



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL
CAMPUS CERRO LARGO
CURSO DE AGRONOMIA**

LUCAS RAIMUNDO RAUBER

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE FÍSICA DO SOLO EM SISTEMA INTEGRADO DE
PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA LEITEIRO**

CERRO LARGO

2017

LUCAS RAIMUNDO RAUBER

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE FÍSICA DO SOLO EM SISTEMA INTEGRADO DE
PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA LEITEIRO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Agronomia da Universidade Federal da Fronteira Sul, como requisito parcial para obtenção do título bacharel em Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. Douglas Rodrigo Kaiser

CERRO LARGO

2017

PROGRAD/DBIB - Divisão de Bibliotecas

Rauber, Lucas Raimundo
Avaliação da qualidade física do solo em sistema
integrado de produção agropecuária leiteiro/ Lucas
Raimundo Rauber. -- 2017.
63 f.:il.

Orientador: Douglas Rodrigo Kaiser.
Trabalho de conclusão de curso (graduação) -
Universidade Federal da Fronteira Sul, Curso de
Agronomia , Cerro Largo, RS, 2017.

1. Pastejo bovino. 2. Qualidade física do solo. 3.
Intervalo hídrico ótimo. 4. cultura da soja. I. Kaiser,
Douglas Rodrigo, orient. II. Universidade Federal da
Fronteira Sul. III. Título.

LUCAS RAIMUNDO RAUBER

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE FÍSICA DO SOLO EM SISTEMA INTEGRADO DE
PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA LEITEIRO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Agronomia da Universidade Federal da Fronteira Sul, como requisito parcial para obtenção do título bacharel em Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. Douglas Rodrigo Kaiser

Este trabalho de conclusão de curso foi defendido e aprovado pela banca em: 01/12/2017

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Douglas Rodrigo Kaiser - UFFS



Prof. Dr. Renan Costa Beber Vieira - UFFS



Prof. Dr. Gilmar Roberto Meinerz - UFFS

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Eugênio e Ivanir, por todo o apoio e incentivo durante a condução deste trabalho e período acadêmico. Ao senhor Laurindo Morschbacher, pela cedência de parte de sua propriedade para condução deste trabalho. Ao professor Douglas Rodrigo Kaiser, pela orientação, ensinamentos, apoio, incentivo e amizade durante a condução deste trabalho e todo o período acadêmico. Aos colegas de graduação, pela colaboração no trabalho, apoio, incentivo e amizade formada. À Universidade Federal da Fronteira Sul, campus Cerro Largo, por proporcionar a oportunidade de elaboração deste trabalho e formação acadêmica. Também a todos os professores e técnicos que de uma forma ou de outra colaboraram neste trabalho e período de graduação. Grato a todos!

RESUMO

O Sistema Integrado de Produção Agropecuária (SIPA), quando bem manejado, gera benefícios ao sistema solo-animal-planta, devido ao sinergismo entre seus componentes. Porém, existe uma preocupação com a compactação do solo pelo pisoteio animal em sistemas intensivos, o que pode comprometer a estrutura do solo. O intervalo hídrico ótimo (IHO) é indicado como uma ferramenta para avaliação da qualidade física do solo, visto que relaciona os fatores físicos diretamente ligados ao crescimento e desenvolvimento das plantas. Sob este contexto, buscou-se neste trabalho avaliar diferentes manejos do solo em um SIPA leiteiro por meio do IHO. Foi dado continuidade a um experimento de 1 ano de duração em uma propriedade rural do município de São Pedro do Butiá – RS. O delineamento utilizado foi blocos ao acaso (DBC) com três tratamentos e quatro repetições: T1: Área com pastejo no inverno (PAST); T2: Área com pastejo no inverno seguida de escarificação mecânica (PAST+ESC); e T3: Área sem pastejo no inverno (S.PAST). O solo foi caracterizado como Latossolo Vermelho. Ao final dos ciclos de pastejo foi avaliada a densidade e distribuição de poros nas camadas 0-5, 5-10, 10-20 e 20-30 cm. Para criação do IHO foram coletadas 120 amostras com anéis do tipo Uhland e efetuada a modelagem de cada limite perante as variáveis densidade e umidade do solo. Em sucessão à pastagem foi implantada a cultura da soja (*Glycine max*) e durante seu ciclo realizadas avaliações da umidade do solo e na fase de florescimento e maturação fisiológica da distribuição de raízes e produtividade de grãos respectivamente. O pisoteio bovino elevou a densidade e diminuiu a porosidade do solo na camada mais superficial (0-5 cm), como também diminuiu a amplitude do IHO no perfil de solo. A escarificação se mostrou eficiente para amenizar o impacto animal no solo, ampliar o IHO até os 15 cm de profundidade e o tempo de permanência da umidade do solo dentro do IHO durante o ciclo da soja, porém se mostrou desnecessária por não ter influenciado a distribuição de raízes e produtividade da cultura. O desempenho da soja não foi influenciado pelo manejo em ano sem deficiência hídrica.

Palavras chave: Bovinos de leite. Qualidade física do solo. IHO. Soja.

ABSTRACT

The crop-livestock integrated system, when good conducted, generates benefits to the soil-animal-plant system, due to the synergism between its components. However, there is concern about soil compaction by animal trampling in intensive systems, which may compromise a soil structure. The last limiting water range (LLWR) is indicated as a tool to evaluate the physical quality of the soil, since it relates the physical factors directly related to the growth and development of the plants. In this context, it was sought evaluate different soil managements in a crop-livestock integrated system, with dairy cattle, by means the LLWR. Was given continuity to an experiment of one year in duration on a property in the municipality in São Pedro do Butiá - RS. The experiment was in blocks to chance with three treatments and four repetitions: T1: Area with grazing in winter (PAST); T2: Grazing area followed by scarification of soil (PAST + ESC); and T3: Area without grazing in winter (S.PAST). The soil characterized was as Oxisol. At the end of the grazing cycles it was evaluated the density and distribution of pores in layers 0-5, 5-10, 10-20 and 20-30 cm. For the LLWR creation of the were collected 120 samples with rings of the Uhland type and then made the modeling of each limit according variation of soil density and soil moisture. After the grazing cycle was implanted the soy culture and during its cycle soil performed moisture assessments soil and during the flowering and maturation, evaluations the roots distribution and grain production. They bovines increased the density and decreased the porosity of the soil in the most superficial layer (0-5 cm), as well as decreased an amplitude of the LLWR in the soil profile. The scarification was efficient to reduce the animal impact on the soil, to increase the LLWR up to 15 cm depth and the residence time of the soil moisture within the LLWR during the soybean cycle, but it was unnecessary because it did not influence the distribution of roots and crop productivity. The soy performance was not influenced by the treatments in a rainy year.

Keywords: Dairy cattle. Physical soil quality. LLWR. Soy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Manejo animal durante o inverno na área experimental, 2016.	27
Figura 2: Oferta de forragem expressa em porcentagem de peso vivo animal (% PV) em cada pastejo de inverno, 2016.	28
Figura 3: Massa, resíduo e produção total de massa seca forrageira durante o inverno, 2016.	28
Figura 4: Escarificação mecânica e semeadura da soja na área experimental, 2016.	30
Figura 5: Exposição das raízes da soja no perfil de solo para avaliação da distribuição do sistema radicular utilizando um quadro delimitador com malha.	33
Figura 6: Umidade gravimétrica do solo na camada 0-10 cm em cada pastejo de inverno e limites de plasticidade e liquidez, 2016. Past: Pastejado; Past+Esc: Pastejo seguido de escarificação.	37
Figura 7: Umidade gravimétrica do solo na camada 10-20 cm em cada pastejo de inverno e limites de plasticidade e liquidez, 2016. Past: Pastejado; Past+Esc: Pastejo seguido de escarificação.	37
Figura 8: Estrutura e distribuição de poros no perfil do solo nos diferentes manejos. MAC: Macroporos; MIC: Microporos; SOL: Fração sólida. PAST: Área com pastejo. PAST+ESC: Pastejo seguido de escarificação; S.PAST: Área sem pastejo.	40
Figura 9: Intervalo hídrico ótimo (IHO) do solo de acordo com a densidade e umidade do solo.	43
Figura 10: Amplitude do intervalo hídrico ótimo no perfil do solo. PAST: Área com pastejo. PAST+ESC: Pastejo seguido de escarificação; S.PAST: Área sem pastejo. LI: Limite inferior; LS: Limite Superior.	45
Figura 11: Variação da umidade volumétrica do solo ao longo do ciclo da cultura da soja na camada 0-10 cm e limite superior (LS) e limite inferior (LI) do intervalo hídrico ótimo (IHO). PAST: Área com pastejo. PAST+ESC: Pastejo seguido de escarificação; S.PAST: Área sem pastejo. *: Significativo ao teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro; ns: Não significativo.	48
Figura 12: Variação da umidade volumétrica do solo ao longo do ciclo da cultura da soja na camada 10-20 cm e limite superior (LS) e limite inferior (LI) do intervalo hídrico ótimo (IHO). PAST: Área com pastejo. PAST+ESC: Pastejo seguido de escarificação; S.PAST: Área sem pastejo. *: Significativo ao teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro; ns: Não significativo.	49

Figura 13: Variação da umidade volumétrica do solo ao longo do ciclo da cultura da soja na camada 20-30 cm e limite superior (LS) e limite inferior (LI) do intervalo hídrico ótimo (IHO). PAST: Área com pastejo. PAST+ESC: Pastejo seguido de escarificação; S.PAST: Área sem pastejo. *: Significativo ao teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro; ns: Não significativo.	50
Figura 14: Índices pluviométricos observados durante o ciclo da cultura da soja de acordo com os dias após semeadura (DAS), 2016.	51
Figura 15: Distribuição das raízes de soja no perfil de solo. PAST: Área com pastejo; PAST+ESC: Pastejo seguido de escarificação; S.PAST: Área sem pastejo.	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resultados da análise química do solo nas camadas 0-10 e 10-20 cm de profundidade na área experimental, 2015.....	25
Tabela 2: Datas correspondentes a cada pastejo durante o inverno, 2016. DAS: Dias após semeadura da pastagem.	26
Tabela 3: Valores de densidade e distribuição de poros no tratamento PAST+ESC anteriormente à escarificação mecânica do solo, 2016. Ds: Densidade do solo; Pt: Porosidade total; Mi: Microporosidade; Ma: Macroporosidade.	29
Tabela 4: Umidade gravimétrica do solo nas parcelas escarificadas no momento da escarificação, 2016.	30
Tabela 5: Porcentagem de areia, silte e argila nas camadas 0-10 e 10-20 cm do solo da área experimental.	31
Tabela 6: Densidade e distribuição de poros no solo após ciclo de pastejos e escarificação do solo, inverno de 2015. PAST: Área com pastejo. PAST+ESC: Pastejo seguido de escarificação; S.PAST: Área sem pastejo.	34
Tabela 7: Densidade e distribuição de poros no solo após ciclos de pastejo de inverno e escarificação do solo, 2016. PAST: Área com pastejo. PAST+ESC: Pastejo seguido de escarificação; S.PAST: Área sem pastejo	35
Tabela 8: Variabilidade dos atributos físicos para modelagem da Resistência do solo à penetração.....	41
Tabela 9: Variabilidade dos atributos físicos para modelagem da Capacidade de campo.....	41
Tabela 10: Variabilidade dos atributos físicos para modelagem do ponto de murcha permanente.....	41
Tabela 11: Produtividade e peso de mil grãos (PMG) da cultura da soja. PAST: Área com pastejo. PAST+ESC: Pastejo seguido de escarificação; S.PAST: Área sem pastejo.....	54

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVO GERAL.....	12
1.1.1	Objetivos específicos	12
2	REVISÃO DA LITERATURA	14
2.1	CARACTERIZAÇÃO DOS SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO	14
2.2	BENEFÍCIOS DOS SIPA PARA O SISTEMA SOLO-PLANTA- ANIMAL.....	14
2.3	PROBLEMAS DE MANEJO E DEGRADAÇÃO DO SOLO EM SIPAS	15
2.4	SIPAS COM GADO LEITE X SIPAS COM GADO DE CORTE.....	18
2.5	INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO DO SOLO COMO INDICADOR DA QUALIDADE ESTRUTURAL DO SOLO EM SIPAS	19
2.6	AS RAÍZES E AS LIMITAÇÕES FÍSICAS NO SOLO	22
3	METODOLOGIA	25
3.1	LOCAL E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA	25
3.2	CONDUÇÃO DE INVERNO	25
3.3	CONDUÇÃO DE VERÃO	29
3.4	DENSIDADE E DISTRIBUIÇÃO DE POROS PÓS INVERNO DE 2015.....	33
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
5.1	DENSIDADE E DISTRIBUIÇÃO DE POROS	35
5.2	INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO PARA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE FÍSICA DO SOLO	40
5.2.1	Fator Capacidade das limitações impostas pelo IHO	44
5.2.2	Fator intensidade	46
5.3	FATOR CAPACIDADE X INTENSIDADE E RESPOSTA DA CULTURA DA SOJA.....	52
6	CONCLUSÕES	56
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
	REFERÊNCIAS	58

1 INTRODUÇÃO

No noroeste do estado do Rio Grande do Sul é encontrada uma grande bacia leiteira, responsável pela geração de renda para muitos produtores de mão de obra familiar (SILVA et al., 2012). O Sistema de integração lavoura-pecuária (ILP) ou sistema integrado de produção agropecuária (SIPA), é o modelo de produção utilizado pela maioria das propriedades com a finalidade de otimizar o uso da terra.

O SIPA ou ILP consiste em alternar produção pecuária e agrícola em uma mesma área durante o ano. Geralmente o momento em que os bovinos se integram no sistema na referida região é durante o inverno, momento onde as condições climáticas favorecem bom desempenho animal e também um “leque” de opções de forrageiras de ótima qualidade nutricional (ASSMAN, 2002). No verão então tem-se a opção de cultivar na mesma área grandes culturas como soja e milho.

Para pequenas e médias propriedades, que são maioria no RS (RIES et al., 2015), o SIPA é uma alternativa para as mesmas não serem excluídas do sistema produtivo regional, visto que apenas a monocultura da soja nestas propriedades tende a torna-las inviáveis (BRUM et al., 2005).

Independentemente do tamanho da propriedade, o sistema que integra lavoura e pecuária, seja ele com animais de corte ou de produção leiteira, é um grande gerador de renda para os pecuaristas e agricultores. Quando alcançado e mantido o sinergismo entre solo-animal-planta, ocorrem melhorias nas condições físicas químicas e biológicas do solo (ANGHINONI; CARVALHO; COSTA, 2013) além de melhorar os fluxos financeiros dos agricultores pela renda “extra” da produção bovina em suas áreas.

A grande preocupação é com a degradação das pastagens em SIPAs quando mal manejadas (ROCHA JÚNIOR; SILVA; GUIMARÃES, 2013), acarretando em problemas físicos, químicos e biológicos no solo. Áreas sob pastejo em SIPA são altamente vulneráveis à compactação do solo, principalmente quando grandes intensidades de pastejo são utilizadas (OLIVEIRA, 2016).

Para avaliação da qualidade física do solo atualmente existem vários métodos, no entanto muitos parâmetros são avaliados isoladamente. A demanda é de métodos que analisem a relação entre os fatores ligados à produção vegetal. As plantas não respondem a fatores e propriedades isolados e sim das relações dos mesmos. O intervalo hídrico ótimo (IHO) é um parâmetro que engloba os principais fatores físicos de crescimento das plantas, os quais estão diretamente ligados à produção vegetal (SILVA; KAY; PERFECT, 1994).

O IHO foi proposto em sua essência por LETEY (1985), e por gerar um conteúdo de água não limitante para as plantas, é considerado como um grande avanço sob o ponto de vista de sistematizar as relações entre os fatores responsáveis pelo crescimento das plantas (GUBIANI; REICHERT; REINERT, 2012). Porém, somente a minoria das pesquisas brasileiras neste tema correlacionam o IHO com o desempenho das culturas. Nos poucos trabalhos envolvendo plantas, muitas vezes a correlação do IHO com o desenvolvimento das plantas é baixo. Portanto, sua eficiência em prever o crescimento das culturas ainda não foi devidamente comprovada e a sugestão é de aprimoramento deste parâmetro com a inclusão de novos limites (GUBIANI; REICHERT; REINERT, 2012).

Ao correlacionar o IHO com o desempenho das plantas é preciso ter em vista que a própria planta possui mecanismos anti-stress. O que determina se há ou não limitação no desenvolvimento das plantas é o fator intensidade de cada limitação física do solo (KAISER, 2010).

Na área de SIPAs com gado leiteiro existe escassez de dados sobre qualidade física do solo. E quando o assunto é IHO, a escassez se torna ainda maior, visto que a grande parte de trabalhos é realizado com SIPAs que envolvem a pecuária de corte. O objetivo do presente trabalho é avaliar a capacidade do IHO avaliar a qualidade física do solo em um sistema integrado de produção de soja associado a produção leiteira.

1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a capacidade do IHO avaliar a qualidade física do solo sob um SIPA com produção leiteira.

1.1.1 Objetivos específicos

1. Avaliar o efeito do pastejo bovino na densidade, porosidade e distribuição de poros no solo.
2. Verificar o efeito da escarificação mecânica do solo em área pastejada.
3. Avaliar a distribuição da amplitude do IHO no perfil do solo até a camada de 30 cm em cada tratamento.
4. Avaliar semanalmente a umidade do solo durante o ciclo da soja.
5. Determinar a densidade crítica do solo em estudo por meio do IHO.
6. Avaliar a correlação do IHO com a distribuição de raízes e produtividade da cultura

da soja.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO

O sistema integrado de produção agropecuária (SIPA) ou integração lavoura-pecuária (ILP) possui capacidade de aumentar a renda por unidade de área por parte dos produtores (SILVA et al., 2012). Atualmente na literatura não há muito enquadramento sobre terminologias deste sistema. Mas o que propõe a FAO (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*) é de que seja chamado de Sistema integrado de produção agropecuária (SIPA), assim criando uma maior concordância da sigla com o real contexto em que o sistema está incluso. Ainda, o que discute Carvalho (2014) é de que necessita-se uma sigla e terminologias “padrões” para este sistema, então criando maior uniformidade nas publicações e entendimento das mesmas tanto nacional como internacionalmente, visto que atualmente há muita terminologia regional inclusa nas publicações sobre o tema. A sugestão, segundo este autor, é de que em meio científico a sigla utilizada seja SIPAs, já em meio técnico podendo ser ILP.

Em âmbito global, o SIPA possui extrema importância na produção de alimento e na segurança alimentar pois está incluso em cerca de 25 milhões de km². Atualmente é visto como uma maneira sustentável de intensificação na produção de alimentos (FAO, 2010) e inclusive já faz parte do plano ABC (agricultura de baixo carbono) no Brasil.

O SIPA pode ser altamente viável quando bem manejado e atendida toda a complexidade do sistema. Destinando a área para pastejo pode haver maior viabilidade com o este sistema comparado a outros, tudo quando a pastagem for manejada de forma adequada (BALBINOT JÚNIOR et al., 2009).

