENT AT SPECIFIC POTENTIALS. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.39, n.4, p.444-456, 2019



## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A escarificação do solo é uma prática eficaz para reverter os efeitos da compactação, entretanto a aplicação desta prática causa efeitos como o aumento da porosidade sobre a estrutura do solo, dessa forma o solo pode estar mais suscetível a degradação física. Após a escarificação o solo apresenta maior macroporosidade e com isso uma menor pressão de preconsolidação o que pode contribuir para adensamento de um solo escarificado. Sendo assim os efeitos da escarificação não perduram a longo prazo, de forma que esta prática só deve ser aplicada em solos com alto grau de compactação, onde o desenvolvimento das raízes está sendo prejudicado.

Os atributos do solo que apresentaram a maior correlação com a pressão de preconsolidação são o conteúdo gravimétrico de água no solo e a Macroporosidade, considerando que o aumento do conteúdo de água e aumento da macroporosidade provocam a diminuição da pressão de preconsolidação, ou seja o conteúdo gravimétrico de água possui correlação negativa com a capacidade de suporte de carga do solo, dessa maneira quanto maior a umidade e a macroporosidade maior será a deformação do solo.

Além da umidade gravimétrica e da macroporosidade o tempo de execução de plantio direto contínuo também exerce influência sobre a pressão de preconsolidação. Quando o solo sofre alteração de sua estrutura por intervenção mecânica a capacidade de suporte de carga diminui. Contudo com o aumento do tempo de plantio direto após a escarificação a pressão de preconsolidação aumenta novamente, garantindo que o solo seja capaz de suportar uma maior capacidade de carga.

A camada de 0 a 5 cm e a de 10 a 15 cm são as camadas que apresentam os efeitos mais significativos com relação a capacidade de suporte de carga e o tempo de uso em plantio direto contínuo, sendo que estas camadas se mostram mais sensíveis as práticas de manejo. O aumento do tempo de execução do plantio direto contínuo de dez para vinte anos provocou efeitos com aumento da pressão de preconsolidação aumentando assim a capacidade de suporte de carga. Dessa forma o aumento do tempo de execução do plantio após a escarificação reestabelece a coesão da estrutura do solo, mantendo a densidade abaixo do nível crítico deixando o solo mais resistente aos efeitos da compactação.

Estes resultados demonstram que alterações na estrutura do solo ocasionadas pelo manejo podem influenciar a pressão de preconsolidação por um longo período de forma que a ausência de intervenção mecânica pode garantir ao solo uma maior coesão e com isso uma maior resistência a deformações ocasionadas pela aplicação de cargas do tráfego agrícola.

Os manejos estudados não apresentaram níveis de compactação prejudicial uma vez que o intervalo hídrico ótimo apresentou valores positivos para as camadas de solo estudadas demonstrando assim, que mesmo após vinte anos de plantio direto contínuo o solo apresenta condições favoráveis ao desenvolvimento de raízes.

A escarificação do solo é uma prática de manejo que deve ser evitada em áreas de plantio direto, considerando que seus efeitos sobre a densidade e a porosidade não são mantidos a longo prazo. A ausência de perturbação mecânica da estrutura, garante ao solo uma maior coesão e com isto maior resistência aos agentes causadores da compactação.

## 5.1 REFERÊNCIAS

- AHMADI, I.; GHOUR H. Effects of soil moisture content and tractor wheeling intensity on traffic-induced soil compaction. **Journal of Central European Agriculture**, 16(4), p.489-502, 2015
- ARAÚJO, E. A. Qualidade do solo: conceitos, indicadores e avaliação. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, Guarapuava-PR, v.5, n.1, p.187-206, 2012.
- ARCOVERDE, S. N. S. et al. Atributos Físicos de solos em áreas sob diferentes usos no semiárido baiano. **HOLOS**, Ano 34, Vol. 04, 2018
- ARVIDSSON, J.; ETANA, A.; RYDBERG, T. Rendimento das culturas em experimentos suecos com preparo superficial e plantio direto 1983–2012. **Europa. J. Agronomy** 52, 307–315, 2014
- ASSIS, E. B. et al. Resistência a Penetração em Argissolo Vermelho-Amarelo sob Pousio e Diferentes Culturas de Cobertura. **Centro Científico Conhecer - Goiânia**, v.10, n.19; p. 2014
- BAIO, F. H. R. et al. Soil resistance to penetration in cotton rows and interrows. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.** vol.21, no.6 Campina Grande June 2017
- BERTOL, I. et al. Propriedades físicas de um cambissolo húmico álico afetadas pelo manejo do solo. **Cienc. Rural**. Santa Maria, vol.30 n., 2000
- BRAIDA, J. A. et al. Teor de carbono orgânico e a susceptibilidade à compactação de um Nitossolo e Argissolo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, p.131-139, 2010.
- BUSSCER, W. J. ADJUSTMENT OF FLAT-TIPPED PENETROMETER RESISTANCE DATA TO A COMMON WATER CONTENT. Vol. 33(2), 1990
- CAVIGLIONE, J. H. S-Index as an indicator of physical quality in soils of the Paraná state. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v.22, n.7, p.458-464, 2018
- CHERUBIN, M. R. Qualidade Física, Química e Biológica de um Latossolo Com Diferentes Manejos e Fertilizantes. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, vol.39, n.2, pp.615-625, 2015
- COMINO, J. R. et al. Quantitative comparison of initial soil erosion processes and runoff generation in Spanish and German vineyards. **Science of the Total environment** 565, 1165-1174, 2016
- DECHEN, S. C. F. et al. Perdas e custos associados à erosão hídrica em função de taxas de cobertura do solo. **Bragantia**, Campinas, v. 74, n. 2, p.224-233, 2015
- DEGU, M. et al. Effects of Soil Conservation Practice and Crop Rotation on Selected Soil Physicochemical Properties: The Case of Dembecha District, Northwestern Ethiopia, **Hindawi**. Article ID 6910879, p.14, 2019

