

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

Ezequiel Koppe

**RESILIÊNCIA FÍSICA DE UM LATOSSOLO VERMELHO
SUBMETIDO AO PASTEJO BOVINO ROTACIONADO**

Santa Maria, RS, Brasil
2018

PPGCS/UFSM, RS

KOPPE, Ezequiel

Doutor

2018

Ezequiel Koppe

**RESILIÊNCIA FÍSICA DE UM LATOSSOLO VERMELHO SUBMETIDO AO
PASTEJO BOVINO ROTACIONADO**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração em Processos físicos e morfogenéticos do solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Doutor em Ciência do Solo**.

Orientador: Prof. PhD. Dalvan José Reinert

Santa Maria, RS, Brasil
2018

Ficha catalográfica elaborada através do programa de elaboração automática da biblioteca central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Koppe, Ezequiel
RESILIÊNCIA FÍSICA DE UM LATOSSOLO VERMELHO SUBMETIDO
AO PASTEJO BOVINO ROTACIONADO / Ezequiel Koppe.- 2018.
92 p.; 30 cm

Orientador: Dalvan José Reinert
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós
Graduação em Ciência do Solo, RS, 2018

1. : Compactação 2. Conectividade de Poros 3.
Tomografia Computadorizada 4. Gado Leiteiro 5. Pisoteio
Animal I. Reinert, Dalvan José II. Título.

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

© 2018

Todos os direitos autorais reservados a Ezequiel Koppe. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: ezequiel.koppe@gmail.com

Ezequiel Koppe

**RESILIÊNCIA FÍSICA DE UM LATOSSOLO VERMELHO SUBMETIDO AO
PASTEJO BOVINO ROTACIONADO**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração em Processos físicos e morfogênicos do solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Doutor em Ciência do Solo**.

Aprovado em 26 de fevereiro de 2018:

Dalvan José Reinert, Ph.D. (UFSM)
(Presidente/ Orientador)

José Miguel Reichert, Ph.D. (UFSM)

Vanderlei Rodrigues da Silva, Dr. (UFSM)

Jackson Ernani Fiorin, Dr. (CCGL)

Anderson Luiz Zwirtes, Dr. (IFSC)

**Santa Maria, RS
2018**

AGRADECIMENTOS

Ao professor orientador Dalvan José Reinert, pelos ensinamentos, paciência, orientação e amizade, além do incentivo ao desenvolvimento do estudo.

Ao professor Eng. Agr. Dr. Vanderlei Rodrigues da Silva, pelo incentivo à pesquisa, confiança, inúmeras oportunidades pessoais e profissionais criadas, e o que considero mais importante, pelos belos laços de amizade que estabelecemos.

A minha namorada, Rosemar de Queiroz, que foi mais que uma namorada, e sim uma colega pesquisadora, que me auxiliou, motivou e apoiou durante tempo todo.

A Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), juntamente ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo (PPGCS) pelo ensino de qualidade.

Aos membros do grupo de pesquisa em física do solo da Universidade Federal de Santa Maria campus Frederico Wesphalen, pelo auxílio nas coletas e condução do experimento, que sem o auxílio dos mesmos a execução desse trabalho não seria possível. Um agradecimento em especial ao Jonas Piovesan, que auxiliou em todas as coletas.

Ao grupo de pesquisa em ciência do solo da Universidade de Kassel, que embora por um período breve, fizeram uma contribuição de grande valia no meu processo de formação profissional bem como de formação pessoal. Ao Professor Stephan Peth por ter me aceito junto ao grupo, ao Dr. Daniel Puchmann Uteau que me auxiliou na execução dos experimentos, análises e discussão dos resultados obtidos na Alemanha. Agradecimento em especial a Technical Assistant Margit Rode, que me auxiliou muito na minha instalação bem como na adaptação no exterior.

Um agradecimento para toda a Família Rupollo, que disponibilizou a área e os animais para a realização do experimento, principalmente ao Msc. Carlos Zandoná Rupollo e ao Sr^o Ademir Rupollo.

A CAPES, pela concessão da bolsa de estudo.

Aos membros das bancas de qualificação e da banca examinadora, pelas sugestões e considerações apresentadas para a melhoria do trabalho.

A todos os colegas e amigos do grupo de pesquisa de física do solo da Universidade Federal de Santa Maria-sede.

Enfim, a todos que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos

RESUMO

RESILIÊNCIA FÍSICA DE UM LATOSSOLO VERMELHO SUBMETIDO AO PASTEJO BOVINO ROTACIONADO

AUTOR: Ezequiel Koppe

ORIENTADOR: Dalvan José Reinert

A expansão da pecuária leiteira no planalto gaúcho, principalmente sob sistema de pastejo rotacionado, tem causado modificações na qualidade do solo com impactos no crescimento das pastagens, evidenciando a necessidade de conhecer os impactos desse sistema nos atributos físicos do solo, avaliando o tempo de duração dessas alterações. O objetivo do trabalho foi avaliar a recuperação natural dos atributos físicos de um Latossolo Vermelho distrófico típico de textura argilosa, após ser manejado sob diferentes intensidades de pastejo bovino: T1= sem pastejo; T2= consumo de 30% da quantidade total de forragem; T3= consumo de 50% da quantidade total de forragem; T4= consumo de 80% da quantidade total de forragem. Foi utilizado sistema de pastejo rotacionado, o qual consiste em um período de pastejo de em média 4 horas, em seguida os animais são retirados da área e permanecem fora até que a forragem atinja altura média de 35 centímetros. Esse sistema foi conduzido por aproximadamente 7 meses e após os animais foram retirados permanentemente da área. A recuperação das propriedades físicas do solo foi monitorada por meio de coletas a cada três meses, durante o período de um ano. As propriedades físicas avaliadas foram porosidade do solo, densidade do solo, permeabilidade do solo ao ar, condutividade hidráulica do solo saturado e taxa de infiltração. Foram coletadas amostras para determinação da porosidade e distribuição de poros por meio da tomografia computadorizada, após análise tomográfica as amostras foram utilizadas para simulação do pisoteio animal por meio da compressibilidade cíclica, para assim determinar o índice de compressibilidade cíclica, também foi analisado a permeabilidade do solo ao ar após os ciclos de carregamento 0, 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 e 120. A partir dos resultados obtidos é possível determinar que o pisoteio bovino afeta negativamente a qualidade física do solo. Com o aumento da intensidade de pastejo há redução da porosidade total, da macroporosidade, da permeabilidade do solo ao ar e aumento da densidade. Com a exclusão do pastejo há recuperação da qualidade estrutural do solo, percebido pelo aumento da porosidade total e da macroporosidade. 90 dias sem pastejo são suficientes para ser percebido melhora dos valores de porosidade total e macroporosidade. A relação entre permeabilidade do solo ao ar e porosidade de aeração é uma boa indicadora da qualidade física do solo, sendo que essa relação reduz conforme aumenta a intensidade de pastejo, é possível verificar aumento dessa relação com aumento do tempo de exclusão dos pastejos. A tomografia computadorizada é uma eficiente ferramenta para caracterizar a qualidade estrutural do solo, pois além de ser possível quantificar o volume de poros é possível verificar a forma, tamanho, distribuição e conectividade dos poros. O número de Euler fornecido pelo software MAVI ToolIP pode ser utilizado como indicador da qualidade estrutural do solo. O índice de elasticidade do solo é afetado pelo estado de compactação, conforme aumenta o estado de compactação inicial também aumenta o índice de elasticidade. Pastejo rotacionado, quando manejado de maneira adequada pode ser uma importante ferramenta para produção sustentável.