2.2 BENEFÍCIOS DOS SIPA PARA O SISTEMA SOLO-PLANTA- ANIMAL

Por meio do sinergismo entre os componentes de um SIPA, há gradativamente melhorias nas condições físicas, químicas e biológicas do solo, as quais fazem do solo um melhor ambiente para o desenvolvimento vegetal.

A inserção do componente “animal” cria uma maior complexidade, mas uma maior capacidade produtiva ao sistema. Em solos sob pastejo a atividade biológica é favorecida, pois com a deposição de fezes bovinas sobre a superfície do solo, vários organismos são beneficiados com tal. A atividade destes organismos favorece a fertilidade do solo por meio da

ciclagem de nutrientes e estruturação do solo (VILLANI E WRIGHT 1990), assim mantendo as funções ecológicas do solo equilibradas (PRIMAVESI, 2002).

Alguns organismos característicos da macrofauna do solo são específicos de áreas com presença de animais. É o caso dos besouros coprófagos que atuam na incorporação e decomposição das fezes dos animais. Esta dinâmica de incorporação do esterco no solo por meio de galerias abertas pelos besouros favorece a qualidade tanto física como química e biológica do solo. Pelos bioporos abertos há um aumento da taxa de infiltração de água e aeração do solo (HORN & SMUCKER, 2005). Estes poros também diminuem a resistência do solo a penetração e aumentam a condutividade hidráulica do solo em superfície (ADAMS; RAUBER; KAISER, 2016), com isso favorecendo o desenvolvimento das plantas e gradativamente a fertilidade do solo (AARONS; CONNOR; GOURLEY, 2004).

A pastagem sob pastejo aumenta seu potencial produtivo quando pressões adequadas de pastejo são utilizadas. O animal quando retira parte do dossel da planta forrageira estimula o seu perfilhamento e concomitantemente o enraizamento. Com isso a planta explora um maior volume de solo por meio de uma maior biomassa de raízes (CARVALHO et al., 2015). Posteriormente, com a decomposição destas raízes, canais contínuos são criados, os quais são importantes para aeração do solo, crescimento de novas raízes e fluxo de água.

Por parte dos produtores o SIPA é altamente viável, pois há um incremento na margem bruta e redução de riscos neste sistema comparado a sistemas que não utilizam o pastejo animal (CARVALHO et al., 2015). Com isso é garantida a sustentabilidade dos produtores em seu sistema produtivo e atingido mais facilmente o nível de reprodução social.

Os benefícios em SIPAs são alcançados quando o manejo é realizado corretamente, principalmente no que se refere ao manejo da pastagem, com correta lotação animal e consideração do estado de umidade do solo para tomada de decisão de liberação dos animais para pastejo, evitando a liberação sob solo com consistência plástica. Para haver o sinergismo entre solo-animal-planta, a carga animal no momento de pastejo precisa estar de acordo com a produção ou oferta de forragem. Cargas excessivas comprometem a estrutura do solo, o que pode limitar a produção das culturas em sucessão a pastagem e inviabilizar o sistema (SECCO et al., 2009).

2.3 PROBLEMAS DE MANEJO E DEGRADAÇÃO DO SOLO EM SIPAS

A compactação, é um dos processos que mais degrada os solos agrícolas juntamente com a erosão (HAMZA; ANDERSON, 2005) pois reduz a taxa de infiltração de água no solo

(LANZANOVA et al., 2007) e trocas gasosas, então comprometendo a sinergia entre solo-animal-planta que tanto se busca em SIPAs. Com a compactação excessiva do solo tem-se uma limitação no desenvolvimento de raízes, então podendo comprometer a crescimento e desenvolvimento das culturas (REICHERT et al., 2007; SECCO et al., 2009).

Em áreas de SIPAS, o problema da compactação do solo se intensifica ainda mais quando as áreas também são destinadas para produção de silagem durante o verão. Com isso, através do tráfego de máquinas em até 60 % da área, a estrutura do solo pode ficar comprometida pela compactação do solo (DUTTMAN et al., 2014). A produtividade de milho então pode ser muito influenciada pelos altos níveis de compactação do solo (FREDDI et al., 2007).

Em áreas de pastejo a compactação do solo se concentra mais em sua superfície (LANZANOVA et al., 2007; RAUBER et al., 2016; OLIVEIRA et al., 2016). Os bovinos por possuírem uma elevada massa corporal e uma pequena área de contato com o solo por meio de seus cascos, exercem uma grande pressão, capaz de comprimir o solo principalmente em condições de elevada umidade (LEÃO et al., 2004), quando a coesão entre as partículas do solo é baixa.

A mudança estrutural do solo ou sua compressibilidade por ação de uma pressão externa, como no caso dos cascos dos bovinos, pode ser influenciada pela textura do solo (CORREA & REICHARDT, 1995) e da quantidade de material vegetal sobre o solo no momento do pastejo pelos bovinos. O material vegetal quando presente na superfície do solo, age como “dissipador” da pressão exercida pelo animal, então o pisoteio causa menor impacto nas condições físicas do solo (LEÃO et al., 2004). Adubação nitrogenada na pastagem e manutenção de um dossel com altura elevada tendem a promover uma maior quantidade de material vegetal sob o solo no momento do pastejo, o que é crucial para que o sistema tenha êxito (BALBINOT JÚNIOR et al., 2009).

A resistência do solo a penetração de raízes (RP) aumenta com a compactação do solo, assim dificultando o crescimento das raízes. Cada tipo de solo também possui uma densidade crítica, a partir da qual pode ocorrer limitação no crescimento de raízes. Reichert, Reinert e Braida (2003) propuseram alguns limites de acordo com a classe textural do solo: 1,3 a 1,4 Mg m⁻³ para solos argilosos; 1,4 a 1,5 Mg m⁻³ para solos franco-argilosos; e 1,7 a 1,8 Mg m⁻³ para solos franco-argilosos.

A porosidade de aeração do solo é um fator que também influencia na produtividade das culturas, pois é responsável pelo suprimento de oxigênio e trocas gasosas, sendo assim fundamental para as raízes respirarem e conseqüentemente produzirem energia necessária para

absorção de nutrientes (TAIZ & ZEIGER, 2006). Além da quantidade de poros com ar no solo também é importante a continuidade do sistema poroso para haver fluxo de gases (VAN LIER, 2016). Na falta de oxigênio no solo o processo aeróbio dos microrganismos também é afetado, o que pode culminar em produção de substâncias tóxicas às raízes pelo metabolismo anaeróbio. Esta porosidade pode ser influenciada pela compactação do solo pelo pisoteio bovino (LANZANOVA et al., 2007; RAUBER et al., 2016).

Cabe ressaltar, que o solo naturalmente possui uma resiliência, ou seja, capacidade de voltar ao estado normal após um distúrbio como no caso da compactação, isto principalmente através de ciclos de umedecimento e secagem (BAVOSO et al., 2012) como também devido à altos conteúdos de matéria orgânica e presença de raízes. Então como a compactação por bovinos é mais na superfície do solo, também é neste local onde ocorrem de forma mais intensa ciclos de emudecimento e secagem, atividade biológica e presença de maior conteúdo de matéria orgânica e raízes. Rauber et al (2016) verificaram que a densidade do solo volta ao normal após a retirada da soja em integração com bovinos de leite, assim demonstrando que o solo possuiu uma capacidade de resiliência.

Além da resiliência, ainda há a resistência do solo a mudanças, a qual segundo Seybold, Herrick e Brejda (1999) é a capacidade do solo em resistir às mudanças impulsionadas por um distúrbio. Com estudos na área, Gregory et al (2009) chegou à conclusão que solos mais resistentes também são mais resilientes. Esta resistência, pode ser influenciada pelo próprio manejo do solo. A matéria orgânica do solo (MOS), por possuir uma baixa densidade de partículas e ter uma grande importância da estabilidade estrutural do solo (KLEIN, 2008) deixa o solo mais resistente a compactação. As deformações no solo com maior conteúdo de carbono em sua constituição tendem a ser mais elásticas (BRAIDA et al., 2008). Portanto o manejo do solo, tendo em foco o incremento de MOS, deixa-o mais resistente a compactação.

Uma das alternativas que os agricultores encontram para amenizar o efeito bovino nos atributos físicos do solo é o uso de escarificadores após o ciclo de pastejos. A escarificação é atualmente recomendada para diminuir a compactação dos solos (CAMARA & KLEIN, 2005). É uma alternativa para romper camadas compactadas, diminuir a densidade e também aumentar a porosidade do solo, além também de diminuir consideravelmente a resistência mecânica do solo a penetração, então contribuindo para um melhor desenvolvimento de raízes (KAISER, 2010). É uma prática mecânica importante para o manejo conservacionista do solo, visto que práticas culturais muitas vezes não são suficientes para amortização de um impacto no solo. A escarificação aumenta a rugosidade do solo e também pode aumentar a taxa de infiltração de água no solo e afetar capacidade de armazenamento de água. É uma ferramenta importante, mas

não deve ser utilizada de maneira isolada, visto que as modificações no solo impulsionadas pelo seu uso são sempre temporárias e tendem a durar por um período menor que doze meses (CAMARA & KLEIN, 2005; SILVA, 2011). Ainda, um solo escarificado posteriormente pode estar sujeito a um maior adensamento numa mesma condição de umidade, isto pelo fato de a escarificação diminuir a capacidade de suporte de carga do solo (BRAIDA et al., 2008).

2.4 SIPAS COM GADO LEITE X SIPAS COM GADO DE CORTE

Atualmente a maioria dos dados sobre atributos físicos do solo em SIPAs são em sistemas que utilizam gado de corte e em larga escala. As pressões de pastejo neste sistema permanecem baixas não comprometendo a estrutura do solo, mantendo as funções ecológicas do solo equilibradas e garantindo sustentabilidade e lucratividade com a atividade (ANGHINONI; CARVALHO; COSTA, 2013). No caso da utilização de gado de leite no sistema e com pastejo de forma rotativa, intensifica-se mais a área, a qual fica sujeita a pressões de pastejo mais elevadas.

Sobre os sistemas ou métodos de pastejo que atualmente são utilizados, são o contínuo e rotacionado. No sistema contínuo de pastejo ocorre a liberação dos animais para pastejo em toda a área e durante todo o ciclo de crescimento e desenvolvimento da forrageira, de forma a adaptar uma quantidade de animais para manter uma certa altura de dossel e de acordo com a própria produção de forragem. Já no sistema de pastejo rotativo são utilizados vários piquetes em uma área total de pastagem onde o tamanho do piquete é de acordo com o número de animais e/ou produção de forragem, os animais vão passando de um piquete para o outro normalmente em um tempo de um dia, voltando ao primeiro piquete quando a forrageira do mesmo estiver novamente no ponto ótimo para pastejo. O sistema de pastejo rotacionado tende a ser mais prejudicial ao solo comparado ao sistema de pastejo contínuo, pois concentra um maior número de animais por unidade de área (LEÃO et al., 2005). Em ambos os sistemas tem-se uma alta pressão exercida ao solo. Segundo Gaggero (1998) os dois aspectos que requerem maior atenção no manejo dos animais na pastagem é a pressão de pastejo e a movimentação animal na área. A carga estática que os bovinos exercem ao solo é de 112 a 165 kPa, a qual se duplica quando os animais estão em movimento (GAGGERO, 1998).

Sobre a movimentação dos bovinos nos locais de pastejo, maiores ofertas de forragem fazem com que os animais se movimentem menos e conseqüentemente agridam menos a estrutura do solo. Já em condições de menores ofertas de forragem os animais tendem a buscar

práticas compensatórias para fins de aumentar a taxa de ingestão de forragem, assim se movimentando mais e agredindo mais fortemente a estrutura do solo (PALHANO et al., 2006).

São poucos os trabalhos sobre SIPA com gado de leite atualmente. Lanzasova et al (2007), estudando diferentes frequências de pastejo de forma rotativa, verificou que a estrutura do solo foi modificada pelo pisoteio bovino na frequência de 14 dias, por meio do aumento significativo da densidade na camada de 0 – 5 cm de solo e modificação também na porosidade do solo até a camada de 15 cm, onde houve uma diminuição da macroporosidade. Conseqüentemente a taxa de infiltração de água e resistência a penetração nestas camadas também foram afetadas, com diminuição da primeira e aumento da segunda.

2.5 INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO DO SOLO COMO INDICADOR DA QUALIDADE ESTRUTURAL DO SOLO EM SIPAS

Observando toda a complexidade de fatores que podem atuar na degradação do solo, o intervalo hídrico ótimo (IHO) do solo vem sendo utilizado a fim de sistematizar a relação entre os principais fatores físicos que afetam o desenvolvimento das plantas (GUBIANI; REICHERT; REINERT, 2012)

A primeira definição sobre o conteúdo de água não limitante para crescimento de plantas, foi proposto por Letey (1985). O conceito de *Non Limiting Water Range* (NLWR) foi de gerar uma faixa de umidade no solo entre limites superiores e inferiores, onde não há limitação de água, oxigênio e resistência a penetração. Este estudo foi aprimorado por Silva, Kay e Perfect (1994) e Tormena, Silva e Libardi (1998), consolidando como intervalo hídrico ótimo (IHO). É gerado através da relação entre fatores físicos do solo que são: Porosidade de aeração, resistência a penetração e a água disponível (AD). Tudo por meio das curvas de limites superior e inferior destes fatores em função da densidade do solo.

No limite superior tem-se a porosidade de aeração e a capacidade de campo do solo (CC). A capacidade de campo é definida como a umidade do solo após ter ocorrido uma drenagem natural, ou seja, a quantidade máxima de água que o solo consegue reter (KLEIN, 2008). A porosidade de aeração é em relação a quantidade de macroporos no solo, responsáveis pela aeração, que é indispensável para um bom desenvolvimento de raízes (KLEIN, 2008). Com o aumento da umidade ocorre uma diminuição da aeração do solo, ou seja, uma resposta inversa.

No limite inferior, tem-se os parâmetros de resistência do solo a penetração (RP) e ponto de murcha permanente (PMP). A RP aumenta em decorrência da queda de umidade, ou seja, possui correlação negativa com a umidade do solo (CANCIAN, 2015) e representa o nível de

resistência que o solo, em determinada umidade e densidade, possui para o desenvolvimento de raízes. Já o ponto de murcha permanente do solo é a umidade em que as plantas perdem turgescência, ou seja, quando o potencial mátrico do solo é forte capaz de inibir a absorção de água pelas plantas (KLEIN, 2008), isto sob um potencial matricial de -1,5 MPa. Quando a umidade do solo permanece abaixo do PMP as plantas não se recuperam posteriormente, mesmo que as condições de umidade voltem a estados favoráveis.

Fora os limites da água disponível no solo, para geração das curvas de cada fator integrante do IHO é necessário utilizar valores críticos de porosidade de aeração e de resistência a penetração. A porosidade de aeração, a partir da qual é considerada como limitante para o desenvolvimento das raízes no solo é de $0,1 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ (DREWRY; CAMERON; BUCHAN, 2008), visto que abaixo disso a planta já sofre pela deficiência de difusão de gases no solo, e por consequência sofre pela falta de oxigênio. Este valor vem sendo considerado fixo para determinação do IHO, já o valor crítico de RP depende da espécie cultivada.

Com a junção dos atributos de ordem superior e inferior, além de gerar uma faixa de água no solo onde as limitações para crescimentos das plantas são mínimas para cada estado de densidade do solo, é possível também gerar pelo modelo matemático criado, a densidade crítica do solo (DS_c), a qual ocorre quando o IHO é igual a zero (LETEY, 1985), visto que o IHO tem uma diminuição com o aumento da densidade do solo (TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1998).

Quando se fala em disponibilidade de água no solo às plantas, o IHO pode ser um melhor indicador do que a água disponível no solo (CAVALIERI et al., 2006). Esta última apenas considera como limites superior e inferior a capacidade de campo do solo e o ponto de murcha permanente. A ideia com o IHO é que já pode haver restrições mesmo dentro da faixa de água disponível no solo, isto por restrições de porosidade de aeração no limite superior e por resistência a penetração no inferior.

Dentre os fatores físicos do solo considerados para avaliação do IHO, o que mais tende a ser restritivo para o desenvolvimento das culturas é a RP (TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1998; KAISER et al., 2009). Já a porosidade de aeração do solo vem sendo considerada menos restritiva ao desenvolvimento radicular (LAPEN et al., 2004).

Sobre a resistência mecânica do solo a penetração de raízes, alguns autores utilizam diferentes valores para expressarem o valor limite para o desenvolvimento de raízes, mas o valor que mais vem se correlacionando com a produtividade das culturas é o de 2 MPa, exemplo dado por Kaiser et al (2009) ao estudar o IHO e desenvolvimento de raízes de feijoeiro.

A RP, após passar dos valores críticos para cada cultura, pode afetar mais do que proporcionalmente a produtividade das mesmas (SUZUKI et al., 2007). Segundo Girardello et

al (2014), o valor crítico em Latossolo Vermelho para a cultura da soja foi de 3 MPa. Neste valor, induzindo a decréscimo de 10 % na produtividade da soja. Já quando os valores de RP ganham incrementos bastante pequenos a partir do considerado crítico, os danos na cultura aumentam bastante. Em valores de 5 MPa a produtividade da soja foi diminuída em 38 % segundo o mesmo autor.

Em SIPAs, atualmente existem poucos trabalhos sobre intervalo hídrico ótimo do solo, visto também que o IHO é um conceito atual e que engloba vários fatores de avaliação, os quais normalmente são estudados isoladamente. As principais conclusões que estão sendo observadas em SIPAs é que, primeiramente o IHO é menor em sistema de pastejo rotacionado comparado ao contínuo, justo pela da maior lotação animal (LEÃO et al., 2004). Este mesmo autor também concluiu que uma maior quantidade de resíduo vegetal sobre o solo no período de pastejo tende a não prejudicar a estrutura do solo, isto pela questão de o material vegetal atuar como um dissipador da carga animal na superfície solo. Em outro trabalho avaliando o IHO em em um SIPA, Fidalski, Tormena e Alves (2013) concluíram que a maior modificação do IHO ocorre na camada superficial do solo de 0 – 10 cm, sendo que o fator de maior restrição tanto nesta como nas camadas mais profundas de solo é a resistência mecânica do solo a penetração (RP). O mesmo autor ainda observou que em intensidades maiores de pastejo foi encontrada um maior número de amostras com densidade do solo maior que a DS_C obtida pelo IHO.

Em trabalho em SIPA com gado de corte e em sistema de pastejo contínuo, Andrade Costa (2014) concluiu que o IHO não é um bom indicador da qualidade física do solo em pastagens, tanto em anos chuvosos como secos. Portanto no sistema analisado não houve correlação com a produtividade da cultura da soja. Em sistema de pastejo contínuo com baixa pressão de pastejo o IHO permanece elevado, mas quando a carga animal aumenta ocorre a diminuição de sua amplitude e danos físicos no solo são observados (PETEAN; TORMENA, ALVES, 2010).