DREWRY, J.J.; CAMERON, K.C.; BUCHAN, G.D. Pasture yield and soil physical property responses to soil compaction from treading and grazing - a review. **Austr. J. Soil Res.**, 46:237-256, 2008.

DRESCHER, M. S. et al. Persistência do Efeito de Intervenções Mecânicas Para a Descompactação de Solos sob Plantio Direto. **R. Bras. Ci. Solo**, 35:1713-1722, 2011

FILHO, J. T. et al. Resistência do Solo a Penetração e Desenvolvimento do Sistema Radicular do Milho (*Zea Mays*) sob Diferentes Sistemas de Manejo Em Um Latossolo Roxo. **R. Bras. Ci. Solo**, 25:725-730, 2001

GRABLE, A.R.; SIEMER, E.G. Effects of bulk density aggregate size and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 32:18-186, 1968

GIAROLA, N. F. B. et al. Método de avaliação visual da qualidade da estrutura aplicado a Latossolo Vermelho Distroférico sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.39, n.8, p.2531-2534, 2009

GUBIANI, P. I. RELAÇÃO ENTRE DENSIDADE DO SOLO E CONTEÚDO DE ÁGUA EM REPETIDOS CICLOS DE CONTRAÇÃO E EXPANSÃO EM UM LATOSSOLO. **R. Bras. Ci. Solo**, 39:100-108, 2015

DIAS JUNIOR, M. S. et al. Método alternativo de avaliação da pressão de preconsolidação por meio de um penetrômetro. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, vol.28, n.5, Viçosa, 2004

KAISER, D. R. et al. Intervalo hídrico ótimo no perfil explorado pelas raízes de feijoeiro em um latossolo sob diferentes níveis de compactação. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, vol.33, n.4, Viçosa, 2009

KLEIN, V. A.; LIBARDI P.L. Densidade de distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 857-867, 2002.

LIMA, L. R. et al. Estimativa da capacidade de suporte de carga do solo a partir da avaliação da resistência à penetração. **R. Bras. Ciênc. Solo**, vol.30, n.2 Viçosa, 2006

MORAES, M. T. et al. Critical Limits of Soil Penetration Resistance In A Rhodic Eutrudox. **R. Bras. Ci. Solo**, 38:288-298, 2014

MOREIRA, F. R. et al. Intervalo Hídrico Ótimo em um Latossolo Vermelho Cultivado em Sistema Semeadura Direta Por 25 Anos. **R. Bras. Ci. Solo**, 38:118-127, 2014

NOVAK, et al. CHANGES IN THE SOIL STRUCTURE AND ORGANIC MATTER DYNAMICS UNDER DIFFERENT PLANT COVERS. **ERNE** vol.25 no.2 Lavras, 2019

NUNES, M. R. et al. Efeito De Semeadora com Haste Sulcadora Para Ação Profunda em Solo Manejado com Plantio Direto. **R. Bras. Ci. Solo**, 38:627-638, 2014

NUNES, R. N. et al. Mitigation of clayey soil compaction managed under no-tillage. **Soil & Tillage Research**, v.148, p.119–126, 2015

HUSSEIN, M. A. Deep Tillage Improves Degraded Soils in the (Sub) Humid Ethiopian Highlands. **Land**, n.8, p.159; 2019

OLIVEIRA, D. M. S. et al. Qualidade física do solo sob diferentes sistemas de manejo e aplicação de dejetos líquidos suínos. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v.19, n.3, p.280–285, 2015

PAIVA, S. C. et al. Propriedades geotécnicas de um solo expansivo tratado com cal. **Revista Matéria**, v.21, n.2, pp. 437– 449, 2016.