Palavras chave: Compactação. Gado Leiteiro. Pisoteio Animal. Conectividade de Poros. Tomografia Computadorizada.

ABSTRACT

PHYSICAL RESILIENCE OF A OXISOIL SUBMITTED TO ROTATING BOVINE GRAZING

AUTHOR: Ezequiel Koppe

ADVISOR: Dalvan José Reinert

The expansion of dairy farming in the gaucho plateau, mainly under rotational grazing system, has generated soil physical changes by this system with loss of soil quality, which, in turn, is necessary to know the impacts of this system on the soil physical attributes, evaluating the duration of these changes and measure of soil resilience. The objective of this work was to evaluate the natural recovery of the soil physical attributes of a clayey Oxisol, managed under different intensities of cattle grazing and trampling as following: T1 = no grazing; T2 = consumption of 30% of the total amount of forage; T3 = consumption of 50% of the total amount of forage; T4 = consumption of 80% of the total amount of forage. The rotational grazing system used consisted of a grazing period of 4 hours, in average, then the animals were removed from the area and remained outside until the forage reaches an average height of 35 centimeters. This system was conducted for approximately seven months and after the animals were permanently removed from the area. The recovery of soil physical properties was monitored by soil sampling every three months during the period of one year. The physical properties evaluated were soil porosity, bulk density, soil air permeability, saturated hydraulic conductivity and infiltration rate. Soil samples were taken to determine the porosity and pore distribution using the computed tomography. After tomographic analysis, the samples were used to simulate the animal trampling by cyclic compressibility, in order to determine the cyclic compressibility index. After the loading cycles of 0, 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 and 120, was determined the air permeability. The grazing intensities negatively affected the physical quality of the soil. With the increase of grazing intensity there was reduction of total porosity, macroporosity, soil air permeability as well as bulk density increase. With the exclusion of grazing there is recovery of the structural quality of the soil, perceived by the increase of total porosity and macroporosity. The time of 90 days without grazing were enough to show the improvement of the values of total porosity and macroporosity. The relationship between soil air permeability and air-filled porosity is a good indicator of the physical quality of the soil, and this relationship reduces as the grazing intensity increases and was possible to verify the increase of this relationship with an increase in grazing exclusion time. Computed tomography is a great tool to characterize the structural quality of the soil, since it is possible to quantify the pore volume and it is possible to verify the shape, size, distribution and connectivity of the pores. The Euler number provided by the MAVI ToolIP could be used as an indicator of the structural quality of the soil. The soil elasticity index is affected by the compaction state, and as the initial compaction state increases, the elasticity index also increases. Rotated grazing, when handled properly, can be an important tool for sustainable production.

Key words: Compaction. Dairy Cattle. Cattle Trampling. Pore Connectivity, Computed Tomography.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização geográfica do município de Palmeira das Missões (a); localização da área experimental no município de Palmeira das Missões (b); e vista aérea da área de estudo (c).	27
Figura 2 – Valores diários de precipitação em mm, temperatura máxima e temperatura mínima em °C durante o período do experimento.....	28
Figura 3 – Implantação da forrageira após aração, gradagem e correção da fertilidade química do solo.....	30
Figura 4 – Reconstrução das imagens obtidas pela tomografia computadorizada. (A) Imagem obtida do tomógrafo, (B) imagem segmentada, (C) visão em 3 dimensões da distribuição de poros da amostra.	34
Figura 5 – Gráfico representando ciclos de carregamento e descarregamento em função do tempo.	35
Figura 6 – Infiltrômetro de Cornell utilizado para determinação da taxa de Infiltração de água no solo.	40
Figura 7 – Efeito das diferentes intensidades de pastejo no volume acumulado de poros.	43
Figura 8 – Volume de poros em diferentes diâmetros de poros.	44
Figura 9 – Número de Euler em um Latossolo Vermelho submetido a quatro intensidades de pastejo.	45
Figura 10 – Coeficiente de compressibilidade de um Latossolo Vermelho submetido a quatro intensidades de pastejo.	46
Figura 11 – Variação do índice de vazios de um Latossolo Vermelho submetido a quatro intensidades de pastejo.	47
Figura 12 – Variação do índice de vazios nos diferentes ciclos de carregamento.	48
Figura 13 - Permeabilidade do solo ao ar em função dos números de ciclos de carregamento.....	51
Figura 15 – Porosidade total do solo em função dos números de ciclos de carregamento.	52
Figura 16 – Índice de elasticidade em função dos ciclos de carregamento.	53
Figura 17 – Relação entre permeabilidade do solo ao ar com a porosidade de aeração nas em diferentes intensidades de pastejo na profundidade de 0-5 centímetros	67