Por motivos de haver pouca correlação dos resultados atuais de pesquisa sobre IHO com a produtividade das culturas, o fato pode estar atrelado aos parâmetros de limites de aeração (KAISER et al ., 2009) e também da própria variabilidade espacial da estrutura do solo, visto também que a própria planta possui mecanismos anti-estresse para superação de limitações físicas no solo. O que determinará se haverá ou não danos produtivos na planta depende da fase do ciclo que ocorrerá a limitação e do tempo de duração (KAISER , 2010). Quando busca-se correlacionar a produtividade das plantas com o IHO também é preciso levar em consideração a grande variação espacial deste parâmetro no solo (KLEIN et al., 2016). E quando o solo é submetido ao pastejo a hipótese é que esta variação seja maior ainda, visto que

a movimentação e o pisoteio animal não ocorrem de forma uniforme na área.

2.6 AS RAÍZES E AS LIMITAÇÕES FÍSICAS NO SOLO

A produtividade das plantas depende de uma série de fatores que se inter-relacionam desde o estabelecimento da planta no solo até a fase final do seu ciclo. O solo possui papel crucial no desenvolvimento das plantas, permitindo a fixação da planta e agindo na parte de suprimento de água, ar e nutrientes (LETEY, 1985).

A capacidade de o sistema radicular explorar o perfil do solo depende de fatores físicos e químicos. Limitações físicas, por alta resistência a penetração ou indisponibilidade de água, leva à planta emitir sinais bioquímicos até as folhas, levando ao fechamento estomático e paralisação do crescimento (PAIVA et al., 2005).

A água presente no solo regula as restrições físicas do solo às plantas. A temperatura do solo influencia mais na fase de germinação e início do crescimento vegetativo. A resistência mecânica do solo a penetração influencia diretamente o crescimento das raízes até o início do período reprodutivo, sendo que a partir deste o crescimento radicular é paralisado naturalmente pela planta, visto que as reservas energéticas são todas destinadas para o fruto (TAIZ & ZEIGER, 2006).

O que promove o crescimento radicular das plantas, é a divisão celular que ocorre no meristema apical das raízes. Conjuntamente com isso há uma expansão nas zonas de alongamento (TAIZ & ZEIGER, 2006). Papel fundamental para a divisão e expansão celular assume a disponibilidade de água, responsável pelo turgor celular (BENGOUGH; MULLINS, 1991).

É o turgor celular que promove a pressão de crescimento das raízes no solo. A resistência do solo a penetração é o que gera barreiras para este crescimento. Neste sentido várias críticas são colocadas sobre o uso da RP para representar a real resistência do solo a penetração. Primeiramente pelo fato de ser considerado apenas uma direção de crescimento radicular, que é a vertical. Já outra que é considerado um único valor restritivo para cada tipo de cultura independentemente da condição de umidade do solo (GUBIANI et al., 2013). No primeiro ponto a explicação é que as plantas podem buscar caminhos horizontais para crescimento e buscar o vertical assim que uma região de menor resistência ser encontrada pois o solo propriamente possui uma elevada variação espacial de resistência a penetração (CANCIAN, 2015). No segundo ponto é de que as plantas sob deficiência de água possuem uma menor

pressão hidrostática nas células da coifa, já em condição de umidade mais elevada esta pressão aumenta pelo turgor celular, podendo então romper barreiras mais limitantes. Interessante seria ajustar o valor crítico de resistência a penetração no IHO de acordo com a umidade do solo (BENGOUGH et al, 2011). Ainda, cabe ressaltar que com o atual método de determinação da RP, com a penetração de uma haste, considera-se o solo como uma estrutura totalmente homogênea. Mas a questão é que o solo é totalmente heterogêneo, possui por exemplo bioporos, formados pela decomposição de raízes ou pela própria fauna do solo, que são muitas vezes desconsiderados na avaliação de RP. Por meio destes grandes poros pode haver descida de raízes no perfil do solo (SILVA et al., 2016).

A resistência do solo a penetração não deve ser utilizada como fator isolado de avaliação da qualidade física do solo. A umidade e densidade do solo devem ser avaliadas em conjunto com a RP, pois é de acordo com estas propriedades que ela varia. Um valor de RP restritivo em certo momento, logo pode passar para não impeditivo com o incremento da umidade do solo. O que será crucial para um valor crítico de RP restringir ou não o desenvolvimento radicular é o tempo de duração e a fase do ciclo da cultura em que ocorrerá (KAISER, 2010).

A planta para se manter vigorosa precisa de emissão de novas raízes continuamente, e para isso não pode haver impedimento físico do solo. Em anos chuvosos, onde a quantidade e distribuição das chuvas ao longo do ciclo das culturas são satisfatórios, as limitações físicas do solo são amenizadas. Neste caso não havendo interferência de problemas físicos do solo na produtividade das culturas (REICHERT et al., 2009; RAUBER et al., 2016).

Vários autores atualmente colocam valores críticos de RP para diferentes culturas e também de outras propriedades físicas do solo. As diferentes espécies de plantas respondem de forma diferente às limitações físicas do solo. Avaliando as culturas de soja e milho em uma mesma condição de solo, Secco et al (2009) observou uma maior rusticidade da soja comparada ao milho sob efeito de compactação do solo. Os danos produtivos foram maiores na cultura do milho.

As diferentes espécies de plantas geralmente não apresentam diferenças significativas em termos de pressão radicular no solo, como observado por Clark, Whalley e Barraclough (1999) onde monocotiledôneas e dicotiledôneas não apresentaram diferença neste termo. A habilidade de uma planta explorar o perfil de solo em condições de impedância mecânica depende do diâmetro de suas raízes (CLARK; WHALLEY; BARRACLOUGH, 2003). Raízes mais finas tem uma maior facilidade em mudar a direção de crescimento, desviando de camadas compactadas até encontrar regiões de menor resistência visto que possui um menor número de células na coifa, assim facilitando a modulação do sistema radicular e mudando a direção de

crescimento. As raízes ao encontrarem uma camada impeditiva, onde a pressão das células da região da coifa é menor que a resistência que o solo possui, produzem substâncias mucilaginosas que servem como “lubrificantes”, diminuindo a coesão entre as partículas do solo e facilitando o seu crescimento (BENGOUGH; KIRBY, 1999). A quantidade de produção destas substâncias pode variar de acordo com a espécie cultivada. Existe o fato também de que as raízes podem explorar o perfil de solo por meio de bioporos e nesta questão assume grande importância os pelos radiculares nas regiões de alongamento da raiz, pois fazem o papel de ancoragem das mesmas, então tornando possível o crescimento das raízes nos bioporos (BENGOUGH et al, 2011) e explorando camadas mais profundas de solo.

Ao analisar fatores físicos em condições de limitação para as plantas, uma questão muito importante também das diferentes espécies cultivadas, é a evapotranspiração média de cada cultura (GUBIANI; REICHERT; REINERT, 2012). Plantas que absorvem uma maior quantidade de água diariamente podem chegar mais rapidamente em uma condição de restrição física no solo por baixa umidade, além de permanecer nela por mais tempo, ou seja o fator intensidade das limitações físicas tende a ser maior.

3 METODOLOGIA

3.1 LOCAL E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

Para atender os objetivos propostos, o trabalho foi realizado em uma área experimental já consolidada de SIPA com produção leiteira no município de São Pedro do Butiá – RS. O experimento foi iniciado no ano de 2015 e a propriedade escolhida já era representativa de um SIPA com gado de leite há aproximadamente 10 anos. Os dados apresentados nesse trabalho são do segundo ano de condução do experimento, ou seja, do ano de 2016.

O solo foi caracterizado como Latossolo Vermelho de textura argilosa. A área experimental contou com uma área de 1 hectare. O delineamento experimental utilizado foi blocos ao acaso com três tratamentos e quatro repetições: T1: Área com pastejo no inverno (PAST); T2: Área sem pastejo no inverno (S.PAST); T3 : Área com pastejo no inverno seguida de escarificação mecânica (PAST+ESC). A dimensão de cada parcela foi 15 x 30m no verão e de 17 x 30 m no período de inverno, esta última maior devido à necessidade de bordadura para os corredores e cercas nos piquetes.

No início da implantação do experimento, no ano de 2015, foi realizada uma amostragem para análise química do solo nas camadas 0-10 e 10-20 cm. Os dados da análise seguem na **Tabela 1**.

Tabela 1: Resultados da análise química do solo nas camadas 0-10 e 10-20 cm de profundidade na área experimental, 2015.

Prof. (cm)	ph água 1:1	Al %	Ca	Mg	Al Cmolc dm ⁻³	H+Al	CTC	Ph7	V %
0-10	5,0	3,9	6,5	2,9	0,4	10,9	20,8		47,7
10-20	5,7	0,0	7,4	2,9	0,0	3,9	14,5		73,2

Prof. (cm)	Argila %	M.O %	Índice SMP	S	P	K ...mg dm ⁻³	Cu	Zn	B
0-10	64	3,0	5,2	12,5	28,2	216,0	12,89	3,846	0,3
10-20	65	2,3	6,1	-	10	120,0	5	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 CONDUÇÃO DE INVERNO

Em toda a área foi implantada a cultura da aveia + azevém (*Avena sativa* + *Lolium multiflorum*) com semeadora adubadora de cereais de inverno. A semeadura foi realizada no dia

28/05/2016. A adubação utilizada foi de 200 kg ha⁻¹ de uma formulação N-P-K 12-30-20. No dia 04/07/2016, 37 dias após sementeira, foi realizada uma aplicação de nitrogênio na dose de 100 kg ha⁻¹. Após o primeiro pastejo de cada bloco foi aplicada novamente uma dose de nitrogênio, na dose de 42 kg ha⁻¹.

Os pastejos foram realizados de forma rotativa, em blocos, com pouco mais de 1 dia de permanência. Os animais eram liberados para pastejo pela manhã após a ordenha, retirados ao meio dia para beberem água e liberados à tarde novamente para pastejo. Deixavam cada bloco na manhã do dia seguinte. O tratamento S.PAST ficou isolado, livre de pastejo. A tomada de decisão para liberação dos animais para pastejo foi o ponto em que a forrageira atingia cerca de 40-50 cm de altura, se assemelhando ao manejo característico da região em estudo. A taxa de lotação utilizada foi de 5 U.A (Unidades animais) por bloco, o que corresponde a uma taxa instantânea de 49 U.A ha⁻¹, taxa total de lotação animal de 1,6 U.A ha⁻¹ quando considerado o período de estabelecimento e de ocupação da forrageira e taxa total de 2,7 U.A ha⁻¹ quando considerado apenas o período de ocupação da pastagem. O período de estabelecimento da pastagem foi de 52 dias e o de ocupação 73 dias. As datas de cada pastejo seguem na **Tabela 2**. No total foram realizados 4 ciclos de pastejo (**Figura 1**). Os cinco animais utilizados para pastejo possuíam massa corporal média de 450 kg e recebiam suplementação diária de 2,5 kg animal⁻¹ de concentrado. Esta suplementação que representa 0,6 % do peso vivo de cada animal gerou um potencial de consumo de 2,4 % do peso vivo dos animais em pastagem, visto que o limite de consumo de matéria seca diário é de aproximadamente 3 % do peso vivo.

Tabela 2: Datas correspondentes a cada pastejo durante o inverno, 2016. DAS: Dias após sementeira da pastagem.

Pastejo	Bloco	Data	DAS
1	1	19/07/2016	52
1	2	21/07/2016	54
1	3	23/07/2016	56
1	4	26/07/2016	59
2	1	03/08/2016	67
2	2	08/08/2016	72
2	3	10/08/2016	74
2	4	15/08/2016	79
3	1	25/08/2016	89
3	2	29/08/2016	93
3	3	06/09/2016	101
3	4	08/09/2016	103
4	1	24/09/2016	119
4	2	26/09/2016	121
4	3	28/09/2016	123
4	4	30/09/2016	125

Figura 1: Manejo animal durante o inverno na área experimental, 2016.



No período de pastejo foi avaliada a oferta de forragem (OF), massa de forragem (MF) e o resíduo de forragem (RF) em cada pastejo como também a umidade gravimétrica do solo à cada entrada animal para pastejo.

Oferta de forragem: Foi determinada de acordo com os valores de massa de forragem em cada pastejo e expressa em porcentagem de peso vivo animal (% PV) (**Figura 2**).

Massa, resíduo e produção total de forragem: Foi utilizado um quadro delimitador de 0,25 m², o qual foi arremessado em 5 pontos por parcela. Toda massa vegetal delimitada pelo quadro foi totalmente cortada, ensacada e levada à estufa por 105 °C para determinação da matéria seca. No tratamento S.PAST foi avaliada a massa total de forragem no período de floração. Os dados constam na **Figura 3**.

Umidade gravimétrica do solo: Em cada dia de entrada dos animais para pastejo, foram coletadas amostras de solo nas camadas 0-10 e 10-20 cm de profundidade em cada parcela de cada bloco. Foi utilizado um trado holandês para coleta do solo. Em cada parcela foram coletadas 3 amostras por profundidade. A determinação da umidade gravimétrica foi de acordo com Embrapa (2011).

Limites de consistência do solo: Foram coletadas amostras deformadas de solo nas camadas 0-10 e 10-20 cm de cada bloco, posteriormente secas ao ar, maceradas, peneiradas em peneira de 2 mm. Então foi determinado o limite de liquidez (LL), referente ao teor de umidade no solo quando ocorre mudança do estado líquido para o plástico. Posteriormente determinado

o limite de plasticidade (LP), referente ao teor de umidade no solo no momento da mudança do estado plástico para o semi-sólido. O índice de plasticidade (IP) foi determinado pela subtração entre LL e LP, tudo de acordo com metodologia descrita em EMBRAPA (2011).

Figura 2: Oferta de forragem expressa em porcentagem de peso vivo animal (% PV) em cada pastejo de inverno, 2016.

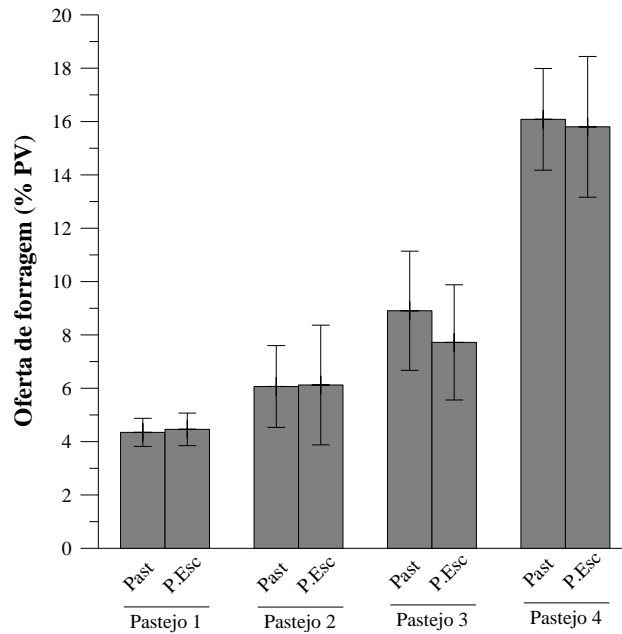
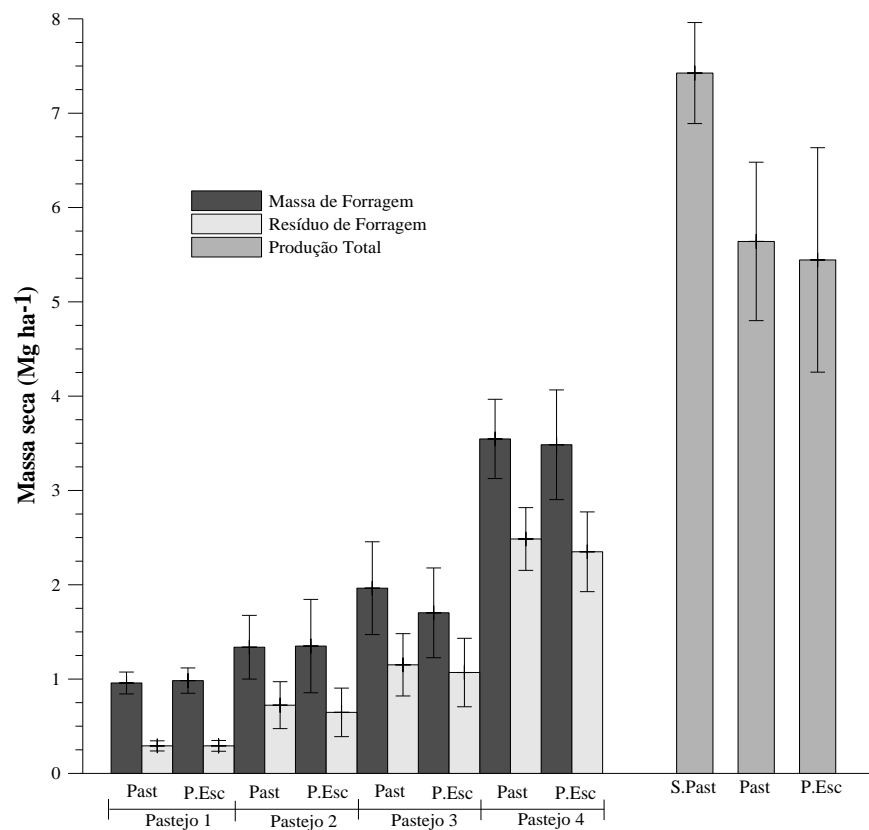


Figura 3: Massa, resíduo e produção total de massa seca forrageira durante o inverno, 2016.



3.3 CONDUÇÃO DE VERÃO

Após os 4 ciclos de pastejo no inverno a área foi dessecada com herbicida Glifosato e o tratamento PAST + ESC escarificado com um escarificador mecânico de 7 hastes (**Figura 4**). A data que foi realizada a escarificação foi 23/10/2016. Anterior à escarificação foi avaliada a densidade e distribuição de poros nas parcelas do tratamento PAST + ESC, coletando amostras de solo com estrutura preservada nas camadas 0-5, 5-10, 10-20 e 20-30 cm e seguindo metodologia descrita em Embrapa 2011. Os valores de densidade e distribuição de poros antes da escarificação seguem na **Tabela 3**. Foi então implantada a cultura da soja com semeadora adubadora com utilização de hastes sulcadoras no dia 22/11/2016. A cultivar utilizada foi a Brasmax Ponta 7166 RSFIPRO. O espaçamento entre linhas utilizado foi de 50 cm. A densidade de semeadura foi de 25 sementes m^{-2} . A dose de fertilizante utilizado na semeadura foi de 300 $kg\ ha^{-1}$ de uma formulação 0-20-20 de N-P-K. Em superfície foi aplicada uma dose adicional de 95 $kg\ de\ KCl\ ha^{-1}$, que corresponde a 55 $kg\ de\ K_2O\ ha^{-1}$. O manejo fitotécnico da cultura após a emergência consistiu em uma aplicação de herbicida e inseticida e quatro de fungicida.

Tabela 3: Valores de densidade e distribuição de poros no tratamento PAST+ESC anteriormente à escarificação mecânica do solo, 2016. Ds: Densidade do solo; Pt: Porosidade total; Mi: Microporosidade; Ma: Macroporosidade.

Camadas (cm)	Ds ($Mg\ m^{-3}$)	Pt ($m^3\ m^{-3}$)	Mi ($m^3\ m^{-3}$)	Ma ($m^3\ m^{-3}$)
0 - 5	1,43	0,49	0,43	0,06
5 - 10	1,45	0,48	0,41	0,07
10 - 20	1,46	0,48	0,41	0,07
20 - 30	1,35	0,52	0,44	0,08

No dia em que foi realizada a escarificação foi avaliada a umidade gravimétrica do solo (**Tabela 4**). Observa-se que a umidade em todas as profundidades estava com umidade abaixo do limite de plasticidade, ou seja, sob consistência friável, como é recomendado para realização da escarificação.