PÉRTILE, P. et al. Rheological Parameters as Affected by Water Tension in Subtropical Soils. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, vol.40 Viçosa, 2016

ROSSETTI, K. V.; CENTURION, J. F. Least limiting water range in Oxisols under different levels of machine traffic. **Com. Sci., Bom Jesus**, v.8, n.2, p.337-346, 2017

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

ROSIM, D. C. et al. Compactação de um Latossolo Vermelho Distroférico com diferentes quantidades e manejos de palha em superfície. **Bragantia**, Campinas, v. 71, n. 4, p.502-508, 2012

SINNETT, D. et al. Soil penetration resistance and tree root development. British Society of Soil Science. **Soil Use and Management**, v.24, n.273, 2008

SILVA, W. M. et al. Modeling and correction of soil penetration resistance for variations in soil moisture and soil bulk density. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v.36, n.3, p.449-459, 2016

VIANA, E. T. et al. Atributos Físicos e Carbono Orgânico em Latossolo Vermelho sob Diferentes Sistemas de Uso e Manejo. **R. Bras. Ci. Solo**, 35:2105-2114, 2011

STRECK, C. A. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciênc. Rural**, v.34, n.3, 2004

XU, Y. et al. Compaction of Coarse-Textured Soils: Balance Models across Mineral and Organic Compositions. **Front. Ecol. Evol.**, v 5, n.83, 2017

## APÊNDICE – ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO

Área	Camadas (cm)		
	0-5	10-15	25-30
<u>Densidade (Mg m<sup>-3</sup>)</u>			
SPD20	1,22 (1,17-1,27)	1,31 (1,26-1,36)	1,25 (1,20-1,29)
SPD10	1,03 (0,98-1,08)	1,21 (1,18-1,24)	1,18 (1,15-1,20)
SPD3	1,11 (1,08-1,15)	1,25 (1,22-1,27)	1,22 (1,19-1,25)
Esc	1,09 (1,05-1,12)	1,09 (1,05-1,13)	1,14 (1,09-1,18)
Mata	0,87 (0,83-0,90)	1,02 (0,98-1,06)	1,08 (1,03-1,13)
<u>Macroporosidade (m<sup>3</sup>m<sup>-3</sup>)</u>			
SPD20	0,12 (0,09-0,15)	0,04 (0,03-0,05)	0,08 (0,05-0,11)
SPD10	0,20 (0,16-0,24)	0,09 (0,07-0,12)	0,09 (0,07-0,10)
SPD3	0,10 (0,07-0,13)	0,06 (0,04-0,08)	0,08 (0,06-0,09)
Esc	0,23 (0,20-0,25)	0,23 (0,21-0,26)	0,17 (0,14-0,21)
Mata	0,26 (0,23-0,30)	0,23 (0,20-0,26)	0,21 (0,18-0,24)
<u>Microporosidade (m<sup>3</sup>m<sup>-3</sup>)</u>			
SPD20	0,40 (0,38-0,42)	0,47 (0,45-0,48)	0,46 (0,43-0,50)
SPD10	0,40 (0,36-0,44)	0,46 (0,44-0,48)	0,48 (0,47-0,50)
SPD3	0,49 (0,46-0,51)	0,49 (0,48-0,50)	0,49 (0,48-0,50)
Esc	0,36 (0,34-0,38)	0,37 (0,35-0,38)	0,41 (0,39-0,43)
Mata	0,41 (0,38-0,44)	0,43 (0,41-0,45)	0,43 (0,40-0,45)
<u>Porosidade Total (m<sup>3</sup>m<sup>-3</sup>)</u>			
SPD20	0,56 (0,54-0,58)	0,53 (0,51-0,54)	0,55 (0,53-0,56)
SPD10	0,62 (0,61-0,64)	0,56 (0,55-0,57)	0,57 (0,56-0,58)
SPD3	0,60 (0,58-0,61)	0,55 (0,54-0,56)	0,56 (0,55-0,57)
Esc	0,61 (0,59-0,62)	0,61 (0,59-0,62)	0,59 (0,57-0,60)
Mata	0,68 (0,67-0,70)	0,62 (0,62-0,64)	0,61 (0,59-0,62)

SPD20: Plantio direto contínuo por vinte anos; SPD10: Plantio direto contínuo por dez anos; SPD3: Plantio direto contínuo por três anos; Esc: Solo escarificado; Mata: Solo sob mata nativa. Médias e valores do limite superior e inferior do intervalo de confiança (p<0,01)