Figura 18 – Relação entre permeabilidade do solo ao ar com a porosidade de aeração em diferentes intensidades de pastejo profundidade de 5-10 centímetros.....	69
Figura 19 – Relação entre permeabilidade do solo ao ar com a porosidade de aeração em diferentes intensidades de pastejo profundidade de 10-15 centímetros.....	71
Figura 20 – Relação entre permeabilidade do solo ao ar com a porosidade de aeração em diferentes intensidades de pastejo profundidade de 15-20 centímetros.....	73
Figura 21 – Taxa de infiltração em quatro intensidades de pastejo e em cinco tempos de exclusão de pastejo.	75
Figura 22 – Velocidade Básica de infiltração após 60 minutos do início do teste.....	77
Figura 23 – Infiltração acumulada em quatro intensidades de pastejo e em 5 tempos de exclusão do pastejo.....	78
Figura 24 – Infiltração acumulada após 60 minutos do início do teste.	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Média dos valores de areia grossa, areia fina, silte e argila do Latossolo Vermelho.	26
Tabela 2 – Data em que foram realizados os pastejos e datas em que foram realizadas coletas e tempo exato de exclusão dos pastejos, em que foram coletas de amostras indeformadas e avaliação da infiltração de água no solo.	31
Tabela 3 – Média dos valores do conteúdo volumétrico de água no momento em que as coletas foram realizadas.....	32
Tabela 4 – Média dos valores de porosidade calculada em voxel a partir das imagens (Porosidade CT), porosidade estimada a partir da amostra utilizada para compressibilidade cíclica (PT), Densidade do solo (DS), macro porosidade (macro), microporosidade (micro) e permeabilidade do solo ao ar (Kar)...	49
Tabela 5 – Correlação de Pearson das diferentes variáveis mensuradas nos diferentes tratamentos.....	50
Tabela 6 – Média dos valores de densidade do solo (Mg m^{-3}) em um Latossolo Vermelho, manejado sob diferentes intensidades de pastejos, em quatro profundidades em cinco tempos após exclusão do pastejo.....	55
Tabela 7 – Média dos valores de Porosidade total ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) em um Latossolo Vermelho, manejado sob diferentes intensidades de pastejos, em quatro profundidades em cinco tempos após exclusão do pastejo.....	57
Tabela 8 – Média dos valores de macroporosidade ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) em um Latossolo Vermelho, manejado sob diferentes intensidades de pastejos, em quatro profundidade em cinco tempos épocas após exclusão do pastejo.....	59
Tabela 9 – Média dos valores de Microporosidade ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) em um Latossolo Vermelho, manejado sob diferentes intensidades de pastejos, em quatro profundidade em cinco tempos após exclusão do pastejo.	61
Tabela 10 – Média dos valores de condutividade Hidráulica do Solo Saturado ($\text{Log}_{10}(\text{mm h})$) em um Latossolo Vermelho, manejado sob diferentes intensidades de pastejos, em quatro profundidades em cinco tempos após exclusão do pastejo	62
Tabela 11 – Média dos valores de Permeabilidade do solo ao ar ($\text{Log}_{10}(\text{Kar} -6 \text{ kPa}+1)$) em um Latossolo Vermelho, manejado sob diferentes intensidades de	

pastejos, em quatro profundidades em cinco tempos épocas após exclusão do
pastejo..... 64

Tabela 12 – Média dos valores de Permeabilidade do solo ao ar ($\text{Log}_{10} (\text{K}_{ar} - 100 \text{ kPa} \mu\text{m}^2)$) em um Latossolo Vermelho, manejado sob diferentes intensidades de
pastejos, em quatro profundidade em cinco tempos épocas após exclusão do
pastejo..... 66

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	HIPÓTESES.....	14
3	OBJETIVOS.....	15
3.1	Objetivo Geral.....	15
3.2	Objetivo Específico	15
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
4.1	Importância da Pecuária Leiteira	16
4.2	Degradação das Pastagens.....	17
4.3	Impacto do Pisoteio Animal Sob as Propriedades Físicas do Solo	19
4.4	Resiliência do Solo.....	20
4.5	Tomografia Computadorizada	24
5	METODOLOGIA	25
5.1	METODOLOGIA GERAL.....	26
5.2	Metodologia Etapa 1	33
5.2	Metodologia Etapa 2	39
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43
6.1	Compressibilidade Cíclica E Tomografia Computadorizada.....	43
6.2	Compactação e Resiliência	54
7	CONCLUSÕES.....	81
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	83

1 INTRODUÇÃO

As práticas agrícolas atualmente adotadas ocasionam alterações na estrutura do solo, geralmente acarretando aumento do estado de compactação. A suscetibilidade à compactação está vinculada ao tipo de solo, conteúdo de água no solo no momento em que é aplicada a carga sobre o mesmo, ao estado de compactação inicial que o solo se encontra e a capacidade do solo se recuperar (ARAUJO Jr. et al., 2011).

A qualidade física do solo está intimamente relacionada à capacidade que os solos têm de suportar e se recuperar de estresses. Tão importante quanto compreender como ocorrem essas alterações é compreender como o solo se recupera destes estresses gerados pelo uso do solo. Esta capacidade que o solo possui de se recuperar de um estresse, seja ele antrópico ou animal, e retornar ao seu estado natural é denominada resiliência (SEYBOLD et al., 1999).

Os solos podem ser agrupados em diferentes graus de resiliência (LAL, 1997), desde altamente resiliente, onde os mesmos apresentam elevada taxa de recuperação, até solos não resilientes, os quais são solos muito frágeis, onde as taxas de recuperação são muito pequenas e a suscetibilidade à degradação destes solos é extremamente elevada.

Apesar da resiliência estar vinculada a características intrínsecas do solo, existem algumas estratégias que tem como intuito aumentar a capacidade de o solo suportar e se recuperar de estresses, porém não há uma técnica universal para aumentar a capacidade do solo resistir e suportar os estresses gerados. O sistema de pastejo rotacionado com elevado aporte de matéria orgânica podem prevenir a degradação física do solo (AGOSTINI et al., 2012; COSTA et al., 2015).

A pecuária leiteira está amplamente difundida em todo Brasil, sendo que o sistema mais comumente adotado é a produção de leite a pasto. Dentro deste sistema está se difundindo entre os produtores o sistema de pastejo rotacionado, responsável por causar grande pressão de pastejo em curto período de tempo. Assim, torna-se necessária a avaliação dos impactos ocasionados pelo intenso pisoteio, pois quando mal manejado, resulta em baixo aporte de material orgânico, tende a aumentar o estado de compactação do solo, principalmente nas camadas superficiais (LAZANOVA et al., 2007; ORTIGARA et al., 2014).

As alterações nas propriedades físicas do solo ocasionadas pelo pisoteio animal podem ser permanentes ou temporárias (RICHART et al., 2005). As alterações permanentes geralmente implicam em redução da qualidade física do solo, que implica

em prejuízos ao crescimento e desenvolvimento de plantas, sendo a qualidade física do solo fundamental para a sustentabilidade dos sistemas produtivos.

Tendo em vista que a degradação das pastagens cultivadas no Brasil é uma realidade presente em praticamente todas as regiões do país, é necessária, portanto, a avaliação do impacto que este sistema está causando nas propriedades físicas dos solos.

Na avaliação do processo de degradação das pastagens, atualmente é dado prioridade a indicadores de qualidade referentes a plantas, lotação animal e a qualidade química dos solos, sendo que a qualidade física e a capacidade de o solo receber, suportar e se recuperar destas cargas aplicadas geralmente são desprezadas (LIMA et al., 2011).