Tabela 4: Umidade gravimétrica do solo nas parcelas escarificadas no momento da escarificação, 2016.

Bloco	Profundidade (cm)	Umidade (g g ⁻¹)	Limite de plasticidade (g g ⁻¹)
1	0 - 10	0,26	0,33
1	10 - 20	0,24	0,30
1	20 - 30	0,30	0,39
2	0 - 10	0,27	0,33
2	10 - 20	0,26	0,30
2	20 - 30	0,33	0,39
3	0 - 10	0,25	0,33
3	10 - 20	0,30	0,30
3	20 - 30	0,25	0,39
4	0 - 10	0,26	0,33
4	10 - 20	0,25	0,30
4	20 - 30	0,33	0,39

Figura 4: Escarificação mecânica e semeadura da soja na área experimental, 2016.



Para caracterização física do solo, foi avaliado: Densidade do solo, porosidade total, microporosidade, macroporosidade e curva de retenção de água no solo. Abaixo segue de maneira detalhada o método de análise de cada um destes parâmetros.

Densidade, porosidade total, microporosidade e macroporosidade: Após os ciclos de pastejo e escarificação do tratamento PAST + ESC, foram coletadas amostras indeformadas de solo com anéis de aço inox de 4,9 cm de diâmetro e 5,3 cm de altura nas camadas de 0-5 cm; 5-10 cm; 10-20 cm e 20- 30 cm, isso em dois pontos por parcela. A determinação da densidade do solo e distribuição de poros seguiu metodologia de Embrapa (2011).

Curva de retenção de água no solo (CRA): As amostras coletadas para densidade e distribuição de poros também foram utilizadas para esta determinação. Após serem saturadas foram submetidas a diferentes tensões, que foram: de 0,001, 0,003, 0,006 e 0,01 MPa em uma mesa de tensão e de 0,033 e 0,1 MPa em placas porosas em extratores de Richards. A umidade

nas tensões de 0,5, 1 e 1,5 MPa foi determinada em amostras deformadas em equipamento WP4. Após cada tensão as amostras foram pesadas para quantificação da umidade. No caso das amostras utilizadas no equipamento WP4 foram criadas equações para determinação da umidade gravimétrica. Esta umidade gravimétrica foi multiplicada pela densidade de cada amostra que foi submetida às tensões acima para determinação da umidade volumétrica. A capacidade de campo (CC) foi atribuída ao conteúdo de água sob tensão de 0,01 MPa e o ponto de murcha permanente (PMP) sob tensão de 1,5 MPa (EMBRAPA, 2011).

Para a caracterização do solo e determinação da distribuição de poros também foi necessário a determinação da textura do solo e densidade de partículas.

Textura do solo: Utilizado para caracterização do solo da área. Foram coletadas amostras de solo nas mesmas camadas que os parâmetros já mencionados. O método de análise foi de acordo com Embrapa (2011), de maneira a fazer dispersão química com NaOH e posterior dispersão mecânica. Os dados de textura seguem na **Tabela 5**.

Tabela 5: Porcentagem de areia, silte e argila nas camadas 0-10 e 10-20 cm do solo da área experimental.

Camada (cm)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)
0-10	10,53	30,34	59,13
10 - 20	8,17	28,59	63,24

Densidade de partículas: Foi quantificado o volume de álcool gasto para completar um recipiente, com volume conhecido, contendo cerca de 20 g de solo seco, seguindo detalhadamente Embrapa (2011).

Para elaboração do IHO, foram necessárias as curvas dos seus limites superiores e inferiores de acordo com a densidade e umidade do solo. Para isto foi utilizado o programa SAS para criação dos modelos de cada limite.

Porosidade de aeração (PA): É um dos limites superiores do IHO. Seu valor crítico é de $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. A umidade volumétrica necessária para este valor de aeração no solo diminui com o aumento da densidade do solo e foi obtida pela seguinte equação:

$$\Theta_{PA} = (1 - D_s / D_p) - 0,1$$

Onde Θ_{PA} é a umidade do solo na respectiva porosidade de aeração; D_s é a densidade do solo em Mg m^{-3} e D_p é a densidade de partículas em Mg m^{-3} .

Capacidade de campo (CC): Umidade volumétrica do solo sob a tensão de 0,01 MPa, de acordo com Embrapa (2011).

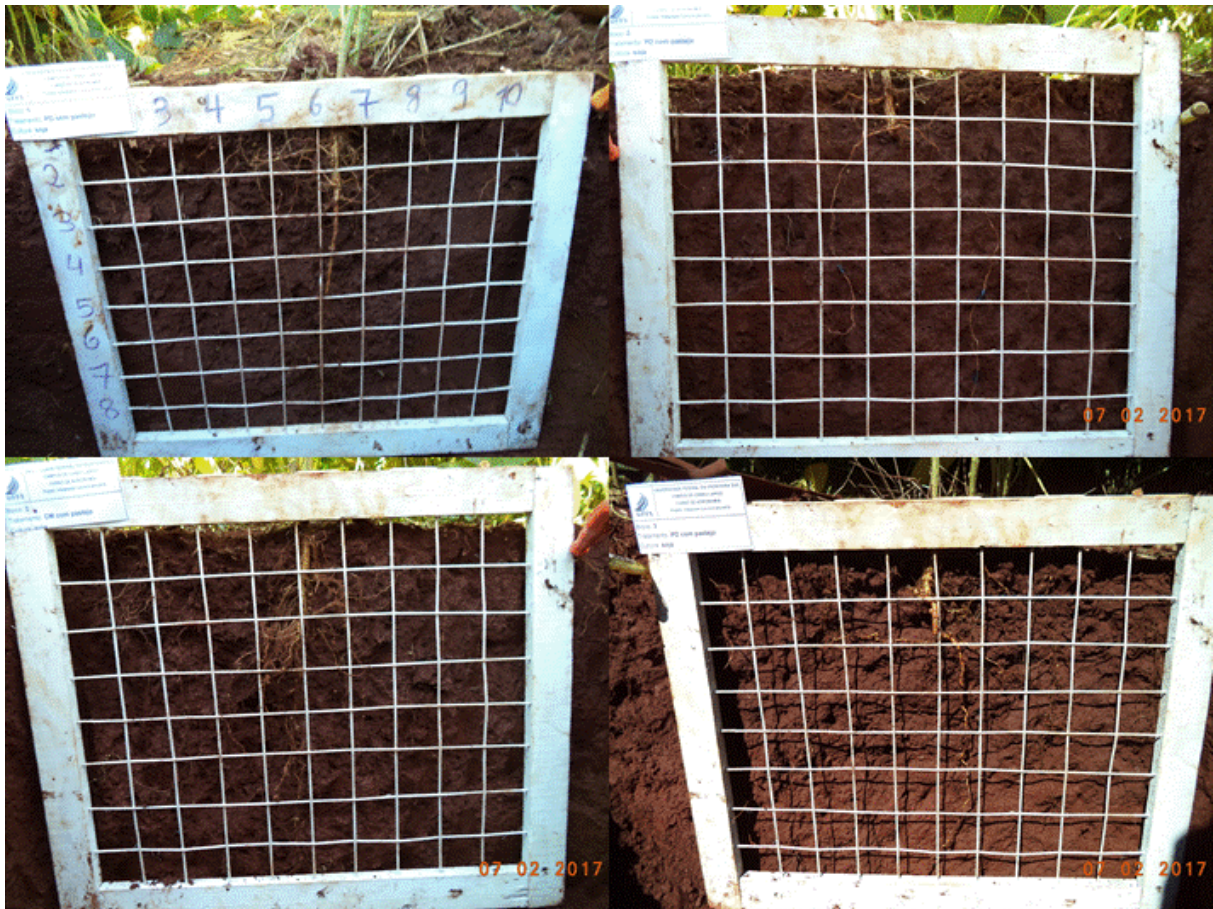
Ponto de murcha permanente (PMP): Umidade volumétrica do solo sob tensão de 1,5 MPa (EMBRAPA, 2011).

Equação da resistência do solo à penetração (RP): Foram coletadas amostras com estrutura preservada de solo aleatoriamente na área experimental, buscando locais com variabilidade de densidade do solo. Os anéis utilizados foram do tipo Uhland, com 7,1 cm de altura e 7 cm de diâmetro. Foram coletadas 120 amostras deste tipo. Estas amostras primeiramente foram utilizadas para quantificação de sua porosidade de acordo com Embrapa (2011) e após para avaliação da resistência à penetração. Para elaboração da curva característica de resistência à penetração foi necessário ter variabilidade de densidade do solo e de umidade. Para variação de umidade, as amostras foram submetidas à diferentes tensões por meio da mesa de tensão e câmara de Richards e por diferentes tempos de secagem ao ar, já a variabilidade de densidade do solo foi buscada na própria coleta. A avaliação de RP em cada amostra foi realizada com um penetrômetro automático marca Falker modelo Solo Ttrack PLG 5300, utilizando cone do tipo 3 com diâmetro de 7,94 mm e ângulo de 30°. As leituras foram realizadas a cada 1 cm de solo. Os dados de RP, umidade e densidade foram ajustados ao modelo de Busscher (1990). O valor crítico de RP utilizado foi de 3 MPa.

Com a criação dos modelos dos limites do IHO foi determinada a amplitude do IHO em cada tratamento. Na cultura da soja foi avaliada a distribuição de raízes e produtividade como também a umidade do solo durante todo o ciclo da cultura.

Distribuição de raízes no perfil de solo: No início do florescimento da cultura da soja foi avaliada a distribuição de raízes de plantas representativas em cada unidade experimental. Foi aberta uma trincheira em cada parcela, paralela a uma planta. As raízes foram cuidadosamente expostas no perfil para realização de fotografias. Para melhor verificação da distribuição de raízes, foi utilizado um quadro de madeira de 50x50 cm, delimitado por fios de nylon a cada 5 cm, de forma a ser criada uma malha (**Figura 5**).

Figura 5: Exposição das raízes da soja no perfil de solo para avaliação da distribuição do sistema radicular utilizando um quadro delimitador com malha.



Retenção de água no solo durante o ciclo da soja: Durante o ciclo da cultura da soja foi continuamente avaliada a umidade do solo. Foram coletadas amostras deformadas de solo nas camadas de 0-10cm; 10-20 cm e 20-30 cm em 1 ponto por parcela. A determinação da umidade gravimétrica foi de acordo com Embrapa (2011). Este valor de umidade gravimétrica foi multiplicado pela densidade do solo de cada parcela e camada para obtenção da umidade volumétrica do solo. Conjuntamente com a avaliação da umidade do solo, foram acompanhados os índices pluviométricos na área experimental. Foi utilizado um pluviômetro de precisão, o qual ficou instalado junto à área experimental.

Produtividade de grãos da cultura da soja: Na fase de maturação fisiológica foram coletadas as plantas dentro da parcela numa área de 4 m². A produtividade de grãos foi corrigida em Mg ha⁻¹ a 13 % de umidade.

Todos os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e comparação de médias pelo teste de tukey a 5 % de probabilidade de erro.

3.4 DENSIDADE E DISTRIBUIÇÃO DE POROS PÓS INVERNO DE 2015

No ano de 2015 foi avaliada a densidade e distribuição de poros após os ciclos de pastejo de inverno nas camadas 0-10, 10-20 e 20-30 cm (**Tabela 6**), seguindo metodologia descrita em Embrapa (2011). No inverno de 2015 foram realizados apenas 2 ciclos de pastejo, devido à baixa quantidade de chuvas durante o período de estabelecimento e de ocupação da pastagem.

Tabela 6: Densidade e distribuição de poros no solo após ciclo de pastejos e escarificação do solo, inverno de 2015. PAST: Área com pastejo. PAST+ESC: Pastejo seguido de escarificação; S.PAST: Área sem pastejo.

Camada (cm)	Tratamentos		
	S.PAST	PAST+ESC ⁽¹⁾	PAST
	Densidade do solo (Mg m ⁻³)		
0 - 10	1,31 b*	1,35 b	1,48 a
10 - 20	1,41 a	1,43 a	1,42 a
20 - 30	1,30 a	1,33 a	1,37 a
	Porosidade total (m ³ m ⁻³)		
0 - 10	0,53 a	0,52 a	0,47 b
10 - 20	0,50 a	0,49 a	0,49 a
20 - 30	0,53 a	0,52 a	0,52 a
	Microporosidade (m ³ m ⁻³)		
0 - 10	0,43 a	0,40 b	0,42 a
10 - 20	0,42 a	0,40 b	0,41 ab
20 - 30	0,44 a	0,41 b	0,43 ab
	Macroporosidade (m ³ m ⁻³)		
0 - 10	0,10 a	0,12 a	0,05 b
10 - 20	0,08 a	0,09 a	0,08 a
20 - 30	0,10 a	0,11 a	0,09 a

⁽¹⁾ A análise pós pastejo foi realizada após a escarificação do solo.

*Médias seguidas por letras distintas na linha diferem pelo teste de tukey a 5%.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 DENSIDADE E DISTRIBUIÇÃO DE POROS

Houve mudança estrutural do solo em superfície e subsuperfície na área patejada (**Tabela 7**). Isso demonstra, indiretamente, a alta pressão que os bovinos exercem ao solo durante o pastejo, devido à alta massa corporal e pequena área de contato com o solo. Tal pressão, que se duplica quando os animais estão em movimento (CAGGERO, 1998). Além disso, a pressão não é distribuída uniformemente em toda a região dos cascos, o que faz existir locais com maior aplicação de carga (VAN DER TOL et al., 2002).

Tabela 7: Densidade e distribuição de poros no solo após ciclos de pastejo de inverno e escarificação do solo, 2016. PAST: Área com pastejo. PAST+ESC: Pastejo seguido de escarificação; S.PAST: Área sem pastejo

Camadas (cm)	Tratamentos			CV (%)
	PAST	PAST + ESC	S.PAST	
	Densidade do solo (Mg m^{-3})			
0 - 5	1,47 A	1,19 B	1,19 B	6,13
5 - 10	1,46 A	1,28 B	1,39 AB	7,02
10 - 20	1,46 A	1,46 A	1,39 A	4,95
20 - 30	1,37 A	1,30 AB	1,27 B	5,04
	Porosidade total (m^3m^{-3})			
0 - 5	0,47 B	0,57 A	0,57 A	4,99
5 - 10	0,48 B	0,54 A	0,50 AB	6,61
10 - 20	0,48 A	0,48 A	0,50 A	5,25
20 - 30	0,51 B	0,54 AB	0,55 A	4,49
	Microporosidade (m^3m^{-3})			
0 - 5	0,43 A	0,40 B	0,40 AB	4,67
5 - 10	0,43 A	0,41 A	0,41 A	5,03
10 - 20	0,42 A	0,41 A	0,43 A	4,28
20 - 30	0,44 A	0,46 A	0,45 A	4,80
	Macroporosidade (m^3m^{-3})			
0 - 5	0,05 B	0,18 A	0,17 A	30,20
5 - 10	0,05 B	0,14 A	0,09 AB	52,67
10 - 20	0,06 A	0,07 A	0,07 A	50,60
20 - 30	0,07 A	0,08 A	0,10 A	46,30

* Médias seguidas por letras distintas na linha diferem pelo teste de tukey a 5 %.

Avaliando os atributos da **Tabela 7**, percebe-se que a densidade do solo (Ds) no tratamento PAST foi maior nas camadas 0-5 e 20-30 cm de profundidade em relação ao

tratamento S.PAST. As pressões exercidas pelos bovinos se concentram na superfície do solo, porém quando a superfície do solo já se encontra em alto grau de compactação e suporte de carga, as pressões são distribuídas para camadas mais profundas. Então, como no caso deste experimento que foram realizados 4 ciclos de pastejo, a cada nova entrada dos animais nos piquetes (blocos) a pressões podem ter se distribuído para as camadas mais profundas. Porém, esta diferença de Ds em profundidade, também pode estar atrelada à própria variação natural da Ds (SILVA et al., 2009). A exceção das camadas 5-10 e 10-20 cm, que não foram modificadas estatisticamente pelo manejo, provavelmente se deve ao fato de já estarem em alto nível de densidade antes mesmo dos pastejos, então distribuindo as cargas para as camadas abaixo.

A compactação do solo é facilitada quando a consistência do solo estiver plástica, com a umidade dentro do índice de plasticidade, pois nesta condição a água atua como agente lubrificante, facilitando o rearranjo das partículas e diminuindo a coesão (REICHERT et al., 2016). A capacidade de suporte de carga do solo diminui com o aumento da umidade, porém aumenta quanto maior for o nível de densidade do solo. Solos mais argilosos possuem maior compressibilidade, visto que partículas pequenas são mais facilmente encaixadas. Além disso, solos argilosos possuem maior capacidade de retenção de água, então sendo mais plásticos e suscetíveis à compactação. Quando as cargas aplicadas ao solo forem menores que a capacidade de suporte, as deformações são elásticas (recuperáveis). Já quando forem maiores que a capacidade de suporte de carga, as deformações são plásticas (irrecuperáveis). As deformações plásticas ocorrem geralmente quando as pressões são aplicadas sob solo com umidade acima do limite de plasticidade (LP) e dentro do índice de plasticidade (IP). Abaixo deste índice o solo possui consistência friável e as deformações são elásticas, já acima do IP a compactação não ocorre por o solo se comportar como fluido.

Pela avaliação da umidade do solo em cada pastejo, percebe-se que todos os pastejos foram realizados com o solo sob umidade abaixo do IP (**Figura 6; Figura 7**). Assim, as deformações no solo impostas pelo pisoteio animal podem ter sido elásticas e recuperáveis ao longo do tempo.

Figura 6: Umidade gravimétrica do solo na camada 0-10 cm em cada pastejo de inverno e limites de plasticidade e liquidez, 2016. Past: Pastejado; Past+Esc: Pastejo seguido de escarificação.

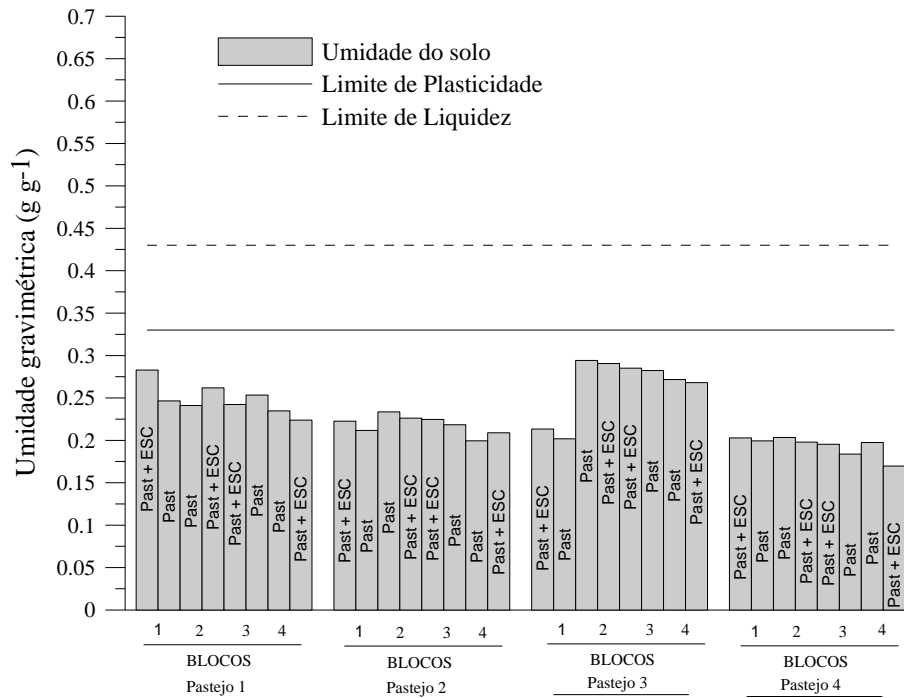
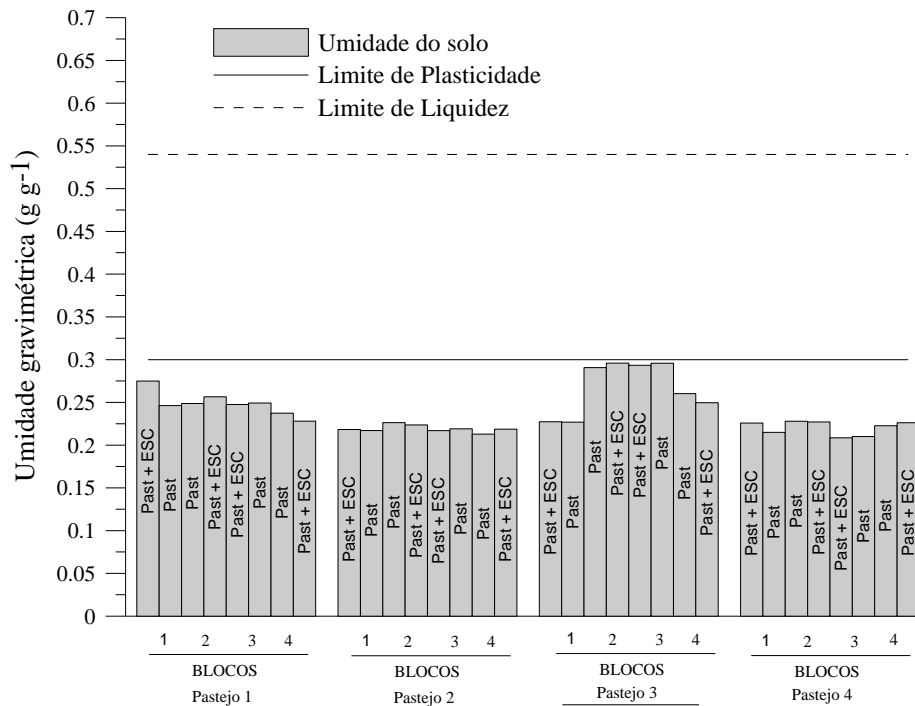


Figura 7: Umidade gravimétrica do solo na camada 10-20 cm em cada pastejo de inverno e limites de plasticidade e liquidez, 2016. Past: Pastejado; Past+Esc: Pastejo seguido de escarificação.



Além da densidade, a porosidade do solo também foi afetada pelo pisoteio animal. A porosidade total (Pt) foi menor no tratamento PAST nas camadas 0-5 e 20-30 cm. A

macroporosidade (Ma) diminuiu até os 5 cm e a microporosidade não chegou a apresentar valores estatisticamente diferentes em relação ao tratamento S.PAST. Avaliando atributos físicos do solo em área de pastejo com diferentes frequências de pastejo, Lanzanova et al (2007) também encontraram um efeito do pisoteio bovino na superfície do solo, pois com o aumento da frequência dos pastejos houve aumento da densidade do solo na camada 0-5 cm e diminuição da macroporosidade até os 15 cm profundidade. Collares et al (2011), observaram uma compactação superficial do solo em áreas pastejadas por bovinos de leite no noroeste do Rio Grande do Sul. Rauber et al (2016) encontraram também efeito do pisoteio animal na superfície do solo até os 10 cm e mudanças na distribuição de poros nesta camada. Portanto, há concordância destes trabalhos com os dados da **Tabela 7** no que diz respeito ao efeito dos bovinos na superfície do solo, porém o efeito em subsuperfície é algo ainda pouco constatado na literatura sobre o tema.

Em sistemas de pastejo rotativo, caso a carga animal permanecer baixa e ser evitada a liberação dos animais para pastejo sob umidade do solo dentro do índice de plasticidade (IP), pode não ocorrer impacto no solo pelo pisoteio. Utilizando os mesmos tratamentos deste estudo, Kunz et al (2013) não encontraram efeito do pisoteio animal na estrutura do solo, concluindo que o sistema de pastejo rotativo não afetou significativamente a estrutura do solo. No mesmo estudo, a produtividade da soja implantada em sucessão à pastagem não foi influenciada, então mantendo apenas os benefícios do sistema de integração lavoura-pecuária para o sistema solo-animal-planta. Isso ocorreu pela provável baixa taxa de lotação animal utilizada e umidade do solo fora do IP durante os pastejos.

Sistemas de pastejo contínuo, por haver uma maior distribuição animal por unidade de área, gera um menor impacto ao solo, porém quando a intensidade de pastejo é elevada pode ocorrer mesmo assim danos à estrutura do solo. Moreira et al (2014), em experimento de 7 anos com diferentes intensidades de pastejo, por meio da manutenção de diferentes alturas do pasto (7, 14, 21 e 28 cm) observaram danos na qualidade física do solo com a intensificação do uso da pastagem. Observaram também, que com a manutenção de altura de 7 cm da forrageira, houve efeito maléfico do pisoteio animal na densidade e porosidade total do solo na camada de 0,0-0,07 m, como também diminuição da macroporosidade até a profundidade de 0,15 m. Pelo aumento da densidade, conseqüentemente foram observados valores restritivos de resistência à penetração nas camadas superficiais do solo e valores de densidade acima da densidade crítica estabelecida pelo intervalo hídrico ótimo. Diante disso cabe colocar que em ambos os sistemas de pastejo pode ou não haver danos à estrutura do solo dependendo da intensidade.

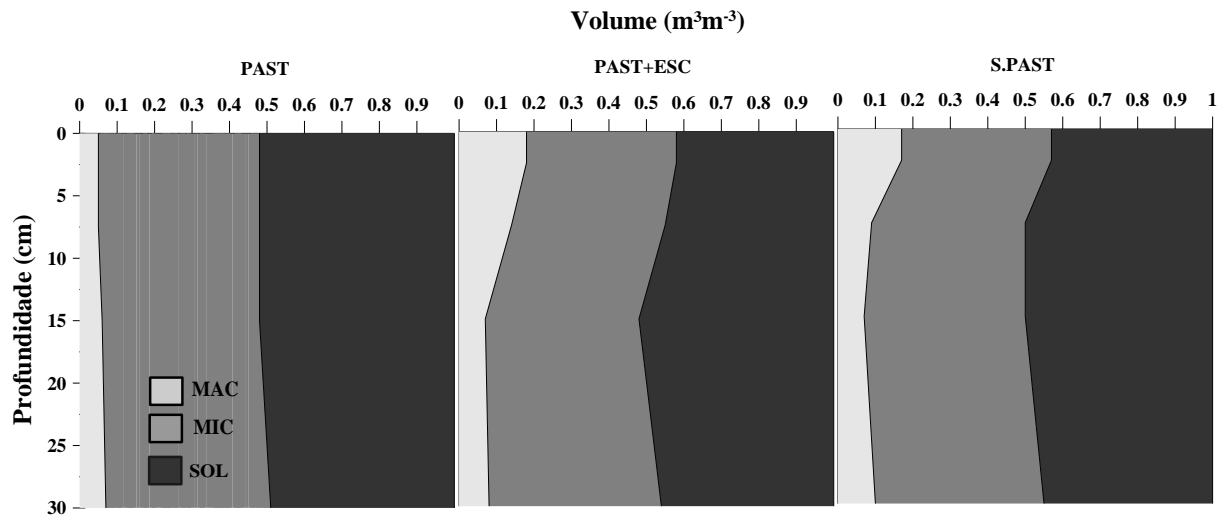
O intenso pisoteio bovino, por exercer mudanças estruturais no solo, diminuiu a taxa de infiltração de água no solo (LANZANOVA et al., 2007; TENFEN, 2014). Em consequência, pode haver uma maior lâmina de escoamento superficial quando chuvas de alta intensidade ocorrem e favorecer perda de solo por erosão.

A escarificação do solo na área pastejada, diminuiu a D_s nas camadas 0-5 e 5-10 cm, se mostrando eficiente para romper as camadas superficiais compactadas pelo pisoteio bovino durante o pastejo. A profundidade de atuação das hastes do escarificador, ficou restrita, portanto, até a camada 5-10 cm. A escarificação também aumentou a P_t e a M_a até os 10 cm, melhorando estes atributos em relação à área pastejada que não recebeu escarificação. Mas, em contrapartida, a escarificação diminuiu a M_i na camada de 0-5 cm, o que pode comprometer a retenção e armazenamento de água nesta camada. Kunz et al (2013) verificaram um efeito danoso da escarificação nas propriedades físico hídricas do solo. Já Kaiser et al (2009) verificaram que a mobilização do solo é interessante para melhorar a aeração do solo, diminuir a resistência a penetração e assim fornecendo melhores condições de crescimento para as plantas.

As modificações que os tratamentos provocaram na estrutura do solo também pode ser observada na **Figura 8**, que demonstra a distribuição e amplitude da micro e macroporosidade em relação a parte sólida no perfil de solo. Na área pastejada houve uma diminuição da amplitude da macroporosidade até os 10 cm. Já a escarificação demonstrou aumentar a amplitude da macroporosidade até os 15 cm. Percebe-se que em várias camadas do perfil do solo a macroporosidade se encontra abaixo de $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, que é o valor limitante de porosidade de aeração do solo (DREWRY; CAMERON; BUCHAN, 2008). Neste caso, quando a umidade do solo estiver alta as plantas podem sofrer por falta de oxigênio. Percebe-se que este efeito é mais intenso na área pastejada.

Na **Figura 8** também é possível verificar que a partir dos 10 cm de profundidade há uma diminuição da macroporosidade em todos os tratamentos. Isso reflete o histórico manejo da área, que consiste em integração soja com bovinos de leite a mais de 10 anos, com intenso tráfego de máquinas, o que compromete a estrutura do solo a partir dos 10 cm, principalmente quando é realizado sob alta umidade do solo. No tratamento escarificado, a amplitude da macroporosidade necessitou maiores profundidades para diminuir, visto o efeito das hastes do escarificador na mobilização do solo em superfície, o que também foi observado por Kaiser et al (2009) em experimento em área de plantio direto. Por aumentar a macroporosidade, a escarificação pode ter contribuído para a taxa de infiltração de água, visto que possui alta correlação com a condutividade hidráulica saturada do solo (RIBEIRO et al., 2006).

Figura 8: Estrutura e distribuição de poros no perfil do solo nos diferentes manejos. MAC: Macroporos; MIC: Microporos; SOL: Fração sólida. PAST: Área com pastejo. PAST+ESC: Pastejo seguido de escarificação; S.PAST: Área sem pastejo.



5.2 INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO PARA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE FÍSICA DO SOLO

Para determinação do IHO, o atributo físico que apresentou o maior coeficiente de variação (CV) foi a resistência a penetração (RP) (**Tabela 8**), visto que varia de acordo com a densidade (Ds) e umidade do solo (θ), os quais também apresentaram elevados valores de CV. Porém, a θ apresentou um valor mínimo de somente $0,23 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, o que pode gerar uma estimativa equivocada do IHO sob baixos conteúdos de água no solo. O modelo de resistência à penetração é representado pela equação 1.

$$RP = 0,0626 \times DS^{4,1146} \times \theta^{-2,5682} \quad (1)$$

$$R^2 = 0,76$$

A determinação da umidade volumétrica do solo para o limite de RP de 3 MPa, em cada nível de densidade (Equação 2), foi realizada pelo rearranjo da equação 1.

$$\theta_{RP} = (RP / (0,0626 DS^{4,1146}))^{1/2,5682} \quad (2)$$

Tabela 8: Variabilidade dos atributos físicos para modelagem da Resistência do solo à penetração.

Variável ⁽¹⁾	Média	Desvio padrão	Mínimo	Máximo	Coefficiente de variação (%)
RP (MPa)	2,95	1,79	0,49	11,47	60,91
Ds (Mg m ⁻³)	1,31	0,08	1,10	1,48	6,40
θ (m ³ m ⁻³)	0,37	0,07	0,23	0,58	20,95

⁽¹⁾RP: Resistência do solo à penetração; Ds: Densidade do solo; θ: Umidade volumétrica. n:120.

Para a modelagem da capacidade de campo, houve elevada variabilidade de Ds entre as amostras (**Tabela 9**). Porém apresentou um baixo coeficiente de determinação (R²). A equação 3 demonstra o modelo da θ_{CC}.

$$\theta_{cc} = 0,19802 + 0,16289 DS \quad (3)$$

$$R^2 = 0,61$$

Tabela 9: Variabilidade dos atributos físicos para modelagem da Capacidade de campo.

Variável ⁽¹⁾	Média	Desvio padrão	Mínimo	Máximo	Coefficiente de variação (%)
Ds (Mg m ⁻³)	1,32	0,17	0,92	1,56	13,20
θ (m ³ m ⁻³)	0,41	0,03	0,33	0,45	8,67

⁽¹⁾Ds: Densidade do solo; θ: Umidade volumétrica do solo.

Para a modelagem do ponto de murcha permanente, segue abaixo os valores de variabilidade das amostras (**Tabela 10**) e a equação com seu respectivo coeficiente de determinação (4):

$$\theta_{PMP} = 0,19826 DS \quad (4)$$

$$R^2 = 0,98$$

Tabela 10: Variabilidade dos atributos físicos para modelagem do ponto de murcha permanente.

Variável ⁽¹⁾	Média	Desvio padrão	Mínimo	Máximo	Coefficiente de variação (%)
Ds (Mg m ⁻³)	1,34	0,12	1,00	1,61	9,31
θ (m ³ m ⁻³)	0,26	0,02	0,20	0,32	9,30

⁽¹⁾Ds: Densidade do solo; θ: Umidade volumétrica do solo.

O IHO representa o intervalo de umidade no solo em que as limitações físicas para o crescimento das plantas são mínimas ou inexistentes (LETEY, 1985) e é representado pela área *hachurada* na **Figura 9**. Observa-se que há uma diminuição do IHO com o aumento da densidade do solo. No limite superior, até o valor de densidade de $1,35 \text{ Mg m}^{-3}$, o fator limitante foi a umidade na capacidade de campo (θ_{CC}), a partir de então a porosidade de aeração (θ_{PA}) tornou-se o fator limitante. Já no limite inferior, o fator que controlou em todos os níveis de densidade foi a Θ_{RP} .

No ponto em que o IHO é nulo, se obtém a densidade crítica do solo (DSc). Na **Figura 9** se observa que o valor de DSc é de $1,43 \text{ Mg m}^{-3}$. Este valor fica acima do proposto por Reichert, Reinert e Braida (2003), que foi de 1,3 a $1,4 \text{ Mg m}^{-3}$ para solos argilosos. Caso o valor de densidade encontrado no solo ser igual ou maior que DSc, são grandes as possibilidades de ocorrerem danos produtivos às culturas.

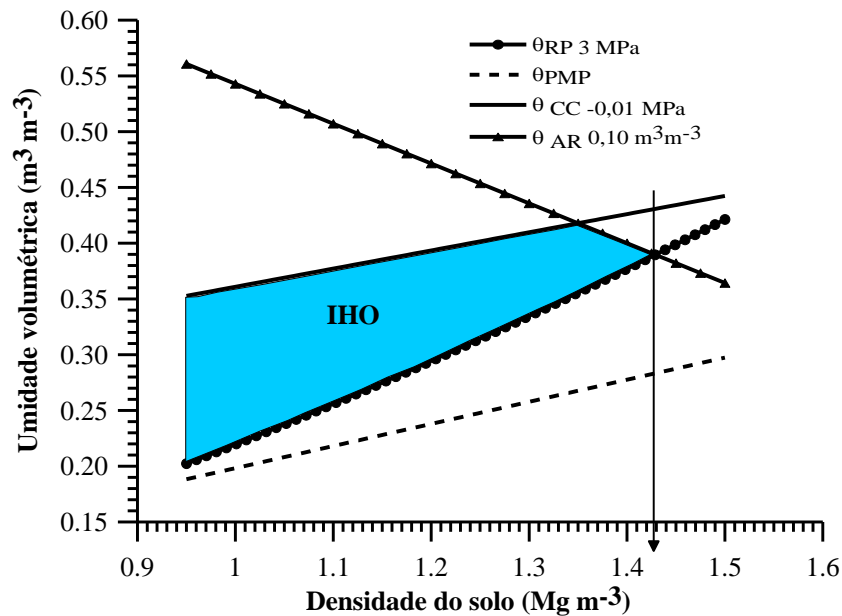
Na **Figura 9**, importante ressaltar que os valores de amplitude do IHO e de DSc deste trabalho correspondem a um valor limitante de 3 MPa de RP. De acordo com Kaiser et al (2009) a amplitude do IHO e valor de DSc estão diretamente relacionados com o valor de RP considerado como limitante. Em Latossolo Vermelho foi encontrado um valor de DSc pelo IHO de $1,49 \text{ Mg m}^{-3}$ utilizando 3 MPa como valor limitante da RP (Kaiser et al., 2009). No mesmo trabalho a θ_{PMP} foi o limite inferior em valores de densidade abaixo de $1,28 \text{ Mg m}^{-3}$, pois a partir disso a θ_{RP} passou a ser o fator limitante. Já no limite superior a θ_{CC} foi o fator limitante até a densidade de $1,32 \text{ Mg m}^{-3}$ e a partir disso a θ_{PA} . Costa (2014) avaliando o IHO em um SIPA, obteve um valor de DSc de $1,41 \text{ Mg m}^{-3}$, porém utilizando um valor crítico de 2 MPa de RP. Neste trabalho de Costa (2014), a θ_{RP} passou a ser o limite inferior a partir de densidade acima de $1,25 \text{ Mg m}^{-3}$, já no limite superior θ_{CC} foi o único fator restritivo.

Em estudo com diferentes formas de pastejo, Leão et al., 2004 também encontraram um valor de DSc de $1,43 \text{ Mg m}^{-3}$. O estudo foi realizado sob um Latossolo vermelho e o valor de RP adotado como crítico também foi de 3 MPa. Observaram que em valores de densidade menores que $1,15 \text{ Mg m}^{-3}$ o limite inferior foi a θ_{PMP} , já em valores de densidade acima de $1,15 \text{ Mg m}^{-3}$ foi a θ_{RP} . No mesmo trabalho, a θ_{PA} não influenciou.

A junção dos fatores físicos diretamente relacionados com a produção vegetal (**Figura 9**) concordam com o fato de a RP ser o fator que mais tende a influenciar as plantas (TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1998; KAISER et al., 2009). Porém, algo que chama a atenção na **Figura 9** é que o ponto de murcha permanente em nem um valor de densidade passa a ser o fator limitante no limite inferior, algo que é diferente nos trabalhos relatados acima.