O pisoteio animal aplica pressão na superfície do solo, se a pressão for maior que a capacidade de suporte de carga do solo e aplicada repetidamente podem ocorrer alterações nas propriedades físicas do solo, quando estas pressões são aplicadas em condições de elevada umidade do solo, podem favorecerem ainda mais o incremento no estado de compactação, podendo chegar ao ponto de restringir o crescimento radicular (FLORES et al., 2007).

O pisoteio animal tem efeito sobre os atributos físicos do solo. Porém trabalhos publicados a respeito da qualidade física dos solos submetidos ao pisoteio animal (DEBIASI e FRANCHINI 2012; MOREIRA et al., 2012; BONO et al., 2013; PIANO et al., 2015) evidenciam uma grande divergência entre os resultados encontrados quanto ao efeito do pisoteio sobre os atributos físicos, principalmente quando avaliamos densidade do solo e macroporosidade, resultados estes que vão desde leves e inexistentes até incrementos significativos, alcançando valores considerados limitantes e restritivos ao crescimento e desenvolvimento de plantas.

A variação dos efeitos causados pelo pisoteio pode estar vinculado a capacidade de cada classe de solo possui em suportar e se recuperar dos efeitos do pisoteio. Considerando que os Latossolos ocupam aproximadamente 38% do território brasileiro, o equivalente a uma área de mais de 3 milhões de km² (MANZATTO et al., 2002), é fundamental que seja avaliada a capacidade deste solo em se recuperar dos estresses nele aplicados.

2 HIPÓTESES

Com o aumento da intensidade de pastejo há aumento do estado de compactação, em estados de compactação mais elevados a recuperação da qualidade física ocorrerá de forma mais lenta.

A recuperação das condições estruturais do solo será mais expressiva nos primeiros três meses, após esse período as recuperações serão menos pronunciadas.

Mesmo em estados de compactação mais elevados haverá recuperação estrutural do solo.

Nas camas mais profundas o processo de resiliência do solo será menos pronunciado.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo do trabalho é avaliar o impacto do pisoteio animal e a resiliência dos atributos físicos, tais como densidade, porosidade, condutividade hidráulica do solo saturado, permeabilidade do solo ao ar e taxa de infiltração de um Latossolo Vermelho distrófico típico de textura argilosa, manejado sob diferentes intensidades de pastejo bovino.

3.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Determinar qual intensidade de pastejo adequada para que não ocorra danos a estrutura do solo ao ponto de causar restrição ao crescimento e desenvolvimento de plantas.

Estimar qual período sem pastejo necessário para que ocorra a recuperação estrutural do solo.

Comparar o efeito das diferentes intensidades de pastejo na continuidade e na distribuição de poros por meio da tomografia computadorizada.

Quantificar o efeito de sucessivos ciclos de carregamento com carga constante sobre a permeabilidade do solo ao ar.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 IMPORTÂNCIA DA PECUÁRIA LEITEIRA

A pecuária leiteira no Brasil vem em ascensão considerável desde 1990, quando a produção era de apenas 14,4 bilhões de litros ano⁻¹, chegando a 35 bilhões de litros ano⁻¹ em 2016 (IBGE, 2016). O Brasil está na 5^o posição na produção mundial de leite, e na 2^o posição em termos de rebanho de bovino leiteiro, com mais de 38,800 milhões de cabeças, ficando atrás apenas da Índia (SEAB, 2014). Entre 2005 a 2015, o aumento médio foi de aproximadamente de 1,1 milhões de litros de leite ano⁻¹ (IBGE, 2016).

As regiões com maior expressão na produção de leite no Brasil são as regiões sudeste e sul. Sendo que a sudeste é a mais expressiva, com uma contribuição aproximada de 35% na produção brasileira, já a região sul contribui com 34% do leite produzido no Brasil. Neste cenário, o Rio Grande do Sul assume um papel de grande importância, como o maior produtor da região sul, responsável por 13% da produção nacional e de aproximadamente 40% do leite produzido na região sul (SEAB, 2014). Segundo Zoccal (2012), a região noroeste do Rio Grande do Sul é a mesorregião de maior importância para a produção leiteira do estado, sendo essa região responsável por mais da metade do leite produzido no estado.

A pecuária leiteira gaúcha assume papel de destaque não só pela expressiva participação em volume de leite produzido, mas também pela importância socioeconômica. Hoje a cadeia produtiva do leite é responsável por aproximadamente 8% do PIB gaúcho (FEIX e LEUSIN JÚNIOR, 2015). Nesse contexto, ela exerce papel crucial para a economia bem como para a sociedade, pois vem como uma das alternativas para que os produtores aumentem a área ocupada por leitárias, e também funcione como mais um estímulo para que os produtores se mantenham no campo.

Segundo Montoya et al. (2014), quanto maior a produção, ou seja, mais intensificado o sistema adotado pela propriedade, maior é a probabilidade de despertar interesse dos em se manter no campo e continuar com os empreendimentos da família. Além disso, segundo os mesmos autores, em propriedades pouco intensificadas, produção menores que 100 litros dia⁻¹, 25% dos sucessores relatam que venderão a propriedade, enquanto que no extremo oposto, onde a produtividade é maior que 500 litros dia⁻¹,

nenhum dos sucessores se mostrou interessado em vender a propriedade, embora 22% pensam em mudar de ramo, mas 55% deles afirmam que continuarão no setor.

As propriedades leiteiras do noroeste do estado, em sua maioria, estão alocadas em pequenas propriedades, com menos de 50 hectares, com sistema de produção de leite a pasto, onde mais de 90% das propriedades utilizam pastagens para a produção de leite, com complementação de alimentação no cocho (ENGERS et al., 2016; MEDEIROS et al. 2015). Pelo fato destas propriedades rurais serem pequenas em extensão, a lotação animal tende a ser elevada, o que pode causar degradação estrutural do solo. Nessas áreas, é importante avaliar os impactos gerados pelo pisoteio sobre a qualidade estrutural do solo, para que seja possível garantir a sustentabilidade produtiva e ambiental destas propriedades.

4.2 DEGRADAÇÃO DAS PASTAGENS

Atualmente, no Brasil, tem-se uma estimativa de que aproximadamente 70% das pastagens estão em estágio de degradação (DIAS-FILHO, 2014). Considerando que a área ocupada por pastagens no Brasil é de 177 milhões de hectares (IBGE, 2006), a área que apresenta indícios de degradação ultrapassa os 80 milhões de hectares. Por isso, uma análise minuciosa dos atuais sistemas adotados pelos produtores é de suma importância.