Portanto, o conceito de AD neste trabalho, não é eficiente em nem um nível de densidade do solo. Porém, isso pode estar atrelado ao fato de não ter havido amostras com umidade abaixo de $0,23 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para criação da equação da RP.

Figura 9: Intervalo hídrico ótimo (IHO) do solo de acordo com a densidade e umidade do solo.



Neste trabalho foi criado os modelos de cada limite do IHO unificando todas as camadas avaliadas, já Moreira et al (2014) criaram os modelos para cada camada do solo, diferenciando 0-10, 10-20 e 20-30 cm de profundidade. Com isso observam que no limite superior a θ_{CC} é o fator limitante na maior parte dos valores de densidade e a θ_{PA} passa a ser a partir de densidades mais elevadas. Na camada 0-10 cm, a θ_{PA} passou a ser o limite superior a partir do valor de densidade de $1,42 \text{ Mg m}^{-3}$, na camada 10-20 a partir de $1,47 \text{ Mg m}^{-3}$ e na camada 20-30 a partir de $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$. No limite inferior a θ_{RP} foi o único fator limitante nas camadas 10-20 e 20-30 cm, já na camada 0-10, até o valor de densidade de $1,26 \text{ Mg m}^{-3}$, θ_{PMP} apareceu como fator limitante. Os valores de DSc neste trabalho de Moreira et al (2014) foram de $1,48 \text{ Mg m}^{-3}$ na camada 0-10, e $1,51 \text{ Mg m}^{-3}$ nas camadas 10-20 e 20-30. São valores de DSc acima do encontrado na **Figura 9**, sendo que foram adotados os mesmos valores de limites de RP e sob o mesmo tipo de solo.

Além da influência das diferentes camadas, os modelos do IHO podem sofrer influência dos diferentes tipos de manejo do solo (KLEIN & CAMARA, 2007). Estes autores encontraram resultados semelhantes aos dados da **Figura 9** ao avaliar o IHO em área de plantio direto e área

escarificada, pois utilizando valor crítico de RP de 3 MPa observaram que a θ_{RP} também foi o único fator limitante no limite inferior, já no limite superior a θ_{CC} foi o fator limitante até a densidade de $1,3 \text{ Mg m}^{-3}$ na área de plantio direto e $1,26 \text{ Mg m}^{-3}$ na área escarificada, pois a partir destes valores a Θ_{PA} passou a ser o fator limitante. A DSc obtida neste trabalho foi de $1,42 \text{ Mg m}^{-3}$ na área sob plantio direto e de $1,41 \text{ Mg m}^{-3}$ na área escarificada, o que corrobora com os dados da **Figura 9**.

Em Latossolos argilosos, que possuem estrutura granular, a compactação do solo reorganiza seu sistema poroso. Ocorre uma diminuição do diâmetro dos poros de maior tamanho no espaço entre-agregados e assim aumentando a capacidade de retenção de água no solo. Nestes solos, apenas com a determinação da AD, pode-se acabar realizando uma interpretação equivocada do efeito do manejo na estrutura do solo. O IHO, por ser altamente sensível às mudanças estruturais do solo, é um parâmetro mais aprimorado para avaliação das condições físicas do solo relacionadas à disponibilidade de água às plantas (SILVA et al., 2009).

5.2.1 Fator Capacidade das limitações impostas pelo IHO

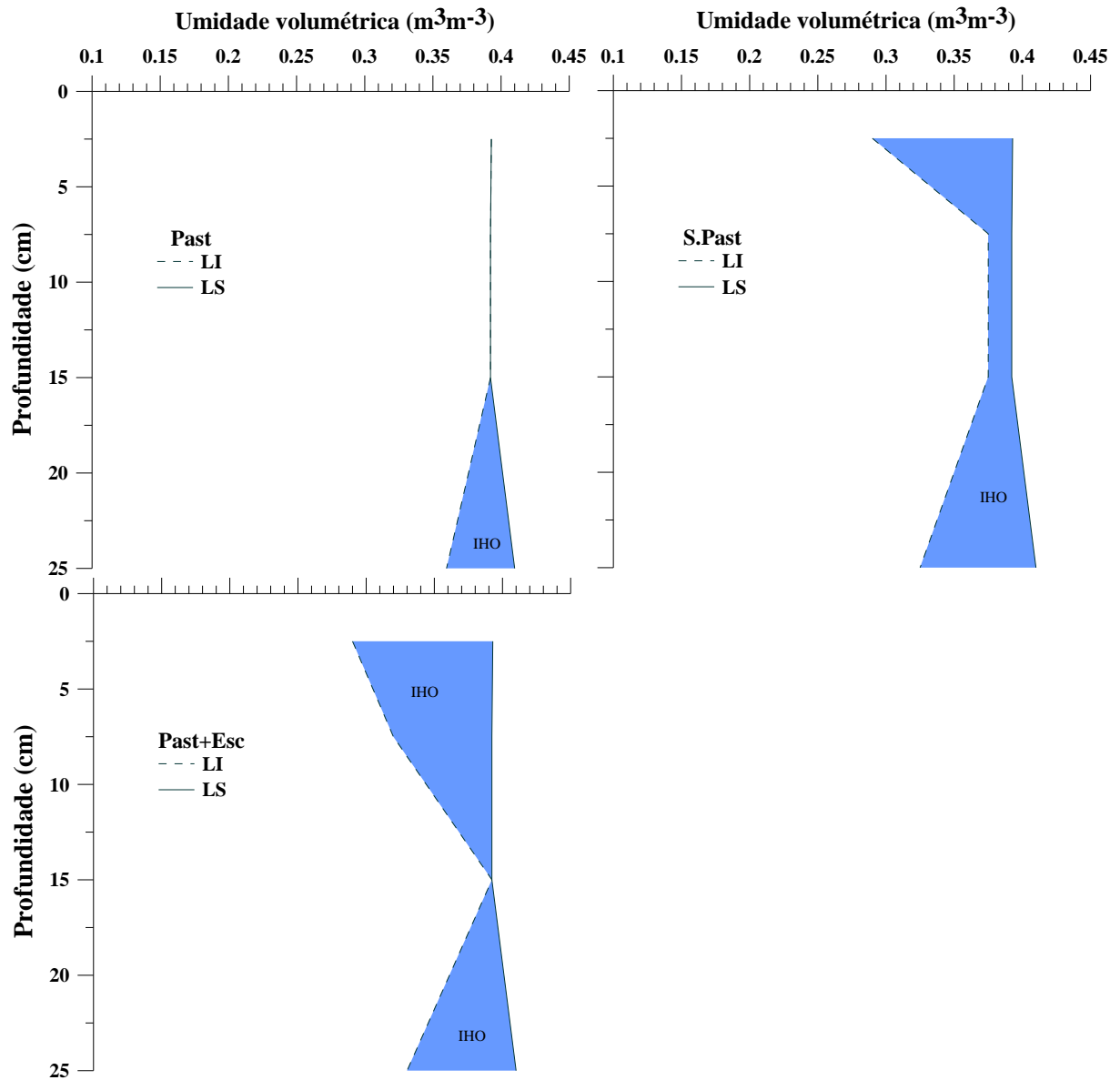
O fator capacidade das restrições físicas se refere ao potencial que o solo, sob determinadas condições, estabelece ao crescimento das plantas. Neste trabalho, o fator capacidade pode ser considerado a amplitude do IHO no perfil de solo. Tal amplitude é relacionada com o nível de densidade do solo. Quanto menor a amplitude do IHO, maior será o fator capacidade e maiores serão as chances de haver restrições físicas do solo às plantas.

Na área hachurada da **Figura 10** observa-se a variação da amplitude do IHO no perfil do solo em cada tratamento. A área pastejada apresenta IHO nulo até os 15 cm de profundidade e apenas a partir disso começa a aumentar a amplitude. Na área sem pastejo se observa uma maior amplitude do IHO na superfície do solo até os 7,5 cm, uma diminuição dos 7,5 cm até 15 cm e então novamente um aumento de amplitude. No tratamento S.PAST a amplitude do IHO a partir dos 15 cm é maior do que no tratamento PAST. Por meio disso se observa o efeito do maior nível de densidade no tratamento PAST, tanto em superfície como em subsuperfície.

Percebe-se que na área pastejada, pelo fato de o IHO ser nulo até os 15 cm, há grandes possibilidades de haver restrição ao desenvolvimento das plantas. Nestas condições, os bioporos podem ser caminhos alternativos para o crescimento de raízes (SILVA et al., 2016). Estes grandes poros são uma subdivisão da macroporosidade do solo, a qual se mostrou baixa em todo o perfil do solo na área pastejada. Porém apenas com as amostras deformadas coletadas

não é possível quantificar com exatidão a quantidade de bioporos, visto que não se distribuem de forma homogênea e ser requerido anéis com maior volume para serem quantificados.

Figura 10: Amplitude do intervalo hídrico ótimo no perfil do solo. PAST: Área com pastejo. PAST+ESC: Pestejo seguido de escarificação; S.PAST: Área sem pastejo. LI: Limite inferior; LS: Limite Superior.



Na **Figura 10**, também se percebe o efeito do histórico manejo da área, afetando a estrutura do solo entre os 7,5 e 15 cm, pela diminuição da amplitude do IHO, o que é bastante comum em áreas de plantio direto. Na área sem pastejo, juntamente com a maior amplitude do IHO, há uma maior amplitude da macroporosidade quando comparado ao tratamento PAST, assim fornecendo melhores condições para o desenvolvimento vegetal.

Pela **Figura 10** percebe-se que a escarificação do solo foi eficiente para aumentar a amplitude do IHO até os 15 cm de profundidade da área pastejada. Porém o efeito da escarificação ficou restrita à superfície do solo, visto que nos 15 cm de profundidade o IHO ficou nulo. Abaixo dos 15 cm nota-se novamente um aumento da amplitude do IHO no PAST+ESC. Concomitante com o efeito da maior amplitude do IHO, também se observa uma maior presença de macroporos até os 15 cm na área escarificada, como já abordado. A escarificação, portanto, mostrou criar condições físico hídricas mais favoráveis ao desenvolvimento das plantas, como também observado por Camara (2004) e Klein e Camara (2007). Já Kaiser et al (2009) não encontraram efeito da escarificação na amplitude do IHO, porém isso foi atribuído à dificuldade de realização de coletas em áreas de solo mobilizado, o que induz a coleta em locais pouco alterados. Neste mesmo trabalho, os autores observaram que a compactação adicional no plantio direto diminuiu a amplitude do IHO na camada de 5-15 cm, o que é atribuído à distribuição de cargas da pressão de rodados nesta camada.

5.2.2 Fator intensidade

O fator intensidade das limitações físicas do solo, se refere ao quanto o fator capacidade pode gerar impactos nas plantas ao longo do tempo, diante dos ciclos de umedecimento e secagem do solo, visto que a umidade controla os fatores físicos. Diante disso é necessário o monitoramento da umidade do solo durante o ciclo das culturas. O IHO associado à variação temporal da umidade do solo é um parâmetro ideal para monitoramento das restrições físicas do solo (BENGHOUGH et al., 2006). Quanto maior for o número de dias que a umidade do solo permanecer fora do IHO, maiores serão as chances de haver danos produtivos às plantas pelas restrições físicas do solo (SILVA et al., 2009). Além disso, a fase do ciclo da cultura em que a umidade permanecer fora do IHO também é fator determinante (KAISER, 2010). Cultivares precoces são mais suscetíveis ao fator intensidade e as diferentes espécies podem responder de forma diferenciada aos fatores físicos do solo.

Nas figuras (**Figura 11**; **Figura 12**; **Figura 13**), segue a umidade volumétrica do solo em cada tratamento durante o ciclo da cultura da soja. Percebe-se que a umidade na camada 0-10 cm permaneceu estatisticamente menor no tratamento PAST+ESC em vários pontos. Este efeito se deve à diminuição da M_i nesta camada superficial de solo, oriunda da mobilização do solo pelas hastes escarificadoras. Já nas camadas subsuperficiais, por não haver efeito da escarificação, não houve influência na retenção de água, exceto aos 10 dias após semeadura (DAS) na camada 10-20 cm. Aos 64 DAS a umidade ficou menor no PAST em comparação ao

S.PAST. Machado et al (2016) também verificaram que a escarificação antes da semeadura da soja, pela diminuição da Mi na superfície do solo, diminuiu o armazenamento de água no solo. Kaiser (2010), observou que a escarificação do solo não aumentou a retenção e disponibilidade de água às plantas.

A retenção de água no solo pode ser explicada pelos fenômenos de capilaridade e de adsorção, regulados pela tensão superficial da água e sua natureza dipolar (LIBARDI, 2016). Cria-se um filme de água ao redor das partículas, onde a força de adsorção diminui com a distância. Quanto menor o tamanho de partículas maior é a área superficial específica (ASE) da matriz do solo, assim aumentando o fenômeno de adsorção. Com o adensamento do solo, por a matriz ocupar uma maior proporção do volume de solo, pode haver um aumento na retenção de água no solo. No tratamento S.PAST, mesmo com um valor médio de densidade das camadas 0-5 e 5-10 menor que no tratamento PAST+ESC, apresentou nos primeiros dias de avaliação, uma maior retenção de água que PAST+ESC. As diferenças foram encontradas aos 10 e 13 DAS na camada 0-10 e aos 10 DAS na camada 10-20. Este efeito pode ser oriundo da maior quantidade de material vegetal na superfície do solo no tratamento S.PAST, visto que não recebeu pastejo, assim a Palhada pode ter diminuído a evaporação de água do solo (FREITAS et al.,2006). No decorrer do desenvolvimento da cultura, tal material orgânico foi sendo decomposto e não interferindo mais na retenção de água. Por meio disso, cabe ressaltar que a manutenção de cobertura vegetal na superfície do solo pode ser uma estratégia para manter a umidade do solo por mais tempo dentro do IHO (SILVA et al., 2009).

No tratamento PAST, pelo fato de o IHO ser nulo até os 15 cm, o limite inferior (LI) aparece acima do limite superior (LS) nas camadas 0-10 e 10-20 cm. Nesta condição, as restrições físicas associadas ao crescimento das plantas permaneceram acentuadas durante todo o ciclo da cultura. Já a partir dos 15 cm de profundidade, por haver um aumento da amplitude do IHO, o LI do tratamento PAST aparece abaixo do LS e com isso a umidade do solo durante o ciclo da cultura, na camada 20-30, permaneceu em grande parte dentro do IHO.

No tratamento S.PAST, na camada 0-10 cm, nota-se que a umidade permaneceu abaixo do LS durante todo o ciclo da soja, porém também abaixo do LI em uma grande parte do ciclo. Então a umidade passou por ciclos de permanência e saída do IHO nesta camada. Já na camada 10-20 cm, pelo IHO já ter menor amplitude, a umidade permaneceu fora do IHO na maior parte do ciclo da soja. E na camada 20-30 cm, a umidade ficou dentro do IHO em praticamente todos os pontos.

Figura 11: Variação da umidade volumétrica do solo ao longo do ciclo da cultura da soja na camada 0-10 cm e limite superior (LS) e limite inferior (LI) do intervalo hídrico ótimo (IHO). PAST: Área com pastejo. PAST+ESC: Pastejo seguido de escarificação; S.PAST: Área sem pastejo. *: Significativo ao teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro; ns: Não significativo.

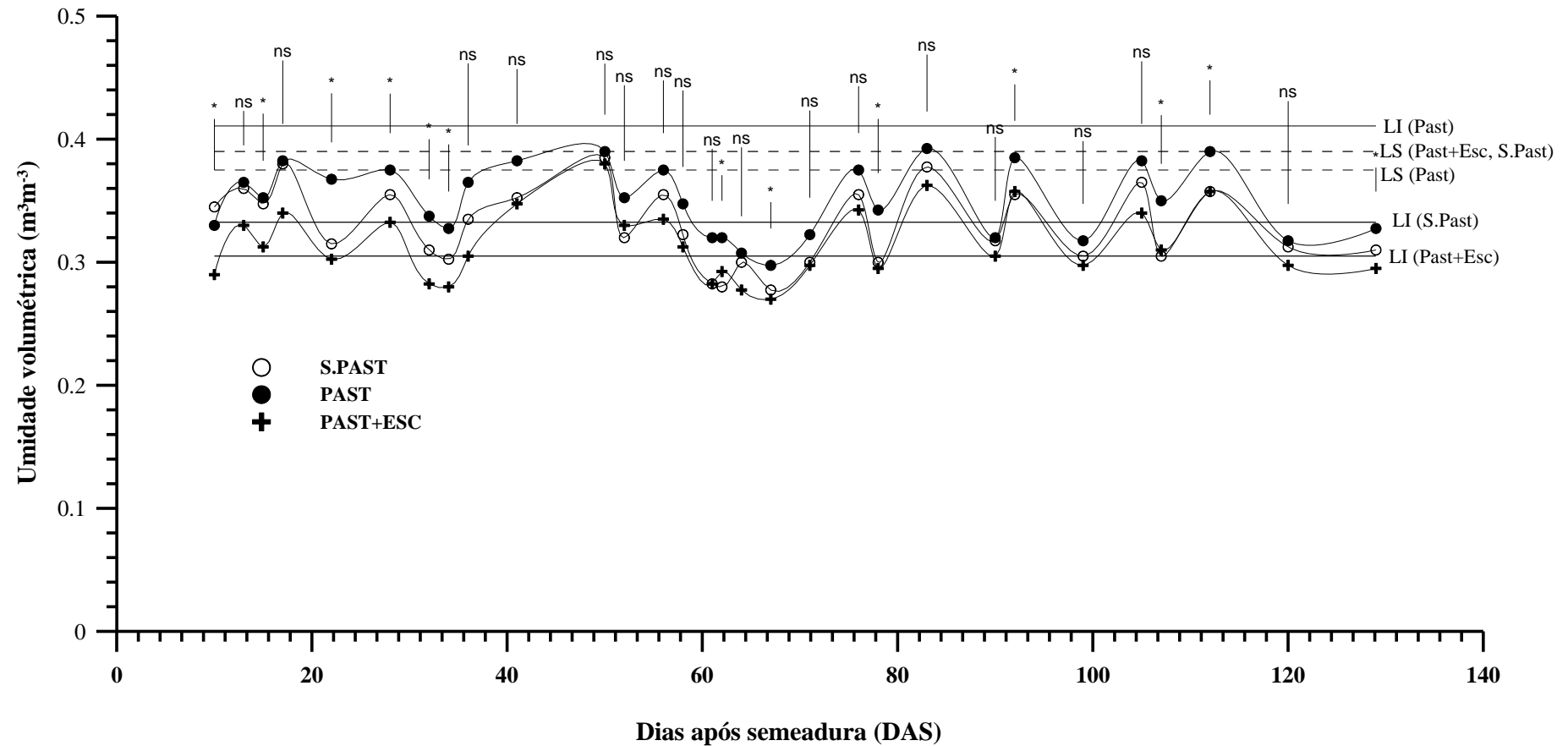


Figura 12: Variação da umidade volumétrica do solo ao longo do ciclo da cultura da soja na camada 10-20 cm e limite superior (LS) e limite inferior (LI) do intervalo hídrico ótimo (IHO). PAST: Área com pastejo. PAST+ESC: Pastejo seguido de escarificação; S.PAST: Área sem pastejo. *: Significativo ao teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro; ns: Não significativo.