A degradação das pastagens é caracterizada por um declínio da produtividade, com acentuada perda de qualidade da forragem produzida, em estágios avançados de degradação pode ocorrer alteração botânica das pastagens, que é caracterizada pela alteração da espécie forrageira predominante (DIAS-FILHO, 2008). O mesmo autor alerta para outro tipo de degradação comumente encontrado nas pastagens brasileiras, que é a redução de crescimento da parte aérea, essa geralmente resultante da degradação do solo. Atualmente, no Brasil, a degradação das pastagens está em grande parte condicionada à degradação do solo, pois em muitas situações o solo não possui mais condições de suportar ou suprir as necessidades mínimas das forrageiras cultivadas (DIAS-FILHO, 2006).

Cooper (2008) define a degradação química, física ou biológica do solo como o declínio da qualidade deste pelo uso incorreto, que através do uso indiscriminado leva a mudanças adversas nas propriedades do solo. A degradação física geralmente se dá pelo incremento da densidade e redução da porosidade a valores que repercutirão diretamente

na redução dos fluxos de água, ar e nutrientes no solo, fazendo com que o mesmo não cumpra de forma satisfatória suas funções.

De maneira geral o pisoteio animal tem efeito direto sobre as propriedades físicas, e pode exercer uma pressão maior que a pressão exercida pelo tráfego de um trator. Segundo autores como Watkin e Clements (1978), Striker et al. (2006), a pressão exercida pelo pisoteio animal fica entre 112 a 165 kPa, variando em função do peso do animal, já um trator de 75 cv, com massa de aproximadamente 4,5 toneladas, exerce uma pressão de 57,9 e 52,1 kPa, no rodado traseiro e dianteiro respectivamente (CORTEZ et al., 2014). Considerando os valores citados pelos autores, a pressão exercida pelo pisoteio animal pode ser até 3 vezes maior do que o aplicado pelo tráfego de máquinas.

Além de o pisoteio animal aplicar uma pressão maior sobre a superfície do solo, o número de vezes que essa carga é aplicada também é bem maior. Watkins e Clements (1978) estimam que a área pisoteada por um único animal, em um único dia é de aproximadamente 0,01 ha, considerando a área de contato pata/solo de 90 cm², e assumindo que o animal aplique de 8.000 a 10.000 carregamentos sobre o solo. Atualmente, nas áreas utilizadas pela pecuária leiteira em sistema rotacionado, lotações 10 UA ha⁻¹ ou superiores são utilizadas, o que significa quem em dez dias toda a área da pastagem sofre a ação da carga gerada pelo pisoteio animal. Avaliando sistemas de pastejo rotacionado irrigado e não irrigado, Lima et al. (2004) verificaram aumento da pressão de pré-consolidação no pastejo irrigado, evidenciando que sucessivas cargas aplicadas no solo, e principalmente em condições de umidades mais elevadas, o efeito da compactação pelo pisoteio animal é ainda maior.

Tendo em vista a pressão aplicada pelo pisoteio bovino e o número de vezes que essa pressão é aplicada fica evidente o efeito degradante do pisoteio animal. Autores como Cruz et al. (2014), avaliando a influência do pisoteio animal nos atributos físico-hídricos do solo, que anteriormente eram manejados com floresta e savana, relatam que houve alterações negativas no solo, indicando redução na qualidade físico-hídrica. Moreira et al. (2012), avaliando diferentes intensidades de pastejos em um Latossolo Vermelho distroférico, observaram que com o aumento da intensidade de pastejo há aumento do estado de compactação do solo, evidenciado principalmente pela redução da macroporosidade.

O impacto socioeconômico e ambiental gerado pela degradação das pastagens é evidente pois muitas vezes a degradação se torna tão severa, que pode inviabilizar o

sistema de produção. Devido a isso, pode acarretar em redução do lucro e da produção por unidade de área, fazendo com que os produtores avancem suas fronteiras agrícolas, expandindo sobre áreas que anteriormente eram preservadas, com intuito de manter a mesma renda, ou até em casos mais severos fazendo com que os produtores tenham que procurar outra atividade.

4.3 IMPACTO DO PISOTEIO ANIMAL SOB AS PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO

A pecuária é de grande importância no âmbito mundial, seja pela geração de empregos na cadeia produtiva, ou pelos impactos ambientais gerados por este setor produtivo. O pisoteio animal possui efeito degradante na estrutura do solo (IGLESIAS et al., 2014; DREWRY et al., 2000). Atualmente estima-se que cerca de 1,1 bilhões de hectares de pastagens no mundo encontram-se degradados (KWON et al., 2015). Dessa forma é imprescindível o conhecimento dos efeitos do pisoteio animal sobre a estrutura do solo, e desta forma buscar meios a fim de mitigar os efeitos degradantes do pisoteio, minimizando os efeitos negativos desse sistema no ambiente.

Dentre os principais impactos gerados pelo pisoteio animal está o aumento do estado de compactação, gerado pela pressão demasiada exercida pelo casco do animal sobre o solo durante o pastejo, muitas vezes realizado em condições de umidade elevadas, o que pode potencializar o incremento da compactação. Herbin et al. (2011) avaliando o efeito do pisoteio animal de animais com distintas massas e em diferentes condições de umidade encontraram que o aumento do teor de umidade no solo potencializa o efeito degradante do pisoteio. Os autores relatam que a condição de umidade em que é realizado o pisoteio tem maior efeito sobre o dano causado do que o peso dos animais, já que no referido estudo não houve diferenças significativas entre os diferentes pesos dos animais.

Um dos principais efeitos do pisoteio animal é o aumento do estado de compactação do solo, o qual varia de acordo com a intensidade de pastejo aplicada sobre o mesmo (MODOLO et al., 2013; MOREIRA et al., 2014), ou seja, é dependente do número de ciclos de carregamento realizado sobre o solo. A cada carregamento ocorrem deformações elásticas e plásticas. As deformações elásticas são aquelas que o solo se recupera após a remoção da carga aplicada, já as deformações plásticas são deformações irreversíveis, ou seja, mesmo após a remoção da pressão não há recuperação da estrutura

do solo. A soma dos efeitos causados por essas deformações afeta diretamente a funcionalidade do solo. Um dos fatores que sofre efeito direto destas deformações é a permeabilidade do solo ao ar (PETH e HORN, 2006), pois com a ocorrência destas deformações há uma modificação na rede de poros, alterações como tamanho, forma e conectividade de poros.

O aumento do estado de compactação é dependente de diversos fatores, e cada atributo do solo responde em intensidade diferenciada quanto ao estresse aplicado. Moreira et al. (2012), utilizando permeabilidade do solo ao ar e resistência à penetração para avaliar os efeitos do pisoteio animal sobre as propriedades físicas do solo, relataram que o pisoteio animal não alterou a permeabilidade do solo ao ar nem a continuidade e distribuição dos poros, enquanto que a resistência do solo à penetração teve aumento. Conte et al. (2011), ao avaliarem resistência a penetração, densidade do solo, porosidade do solo e estabilidade de agregados, não encontraram diferenças significativas em diferentes intensidades de pastejo. Os autores relatam que houve aumento da resistência à penetração logo após o pastejo e aumento do diâmetro médio ponderado de agregados em áreas onde houve pastejo de animais, independentemente da intensidade de pastejo.

4.4 RESILIÊNCIA DO SOLO

Os sistemas de uso do solo afetam diretamente sua suscetibilidade à compactação bem como sua capacidade de se recuperar de danos gerados por pressões que acarretam incremento no estado de compactação. Viana et al. (2011), avaliando o comportamento de Latossolo Vermelho de textura arenosa manejado sob diferentes sistemas de cultivo e mata nativa, puderam verificar que o solo apresenta valores diferenciados quanto ao conteúdo de carbono acumulado, sendo que essa variação resultou em um comportamento diferenciado do solo quando o mesmo foi submetido a ensaios compressivos. Os autores relatam que o teor de carbono orgânico possui correlação direta com a densidade máxima do solo, conforme há aumento do teor de carbono orgânico há uma redução na densidade máxima.

Variações de teor de carbono orgânico estão vinculadas às práticas de manejos adotadas nas lavouras, quanto maior é o revolvimento da área menor é a quantidade de carbono orgânico no solo. Isso infere-lhes diferentes características com relação as propriedades físicas do solo, no trabalho apresentado por Viana et al. (2011) nas áreas em

que a intensidade de preparo do solo foi maior, menores são os teores de carbono orgânico, menores são os valores de porosidade total e maior é a densidade do solo.

Além do conteúdo de carbono orgânico do solo existem outros fatores relacionados à capacidade de o solo suportar e se recuperar destes estresses que são intrínsecos do próprio solo, os quais não são passíveis de alteração pela ação antrópica. Fatores estes são mineralogia do solo, solos com elevada quantidade de argilominerais do grupo 2:1, apresentam maior capacidade de se recuperar, devido à expansão quando úmidos e contração quando secos. Ou pela ação de organismos presentes no solo, que devido ao processo de bioturbação podem melhorar a condição estrutural do solo. Porém esses fatores estão longe de serem controlados pela ação antrópica, o homem possui a capacidade de manipular uma gama muito pequena de processos responsáveis pelo controle da qualidade estrutural do solo.

Dessa forma a recuperação do solo pode se dar por diversos processos, como a expansão e contração do solo (provocada por ciclos de umedecimento e secagem), a bioturbação (ação de organismos que reorganizam a estrutura do solo) e o crescimento das raízes. Esses mecanismos promovem aumento da agregação e consequente aumento da porosidade e diminuição da densidade do solo. Drewry et al. (2004), avaliando a recuperação estrutural de um solo manejado sob sistema de pastejo rotativo, observaram que após oito meses de retirada dos animais da área houve aumento significativo da permeabilidade do solo ao ar e da condutividade hidráulica do solo saturado. Os autores relatam incremento de $0,083 \text{ cm}^{-3} \text{ cm}^{-3}$ na macroporosidade e redução de $0,09 \text{ g cm}^{-3}$ na densidade do solo na camada de 0-5 cm e de $0,04 \text{ g cm}^{-3}$ na camada de 5-10 cm, os autores atribuem essa recuperação a ciclos de umedecimento e secagem que contribuíram para melhora das condições estruturais.

Capurro et al. (2014), avaliando as propriedades físicas de um Vertissolo observaram que mesmo altas intensidades de pastejo, 40 animais com peso médio de 385 kg por hectare, não causaram alterações na densidade do solo, pressão de pré-consolidação e índice de compressão. Esse resultado provavelmente se deve à elevada quantidade de argilominerais 2:1 no solo.

A ocorrência de ciclos de expansão e contração (intensificados pela expansividade e contração dos argilominerais 2:1) que devem ter promovido a reestruturação do solo. Collares et al. (2011), avaliando um Latossolo, encontrou redução da qualidade física do solo após o pisoteio bovino, observando a densidade do solo superior a $1,40 \text{ Mg m}^{-3}$ e resistência a penetração superior a 2 MPa, e de macroporosidade inferior a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$,

valores estes considerados restritivos ao crescimento e desenvolvimento radicular. Ao considerarmos que Latossolos apresentam pouca quantidade de argilominerais 2:1 (BENEDETTI et al., 2011), a capacidade em se recuperar estruturalmente por meio de ciclos de umedecimento e secagem é bastante reduzida, ou seja, há maior propensão a alcançar estados de compactação restritivos ao crescimento e desenvolvimento de plantas.

Quando o solo atinge estados de compactação elevados uma prática corriqueira a ser adotada é a intervenção mecânica. Apesar da intervenção mecânica ser uma prática eficaz para a minimização da compactação do solo, a mesma não possui efeito duradouro, pois em períodos de tempo relativamente curtos os efeitos benéficos gerados por essa intervenção mecânica já não são mais visualizados. Outra desvantagem é que em sistemas onde há intervenção há redução nos teores de matéria orgânica/carbono orgânico no solo (BAYER e BERTOL, 1999; TORMENA et al., 2002; CARNEIRO et al., 2009). Com redução do teor de carbono no solo, além de tornar mais propenso ao aumento do estado de compactação, o solo apresentará menor capacidade de recuperação dos estresses advindos do pisoteio animal e do tráfego de máquinas (HAMZA e ANDERSON, 2005).

De maneira geral, os trabalhos evidenciam que a intervenção mecânica reduz o estado de compactação do solo, mas isso não proporciona um aumento significativo da produtividade das culturas (FREDDI et al., 2007; SUZUKI et al., 2008). Na maioria dos trabalhos conduzidos no Rio Grande do Sul e Santa Catarina em sistemas agrícolas, a intervenção mecânica é desnecessária, e em alguns casos o solo atinge maior estado de compactação alguns anos após a intervenção mecânica, em relação às áreas em que não houve nenhum tipo de intervenção (REICHERT et al., 2009; DRESCHER et al., 2011).