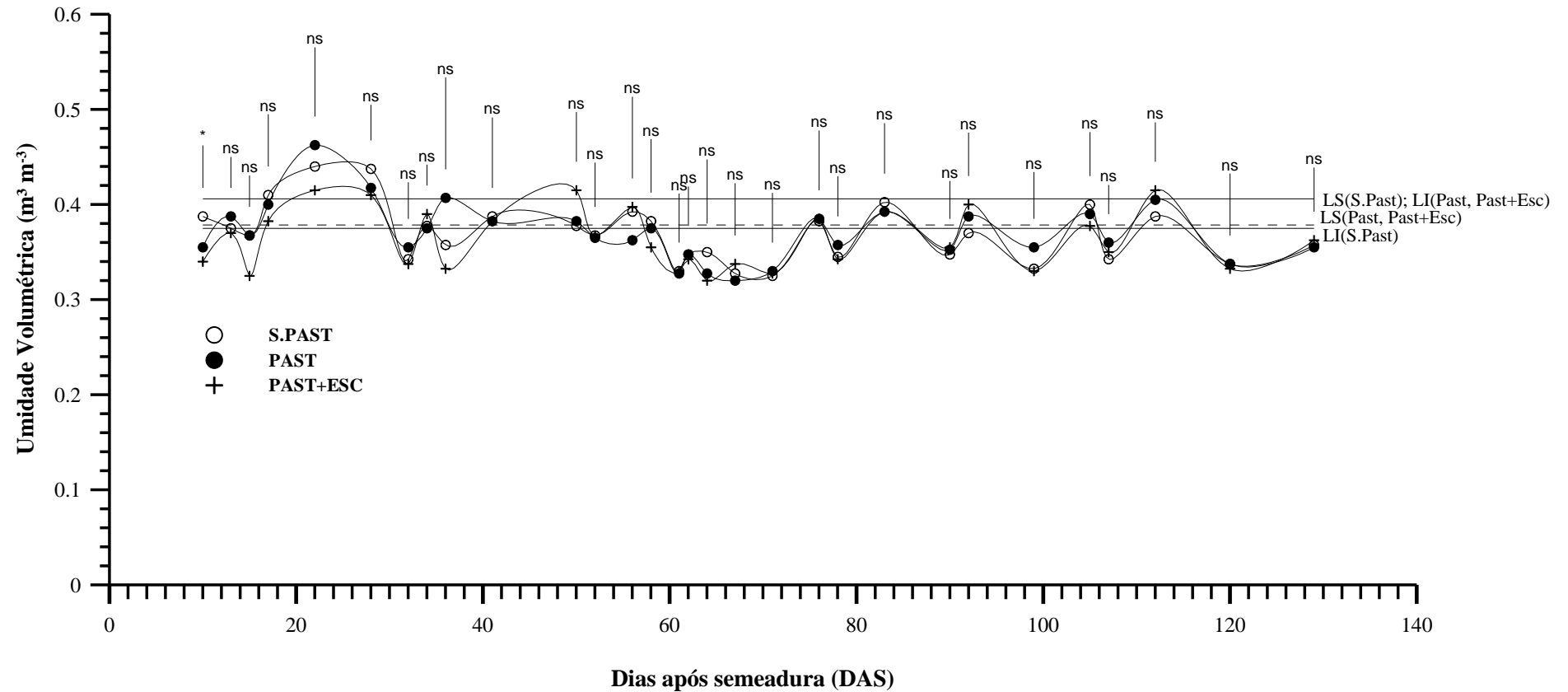
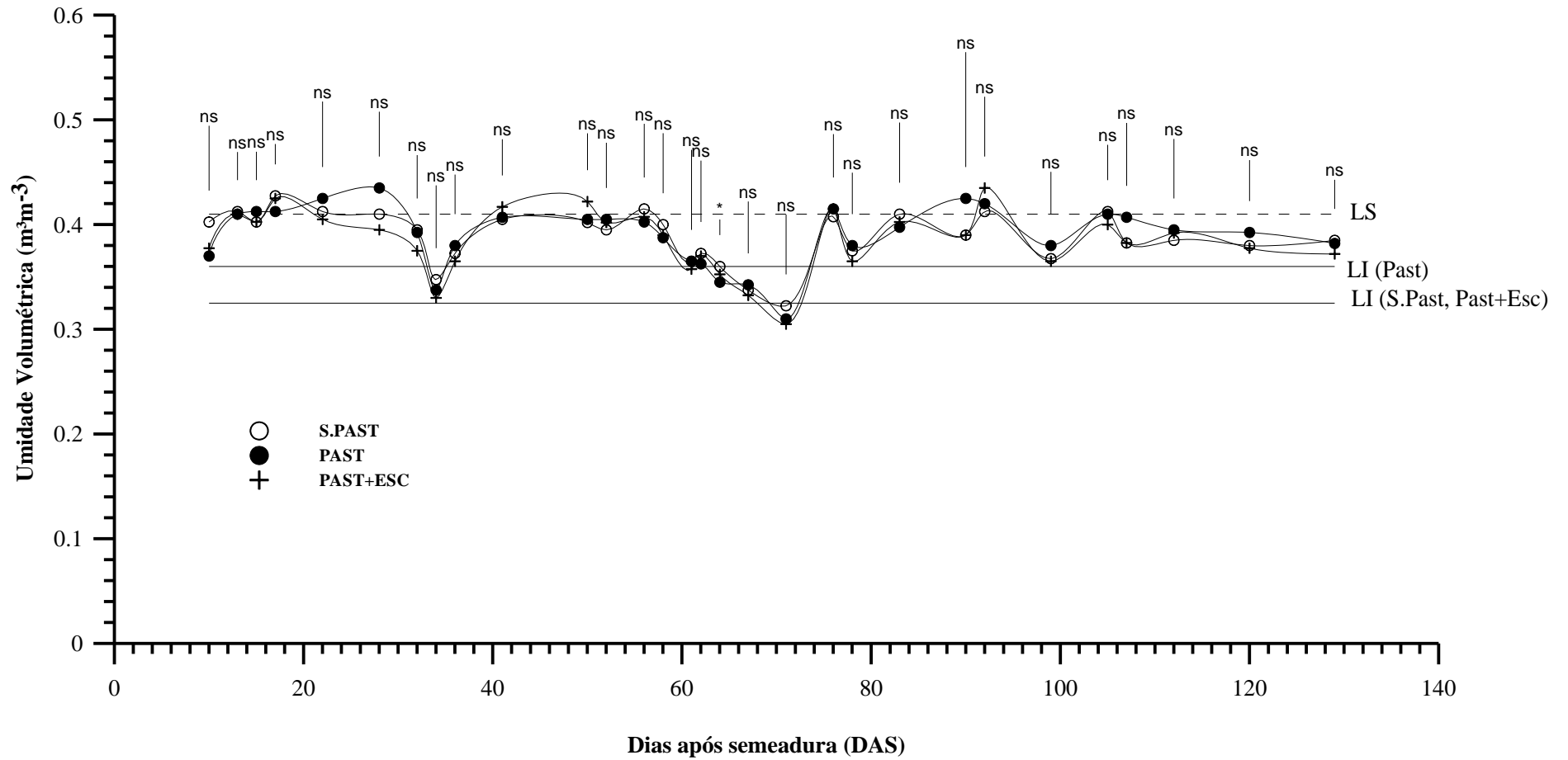
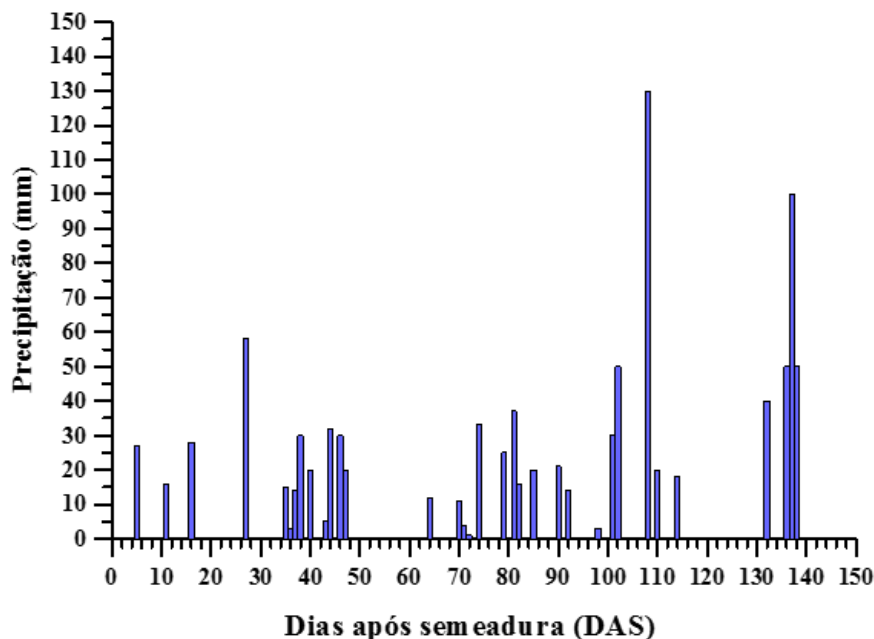


Figura 13: Variação da umidade volumétrica do solo ao longo do ciclo da cultura da soja na camada 20-30 cm e limite superior (LS) e limite inferior (LI) do intervalo hídrico ótimo (IHO). PAST: Área com pastejo. PAST+ESC: Pastejo seguido de escarificação; S.PAST: Área sem pastejo. *: Significativo ao teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro; ns: Não significativo.



Como já abordado, a escarificação do solo diminuiu a retenção de água no solo, principalmente da camada 0-10 cm. Porém, observa-se que com o aumento da amplitude do IHO, a umidade do solo no tratamento escarificado permaneceu dentro do IHO por mais tempo que PAST na camada 0-10 cm. Este efeito também foi observado por Klein e Camara (2007). Na camada 10-20 cm, com IHO = 0 no tratamento escarificado, houve limitações físicas do solo às plantas durante todo o ciclo da cultura da soja. Já na camada 20-30 cm, a umidade se manteve dentro do IHO na maioria dos pontos, ficando abaixo do LI apenas aos 71 DAS, e acima do LS aos 17 DAS, dos 41 aos 50 DAS, 76 e 92 DAS. Nota-se que na camada 20-30 cm, em todos os tratamentos, a umidade se manteve mais elevada em com menor variação, como também observado por Kaiser (2010), por em profundidade haver menor perda de água por evaporação e absorção pelas plantas. A manutenção da elevada umidade do solo durante grande parte do ciclo da soja está atrelada à quantidade e distribuição favoráveis de chuvas (*Figura 14*).

Figura 14: Índices pluviométricos observados durante o ciclo da cultura da soja de acordo com os dias após semeadura (DAS), 2016.



Estudando o IHO em três experimentos e relacionando com a cultura do feijão (COLARES et al., 2006), observaram que no plantio direto com compactação adicional, a umidade do solo permaneceu fora do IHO na maior parte do ciclo da cultura. A escarificação foi eficiente para ampliar o IHO, porém induziu uma maior variação da umidade durante o ciclo da cultura do feijão. Em um dos experimentos, o plantio direto foi o que apresentou o maior

IHO e nos demais foi o tratamento escarificado. Em todos os experimentos a RP foi o fator mais limitante para o crescimento radicular das plantas.

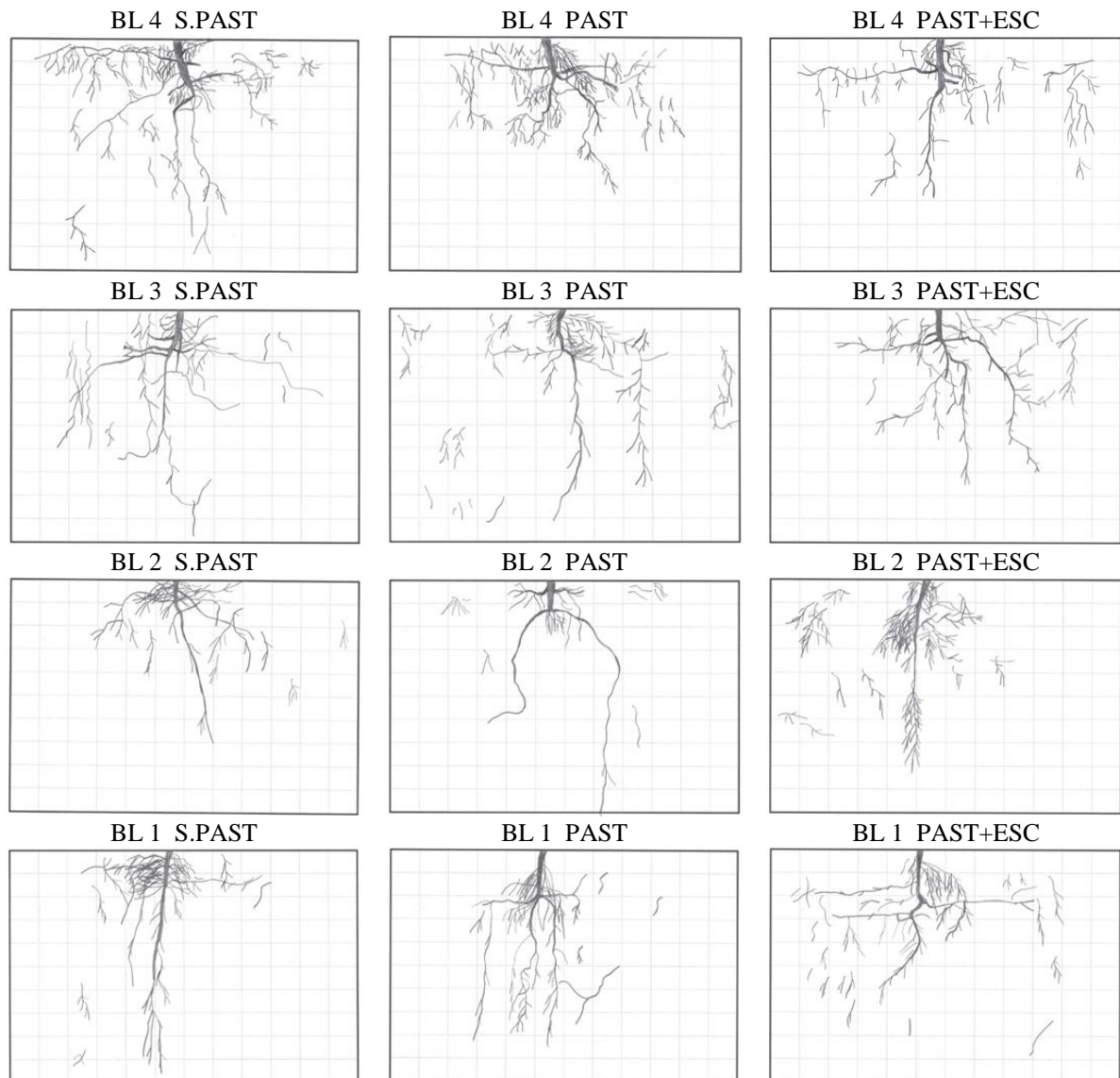
5.3 FATOR CAPACIDADE X INTENSIDADE E RESPOSTA DA CULTURA DA SOJA

É a interação entre os fatores capacidade e intensidade que realmente influencia as plantas. A avaliação da distribuição radicular das plantas, mesmo sendo uma avaliação qualitativa, é uma ferramenta interessante para ser relacionada com indicadores da qualidade física do solo como também para observar camadas com impedimento mecânico. Além disso a resposta em termos de produtividade das culturas também é um fator importante, assim entendendo a resposta das plantas às interações dos fatores físicos do solo.

Na **Figura 15** observa-se que não houve grandes diferenças entre os tratamentos no que se refere a distribuição de raízes da soja no perfil de solo. As raízes conseguiram explorar um bom volume de solo em todas as parcelas. Nos blocos 3 e 4 se observa uma maior quantidade de raízes laterais. A umidade do solo que permaneceu crítica durante todo o ciclo da soja na camada 0-10 e 10-20 cm no tratamento PAST e em alguns pontos da camada 20-30, não comprometeu a distribuição de raízes da cultura.

A diminuição do IHO no perfil e a permanência da umidade do solo fora do IHO no tratamento pastejado não afetou a distribuição de raízes. Já Kaiser et al (2009) verificaram que o plantio direto com compactação adicional diminuiu a amplitude do IHO e prejudicou a distribuição de raízes do feijoeiro em profundidade. Estes autores também observaram que nos tratamentos escarificado e plantio direto as plantas exploraram um bom volume de solo e nas camadas em que o IHO foi nulo, adotando limite de RP de 3 MPa, as raízes não cresceram. Collares et al (2006) verificaram que a escarificação foi eficiente para melhorar a distribuição radicular da cultura da soja no perfil de solo, já o plantio direto compactado foi restritivo. Kaiser (2010) observou que as raízes de milho tiveram seu crescimento restringido no plantio direto compactado onde o IHO teve baixa amplitude no perfil do solo. Nos tratamentos escarificado e subsolado houve uma maior distribuição de raízes, o que se correlacionou com maior amplitude do IHO, principalmente no tratamento com subsolagem.

Figura 15: Distribuição das raízes de soja no perfil de solo. PAST: Área com pastejo; PAST+ESC: Pastejo seguido de escarificação; S.PAST: Área sem pastejo.



Além de não haver efeito do manejo na distribuição de raízes da soja, a produtividade da cultura também não foi influenciada (**Tabela 11**), assim a diminuição do IHO não afetou a cultura da soja. Klein e Camara (2007) também verificaram que o desenvolvimento e produtividade da cultura da soja não foram influenciados pela diminuição do IHO em ano chuvoso, visto que em anos com abundância de chuvas, as limitações físicas do solo às plantas são amenizadas e pode não haver danos produtivos (REICHERT et al., 2009; RAUBER et al., 2016).

Tabela 11: Produtividade e peso de mil grãos (PMG) da cultura da soja. PAST: Área com pastejo. PAST+ESC: Pastejo seguido de escarificação; S.PAST: Área sem pastejo.

Tratamento	Produtividade (Mg ha ⁻¹)	PMG (g)
S.PAST	3,7 ns*	153,9 ns*
PAST+ESC	3,5	163,4
PAST	4,2	154,6
CV (%)	13,92	5,05

*Não significativo ao teste de Tukey a 5 % de probabilidade de erro.

A escarificação do solo na área pastejada se mostrou desnecessária, visto que não aumentou a distribuição de raízes e produtividade da soja em comparação ao PAST. Isto pode estar atrelado às condições favoráveis de chuva durante o ciclo da soja, que não comprometeram os processos físicos do solo, como também observado por Camara (2004).