A sustentabilidade da qualidade física de um sistema está vinculada ao tipo de solo, textura do solo, teor de matéria orgânica, ciclos de umedecimento e secagem, estado de compactação inicial e as cargas aplicadas sobre o solo. Suzuki et al. (2008) e Silva et al. (2000), avaliando um Latossolo Vermelho e um Argissolo Vermelho-Amarelo respectivamente, observaram que ambos os solos apresentam menor grau de deformação conforme há aumento da densidade inicial do solo. Os autores observaram o mesmo comportamento quando avaliaram o efeito da densidade inicial no índice de compactação, isso evidencia que quanto maior o estado de compactação inicial do solo menor é sua suscetibilidade a compactação.

Assim como o estado de compactação inicial o acúmulo de matéria orgânica no solo está associado a susceptibilidade do solo à compactação. Braida et al. (2010), ao avaliarem um Nitossolo vermelho e um Argissolo Vermelho-Amarelo, observaram que o

incremento do teor de argila e de carbono orgânico faz com que o solo se torne mais susceptível a compactação, mas apresente recuperação mais acentuada. Bavoso et al. (2012), avaliando dois Latossolos Vermelhos, um de textura argilosa e outra de textura franco-argilo-arenosa, puderam observar que o solo que apresenta comportamento mais resiliente é o que apresenta maior teor de argila. Os autores atribuem esse comportamento à quantidade de argila, que lhe confere maior coeficiente de expansividade. Outro fator que contribui para essa maior resiliência é que o teor de matéria orgânica, que também propicia uma recuperação mais acelerada (DREWRY, 2006).

Dessa forma, o tempo de adoção de sistemas sustentáveis com alto aporte de carbono orgânico vai interferir diretamente na capacidade que um solo tem em resistir a compactação e se recuperar de possíveis danos causados pelo sistema. Amado et al. (2001), avaliando plantas de cobertura em sistema de plantio direto, verificaram que áreas manejadas em plantio direto com grande acúmulo de palhada possuem maiores teores de carbono orgânico. Neste trabalho, os autores encontraram quantidades de carbono orgânico nos solos em plantio direto equivalentes às quantidades encontradas em campo nativo.

Com o adequado aporte de material orgânico, atividade biológica elevada associados a ciclos de umedecimento e secagem é possível atingir estabilidade estrutural dos sistemas produtivos, que significa um estado de compactação não restritivo para o crescimento de plantas. Domit et al. (2014) avaliando áreas de lavoura conduzidas sob sistema de plantio direto observaram que áreas cultivadas a um período superior a oito anos encontram-se em estabilidade. Apesar de estar em estado de compactação mais acentuado quando comparado com a mata nativa, esse estado de compactação não é limitante para o desenvolvimento das culturas. Os autores ainda afirmam que o emprego de sistemas de manejo menos agressivos e a adoção de rotação de culturas são práticas que contribuem para o acúmulo de matéria orgânica no solo e, por isso, são importantes alternativas para minimizar a compactação dos solos agrícolas.

Em áreas de lavoura a variação da umidade é mais pronunciada na camada superficial do solo e essa variação de umidade acarreta em ciclos de contração e expansão. Gubiani et al. (2015) relatam que repetidos ciclos de contração e expansão podem gradativamente diminuir a densidade do solo, reverter o processo de compactação e recuperar a estrutura de solos compactados. Os autores relatam ainda que o solo tende a um equilíbrio físico, pois quando avaliado o estado de compactação de um sistema plantio

direto escarificado e um sistema plantio direto com compactação adicional, ambos tendem a um estado de compactação intermediário próximo ao estado de compactação do plantio direto “normal”, onde os valores de densidade e porosidade ficam próximos a valores considerados adequados para o crescimento e desenvolvimento de plantas.

Uma das estratégias para minimizar a compactação do solo e aumentar o acúmulo de material vegetal na superfície do solo em áreas de pecuária leiteira é a adoção do sistema de pastejo rotacionado, no qual há um período de tempo para que os mecanismos de recuperação do solo possam agir. Ozcan (2017), avaliando o efeito do pisoteio animal e adoção do sistema rotacionado, observou que após dois anos da adoção do sistema rotacionado houve melhora das condições estruturais do solo. Os autores relatam redução da densidade do solo e aumento da permeabilidade do solo em sistema de pastejo rotacionado, e em sistema de pastejo contínuo, com a mesma lotação animal não houve alteração significativa destes atributos.

Herbin et al. (2011), avaliando o efeito do pisoteio animal relatam que dez semanas após o pastejo, não houve alteração da densidade e porosidade em relação ao pré- pastejo, os autores relatam que a recuperação natural do solo pode levar meses ou até anos, dependendo do tipo de solo e das condições de recuperação que o mesmo está inserido. Dessa forma pode-se inferir que solos com práticas que contribuem para o acúmulo de carbono orgânico possuem capacidade de recuperação mais pronunciada quando comparado aos solos sob sistemas com revolvimento.

4.5 TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA

Existem diversas formas de avaliar a qualidade estrutural do solo, recentemente adotou-se uma nova ferramenta para realizar esta análise, a tomografia computadorizada, uma ferramenta extremamente importante (HELLIWELL et al., 2013). Isso pelo fato da mesma avaliar não só o volume de poros, mas também a distribuição e forma dos diferentes tamanhos de poros, bem como a sua conectividade. A partir dos resultados obtidos é possível inferir quanto a funcionalidade ambiental do solo, pois não tem apenas um resultado numérico do volume de poros, mas tem-se resultados quanto ao tamanho, formato, arranjo e conectividade dos mesmos (RAB et al., 2014). Outra grande vantagem deste método é ser um método não destrutivo, ou seja, preserva a estrutura da amostra, para possível realização de outras análises (JOSCHKO et al., 1991; CNUDDÉ e BOONE, 2013; TRACY et al., 2017).

Para observação das reais alterações ocasionadas pelo pisoteio bovino é necessária avaliação, não só das proporções entre as fases sólida, líquida e gasosa do solo, mas também de como ocorre essa distribuição espacialmente em um determinado volume de solo. Quando ignoradas a distribuição das fases sólida, líquida e gasosa as variações estatísticas das relações múltiplas que existem entre estas fases, são insuficientes para compreender as funções do solo, como ocorre a dinâmica de transporte e redistribuição de gases e solutos no perfil (PETH et al., 2008). Com a tomografia computadorizada é possível visualizar e quantificar o desenvolvimento estrutural do solo, a partir de amostras indeformadas, visualizando a geometria, morfologia e a distribuição dos poros no solo. Pagenkemper et al. (2014), ao avaliar o desenvolvimento estrutural do solo por imagens de tomografia computadorizada, relatam que os ciclos de contração e expansão junto com o crescimento de raízes propiciaram incremento no desenvolvimento estrutural do solo, onde houve aumento da porosidade de aeração.