As plantas mostraram ter capacidade de se desenvolver sob IHO nulo, o que provavelmente está atrelado à variabilidade espacial deste indicador físico (KLEIN et al., 2016). Além disso, há uma variação temporal da densidade do solo pela sua capacidade de resiliência através dos ciclos de umedecimento e secagem (BAVOSO et al., 2012) e elasticidade, visto que as deformações ocasionadas pelos bovinos no solo podem ter sido elásticas. Assim, a densidade do solo principalmente na camada mais superficial do tratamento PAST pode ter diminuído durante o ciclo da soja e ampliado o IHO. Também, a resistência à penetração (RP) avaliada pelo equipamento penetrômetro pode não ter sido a mesma “sentida” pelas plantas, visto que é utilizada uma haste não moldável para avaliação. O solo também possui uma elevada variabilidade espacial da RP (CANCIAN, 2015), a qual pode ter sido aproveitada pelas plantas, modulando seu sistema radicular e crescendo em regiões de menor impedimento mecânico. Outro fator, é que as plantas possuem a capacidade de produzir substâncias mucilaginosas que facilitam o crescimento das raízes (BENGOUGH; KIRBY, 1999). O uso de hastes sulcadoras no momento da semeadura da soja também pode ter colaborado, rompendo camadas compactadas e mitigando problemas físicos do solo (NUNES et al., 2014).

Sob alta umidade, as células da coifa da raiz possuem maior pressão hidrostática, pelo maior turgor celular, assim facilitando o crescimento em camadas mais impeditivas (BENGOUGH et al., 2011). Este fator pode ter sido beneficiado, visto que a umidade do solo permaneceu relativamente alta durante todo o ciclo da cultura da soja. As raízes também podem

ter se aproveitado de bioporos para crescerem até camadas mais profundas (COLLARES et al., 2006; SILVA et al., 2016). Em áreas de pastejo, onde há deposição de fezes bovinas e consequente atuação de besouros coprófagos, há um aumento de bioporos contínuos no solo (ADAMS; RAUBER; KAISER, 2016), assim valores de RP considerados impeditivos podem não afetar o crescimento de raízes no solo.

Ainda, o que cabe discutir é que as mudanças abruptas dos limites do IHO e adoção de um valor fixo limitante de aeração são criticados na literatura sobre o tema (GUBIANI; REICHERT; REINERT, 2012; GUBIANI et al., 2013; VAN LIER & GUBIANI, 2015). A questão é que não são consideradas as condições transitórias de limitações físicas no solo e sim um limite entre “a vida e a morte” das plantas, como também que o sistema radicular das plantas pode ter diferentes valores limitantes de aeração de acordo com a profundidade. O que também é discutido é que deveria ser utilizado o ponto de murcha fisiológico, conseguir diferenciar o efeito mecânico do efeito de deficiência hídrica sob baixos conteúdos de água e também serem utilizadas propriedades térmicas e de fluxo de água no solo para aprimoramento do IHO (VAN LIER & GUBIANI, 2015).

O fato de neste estudo as restrições físicas do solo não terem sido suficientes para afetar a cultura da soja, também mostra que o sistema por ser altamente complexo pode ter absorvido as restrições avaliadas neste estudo, visto que a física do solo é apenas uma parte da totalidade de um SIPA, como também observado e discutido por Ambus (2016). Assim, os benefícios podem ter sido maiores que os danos, resultando em um “balanço final” não restritivo para a cultura da soja.

6 CONCLUSÕES

- 1- O pisoteio animal elevou o nível de densidade do solo e diminuiu a amplitude do IHO e a porosidade de aeração na superfície do solo em comparação à área sem pastejo.
- 2- A densidade do solo crítica (DSc) estabelecida pelo IHO foi de $1,43 \text{ Mg m}^{-3}$. O tratamento pastejado apresentou níveis de densidade acima da DSc até os 15 cm de profundidade, o pastejo seguido de escarificação apenas aos 15 cm e o tratamento que não recebeu pastejo manteve a densidade abaixo da DSc em todo o perfil de solo avaliado.
- 3- A escarificação na área pastejada se mostrou eficiente para diminuir a densidade do solo, melhorar a porosidade de aeração e ampliar o IHO nas camadas mais superficiais, assim aumentando o tempo de permanência da umidade do solo dentro do IHO na camada 0-10 cm. Porém se mostrou desnecessária, visto que não aumentou a distribuição de raízes e a produtividade da soja em ano chuvoso;
- 4- O IHO se mostrou eficiente para demonstrar o efeito dos diferentes manejos na estrutura do solo, porém, em ano com abundância de chuvas, não se correlacionou com a distribuição de raízes e produtividade da cultura da soja;
- 5- A distribuição de raízes e produtividade da soja não foram influenciados. Assim, o sistema por ser altamente complexo, mostrou capacidade de absorver as restrições avaliadas neste estudo.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O IHO, por não ter se correlacionado com a distribuição de raízes e produtividade da cultura da soja não pode ser menosprezado como indicador da qualidade física do solo, pois no solo existe uma elevada variabilidade espacial de estrutura, além de as plantas terem mecanismos “anti-stress”. A correlação do IHO com o crescimento e desenvolvimento das plantas também parece estar atrelada às condições de chuvas durante o ciclo das culturas, visto que em anos chuvosos quando a disponibilidade de água no solo é alta, a correlação é baixa.

Logicamente, a junção de modelos matemáticos de alguns fatores de restrição não representa o sistema como um todo, porém o uso de indicadores da qualidade física do solo como o IHO, deve ser vista como colaborativa para avaliação do sistema. E sob este ponto de vista, o IHO já é um avanço visto que representa a interação de fatores. Mais estudos precisam ser realizados com este indicador, buscando aprimora-lo com inclusão de mais fatores de restrição, como a permeabilidade do solo ao ar e propriedades térmicas e de fluxo de água no solo.

REFERÊNCIAS

- AARONS, S. R.; CONNOR, A.R.O; GOURLEY, C.J.P. **Dung decomposition in temperate dairy pastures I. Changes in soil chemical properties.** Australian Journal of Soil Research, v.42, p 107-114, fev. 2004.
- ADAMS, G. A.; RAUBER, L. R.; Kaiser, D. R. O papel dos besouros coprófagos na melhoria das condições físicas do solo em pastagens. In: VI JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA. **Anais.** Out. 2016. UFFS, Chapecó.
- AMBUS, J. V. **Condições físicas e mecânicas de um Latossolo em sistema integrado de produção agropecuária.** 2016. 57 f. Dissertação (Mestrado em ciência do solo). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.
- ANDRADE COSTA, S. E. V. G. de. **Intervalo Hídrico ótimo do solo e estado hídrico das plantas em sistema integrado de produção agropecuária no subtropical brasileiro.** 2014. 225 f. Tese (Doutorado em ciência do solo). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de pós graduação em ciência do solo, Porto Alegre, 2014.
- ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. F.; COSTA S. E. V. G. A. Abordagem sistêmica do solo em sistemas integrados de produção agrícola e pecuária no subtropical brasileiro. In: ARAÚJO, A. P.; AVELAR, B. J. R. **Tópicos em ciência do solo.** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013.v.8, p.325-380.
- ASSMAN, A. L. **Adubação nitrogenada de forrageiras de estação fria em presença e ausência de trevo branco, na produção da pastagem e animal em área de integração lavoura- pecuária.** 2002. 100f. Tese (Doutorado em Agronomia -Produção Vegetal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.
- BALBINOT JUNIOR, A.A. et al. Desempenho da cultura do feijão após diferentes formas de uso do solo no inverno. **Ciência Rural.** 30:2340-2346, Nov. 2009.
- BAVOSO, M. A. et al. Resiliência física de dois Latossolos vermelhos sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, v. 36, n. 6, p. 1892-1904, 2012.
- BENGOUGH, A.G.; KIRBY, J.M. Tribology of the root cap in maize (*Zea mays*) and peas (*Pisum sativum*). **New Phytology,** v. 142, p.421-425, Fev. 1999.
- BENGOUGH, A.G. et al. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: A review of limiting stresses and beneficial root tip traits. **Journal of Experimental Botany,** 62:59-68, Jan. 2011.
- BENGOUGH, A.G.; MULLINS, C.E. Penetrometer resistance, root penetration resistance and root elongation rate in two sandy loam soils. **Plant and Soil,** v. 131, p.59-66, Fevereiro, 1991.
- BENGOUGH, A.G. et al. Root responses to soil physical conditions: Grow dynamics from field to cell. **Journal of Experimental Botany,** 57:437-443, Jan. 2006.

- BRAIDA, J. A. et al. Elasticidade do solo em função da umidade e do teor de carbono orgânico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.477-485, Viçosa Març./Abr. 2008.
- BRUM, A. L. et al. A economia mundial da soja: impactos na cadeia produtiva da oleaginosa no Rio Grande do Sul 1970-2000. In: XLIII Congresso da Sober em Ribeirão Preto. **Anais dos Congressos**. São Paulo, 2005.
- BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**. 33:519-524, 1990.
- CAMARA, R. K. **Influência da escarificação do solo sob sistema plantio direto nas propriedades do solo e na cultura da soja**. 2004, 96f. Dissertação (Mestre em Agronomia). Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da UPF. Passo Fundo, 2004.
- CAMARA, R. K.; KLEIN, V. A. Propriedades físico-hídricas do solo sob plantio direto escarificado e rendimento da soja. **Ciência Rural**, v.35, p.813-819, Santa Maria, jul./Ago. 2005.
- CANCIAN, L. C. **Variabilidade especial da resistência a penetração, granulometria e umidade do solo**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Frederico Wesphalen, 2015.
- CARVALHO, P. C. F. Definições e terminologias para sistema integrado de produção agropecuária. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 45, n. 5 (Especial), p. 1040-1046, Fortaleza, 2014.
- CARVALHO, P. C. F. et al. Integração soja-bovinos de corte no Sul do Brasil. **Boletim Técnico**. 60 pg. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.
- CAVALIERI, K. M. V. et al. Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30:137-147, Viçosa, Jan./Fev. 2006.
- CLARK, L.J; WHALLEY, W.R & BARRACLOUGH, P.B. How do roots penetrate strong soil ? **Plant and Soil**, v.255, p. 93-104, Ago. 2003.
- COLLARES, G. L. et al. Compactação superficial de Latossolos sob integração lavoura – pecuária de leite no noroeste do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.41, n.2, p.246-250, fev. 2011.
- CORREA, J. C.; REICHARDT, K. Efeito do tempo de uso das pastagens sobre as propriedades de um Latossolo Amarelo da Amazônia Central. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 30:107-114, Jan. 1995.
- 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. **Australian Journal of Soil Research**, v.46, p.237- 256, Jan. 2008.

- DUTTMANN, R.; SCHWANEBECK, M.; NOLDE, M.; HORN, R. Predicting Soil Compaction Risks Related to Field Traffic during Silage Maize Harvest. **Soil Science Society American Journal**, v. 78, p.408–421, abr. 2014.
- EMPBRAPA. Manual de métodos de análise de solo. 2º ed. Revisada. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 2011.
- FIDALSKI, J.; TORMENA, C. A.; ALVES, S. J. Intervalo Hídrico ótimo de um Latossolo vermelho distrófico, após o primeiro período de pastejo contínuo de brachiaria ruziziensis, em sistema integração lavoura-pecuária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 37:775-783, 2013.
- FREDDI, O. S. et al. Compactação do solo no crescimento radicular e produtividade da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 31:627-636, 2007.
- FREITAS, P. S. L. et al. Influência da cobertura de resíduos de culturas nas fases de evaporação direta da água do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.10, n.1, p.104–111, 2006.
- GAGGERO, M. R. **Alterações das propriedades físicas e mecânicas do solo sob sistemas de preparo e pastejo**. 1998. 125 p. Dissertação (Mestre em Ciência do Solo). Universidade Federal do Rio Grande do Sul Porto Alegre, 1998.
- GIRARDELLO, V. C. et al. Resistência a penetração, eficiência de escarificadores mecânicos e produtividade da soja em Latossolo argiloso manejado sob plantio direto de longa duração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 38:1234-1244, 2014.
- GREGORY, A. S. et al. The effect of long-term soil management on the physical and biological resilience of a range of arable and grassland soils in England. **Geoderma**, 153:172-185, out. 2009.
- GUBIANI, P. I.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Indicadores hídricos-mecânicos de compactação do solo e crescimento de plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 37:1-10, Dez. 2012.
- GUBIANI, P. I. et al. Crescimento e produção de milho associados com o intervalo hídrico ótimo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 37:1502-1511, Jan. 2013.
- HAMZA, M.A., ANDERSON, W.K. Soil compaction in cropping systems. A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil and Tillage Research**. v.82, p.121–145, Jun. 2005.
- KAISER, D. R. **Estrutura e água em Argissolo sob distintos preparos na cultura do milho**. 2010. 150f. Tese (Doutor em Ciência do Solo). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.
- KAISER, D. R. et al. Intervalo hídrico ótimo no perfil explorado pelas raízes de feijoeiro em um latossolo sob diferentes níveis de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.845-855, 2008.

- KLEIN, V. A. et al. Variabilidade espacial do intervalo hídrico ótimo de solo cultivados em Sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.51, n.11, p.1890-1898, Nov. 2016.
- KLEIN, V. A. **Física do solo**. Passo Fundo: Ediupf, 2008.
- KLEIN, V. A.; CAMARA, R. K. Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em Latossolo Vermelho sob plantio direto e escarificado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 31:221-227, 2007.
- KUNZ, M. et al. Compactação do solo na integração soja-pecuária de leite em Latossolo argiloso com semeadura direta e escarificação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 37:1699-1708, 2013.
- LANZANOVA, M. E. et al. Atributos físicos do solo em sistema de integração lavoura-pecuária sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** v. 31, p. 1131-1140, 2007
- LAPEN, D.R. et al. Least limiting water range indicators of soil quality and corn production, eastern Ontario, Canada. **Soil and Tillage**. Research. 78, p.151-170, Ago. 2004.
- LEÃO, T. P. et al. Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.3, p.415-423, 2004.
- LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop productions. **Advances in Soil Science**.v.1, p.277-294, 1985.
- LIBARDI, P. L. Água no solo. In: VAN LIER, Quirijn de Jong. **Física do solo**. Viçosa. Sociedade Brasileira de Ciência do solo, p.103-154, 2016.
- MACHADO, A. L. S. et al. Estrutura e armazenamento de água em Latossolo sob diferentes sistemas de manejo para a cultura da soja. In: XI Reunião Sul-Brasileira de Ciência do Solo. **Anais**. Frederico Westphalen, 2016.
- MOREIRA, F. R. et al. Intervalo hídrico ótimo em um Latossolo vermelho cultivado em sistema semeadura direta por 25 anos. **Revista Brasileira de Ciência do solo**. 38:118-127, 2014.
- MOREIRA, W. H. et al. Influência da altura de pastejo de azevém e aveia em atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico, após sete anos sob integração lavoura-pecuária. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, 38:1315-1326, 2014.
- NUNES, M. R. et al. Efeito de semeadora com haste sulcadora para ação profunda em solo manejado com plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, p. 627-638, 2014.
- OLIVEIRA, G. G. et al. Indicadores de qualidade física para Argissolos sob pastagens nas regiões leste e sul de Minas Gerais. **Revista de Ciências Agrárias**, Amazonian Journal. v. 58, n. 4, p. 388-395, out./dez. 2015.
- PAIVA, A. S. et al. Condutância estomática em folhas de feijoeiro submetido a diferentes regimes de irrigação. **Engenharia agrícola**. Vol.25, Jan./Abr. 2005.

PALHANO, A. L. et al. Padrões de deslocamento e procura por forragem de novilhas leiteiras em pastagem de capim - mombaça. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.35, p.2253-2259, Viçosa, Nov./Dez. 2006.

PETEAN, L. P.; TORMENA, C. A.; ALVES, S. J. Intervalo hídrico ótimo de um Latossolo vermelho distroférico sob plantio direto em sistema de integração lavoura-pecuária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 34:1515-1526, 2010.

RAUBER, L. R. et al. Atributos físicos do solo em Integração lavoura - pecuária leiteira e produtividade da cultura da soja. In: XI Reunião Sul-Brasileira de Ciência do Solo. **Anais**. Frederico Westphalen, 2016.

REICHERT J. M. et al. Mecânica do solo. In: VAN LIER, Quirijn de Jong. **Física do solo**. Viçosa. Sociedade Brasileira de Ciência do solo, p.29-102, 2016.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência e Ambiente**, 27:29-48, 2003.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. (Org.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. v.4, p.49-134.

RIBEIRO, K. D. et al. Propriedades físicas do solo, influenciadas pela distribuição de poros, de seis classes de solos da região de Lavras-MG. **Ciência e Agrotecnologia**. v.31. 2006.

RIES, J. E.; BITTENCOURT, S. L. J. Relatório socioeconômico da cadeia produtiva do leite no Rio Grande do Sul. **Instituto Gaúcho do leite**. Porto Alegre, Set. 2015.

ROCHA JUNIOR, P. R.; SILVA, V. M.; GUIMARÃES, G. P. Degradação de pastagens brasileiras e práticas de recuperação. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.9, n.17; Dez. 2013.

SECCO, D. et al. Atributos físicos e rendimento de grãos de trigo, soja e milho em dois Latossolos compactados e escarificados. **Ciência Rural**. v. 39, p. 58-64, 2009.

SEYBOLD, C.A.; HERRICK, J.E. & BREJDA, J.J. Soil resilience: A fundamental component of soil quality. **Soil Sci.**, 164:224-234, Abr. 1999.

SILVA, A.P.; KAY, B.D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, v.58, p.1775-1781, 1994.

SILVA, A. P. et al. Intervalo hídrico ótimo e sua importância para as plantas. In: RIBEIRO, Mateus Rosas. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v7, pg 2-30, 2009.

SILVA, A. P. et al. Indicadores da qualidade física do solo. In: VAN LIER, Quirijn de Jong. **Física do solo**. Viçosa. Sociedade Brasileira de Ciência do solo, p.241-282, 2016.

SILVA, H. A. et al. Viabilidade econômica da produção de novilhas leiteiras a pasto em sistema de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.47, n.6, p.745-753, Jun. 2012.

SILVA, S. G. C. **Varição da densidade do solo e do grau de compactação de um Latossolo vermelho sob plantio direto escarificado**. Dissertação de Mestrado (Mestre em ciências), Escola superior de Agricultura Luiz de Quiroz, 2011.

SUZUKI, L. E. A. et al. Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 42:1159-1167, Ago. 2007.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3.ed. Porto Alegre, 2006. 722p.

TENFEN, J. R. **Infiltração de água e atributos físicos de um latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de manejo**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal da Grande Dourados. Mato Grosso do Sul, 2014.

TORMENA, C. A.; SILVA, A.P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 22:573-581, 1998.

VAN DER TOL, P.P.J. The Pressure Distribution Under the Bovine Claw During Square Standing on a Flate Subtrate. **Journal of Dairy Science**. 85:1476–1481, Jul. 2002.

VAN LIER Q. J. Gases no solo. In: VAN LIER, Quirijn de Jong. **Física do solo**. Viçosa. Sociedade Brasileira de Ciência do solo, p.103-152, 2016.

VAN LIER Q. J.; GUBIANI P. I. Beyond the “Least limiting water range”: Rethinking soil physics research in Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 39:925-939, Fev. 2015.

VILLANI, M.; WRIGHT, R. Environmental influences on soil macroarthropod behavior in agriculture systems. **Annual Review of Entomology**, v.35,p.249-259, Jan.1990.