O uso da tomografia computadorizada possui a grande vantagem de avaliar a qualidade estrutural do solo de forma quantitativa, pelo volume e tamanho dos poros bem como de forma qualitativa, pois é possível avaliar a sua conectividade e assim avaliar a real funcionalidade dos poros. Katuwal et al. (2015) quantificaram a macroporosidade do solo utilizando a tomografia computadorizada, correlacionaram com a permeabilidade do solo ao ar, e observaram grande dependência entre essas variáveis, os autores relatam que a conectividade e a distribuição de tamanho de poros possuem grande importância no que se refere aos fluxos de ar no solo. Os autores ainda afirmam que é mais importante quantificar a ativa condutividade e as áreas restritivas do que apenas quantificar a quantidade total de poros. Pois só a partir do entendimento da distribuição da rede de poros no solo é que será possível compreender e quantificar a funcionalidade de determinada classe de poros no que se refere a fluxos de ar e água no solo.

5 METODOLOGIA

O estudo foi desenvolvido em duas etapas. Inicialmente foi conduzido um experimento a campo, onde a área foi submetida a diferentes intensidades de pastejo, para posterior avaliação da recuperação estrutural do solo em função do tempo de exclusão dos pastejos.

Ao final dos pastejos foram coletadas amostras com estrutura preservada para a realização da etapa 1, nas quais foram realizadas análises da distribuição e volume de poros por meio da tomografia computadorizada e após análise tomográfica foi realizada a simulação do pisoteio animal por meio da compressibilidade cíclica.

A etapa 2 foi realizado o monitoramento da recuperação estrutural do solo. Para isso foram realizados testes de infiltração, bem como coletadas de amostras com estrutura preservada para determinação da densidade, porosidade, condutividade hidráulica do solo saturado e permeabilidade do solo ao ar.

5.1 METODOLOGIA GERAL

O experimento a campo foi conduzido no município de Palmeira das Missões, localizado no norte do estado do RS. O solo é classificado como Latossolo Vermelho de textura argila (SANTOS et al., 2013). Na Tabela 1 estão apresentados os valores da análise granulométrica. O clima é subtropical úmido (Cfa) (KOPPEN, 1948), com temperatura média anual 19 °C e precipitação média de 1.800 mm. A área localiza-se geograficamente a latitude 27° 55' ao sul e longitude 53°17' oeste. A vista aérea bem como a localização mais detalhada da área experimental consta na Figura 1. A precipitação diária entre os dias 01/06/2015 até 01/06/2016, período de condução do experimento, bem como as temperaturas máximas e mínimas estão demonstradas na Figura 2.

Tabela 1 – Média dos valores de areia grossa, areia fina, silte e argila do Latossolo Vermelho.

Tratamento	Camada			
	Areia Grossa (%)	Areia Fina (%)	Silte (%)	Argila (%)
-----0-5 (cm)-----				
T1	12	12	31	45
T2	13	12	29	46
T3	15	12	29	44
T4	13	13	31	43
-----5-10 (cm)-----				
T1	12	12	30	46
T2	12	12	30	46
T3	13	13	29	45
T4	13	13	29	45
-----10-15 (cm)-----				
T1	12	11	29	48
T2	12	13	28	45
T3	13	12	28	47
T4	12	13	28	47
-----15-20 (cm)-----				
T1	11	10	30	49
T2	11	12	29	48
T3	12	13	27	47
T4	13	11	27	49

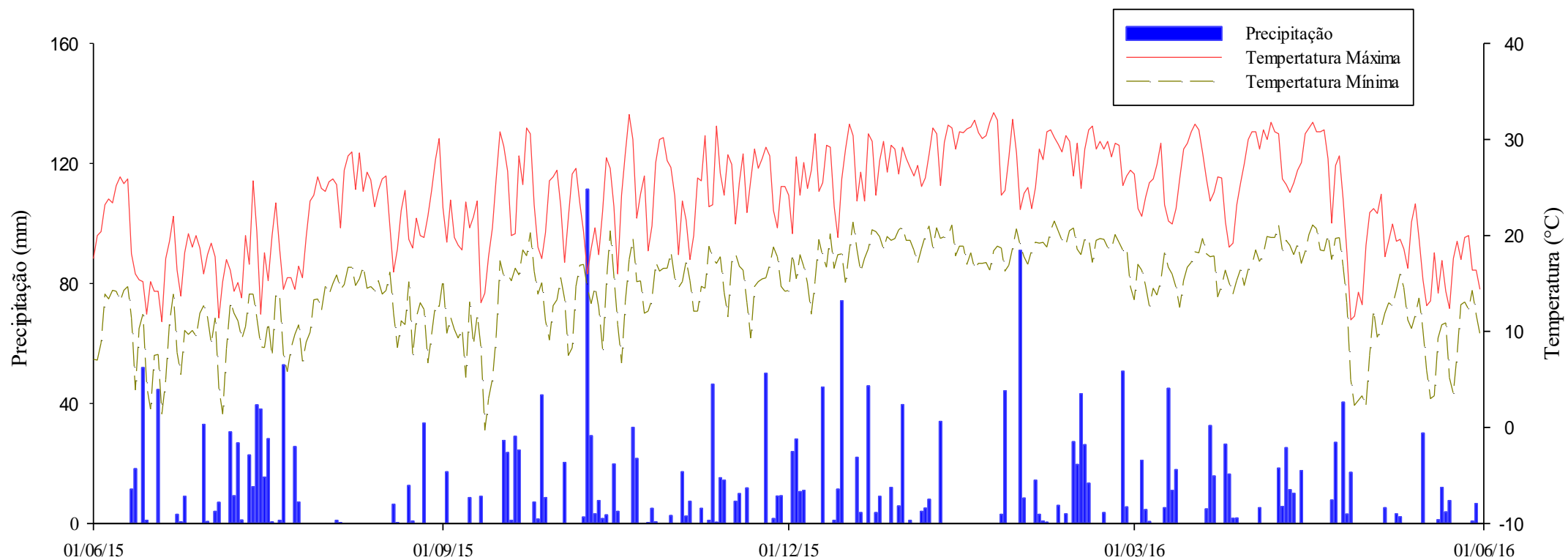
T1 é a intensidade de pastejo 0% de consumo da forragem, T2 é a intensidade de pastejo 30% de consumo da forragem, T3 é a intensidade de pastejo 50% de consumo da forragem, T4 é a intensidade de pastejo 80% de consumo da forragem.

Figura 1 – Localização geográfica do município de Palmeira das Missões (a); localização da área experimental no município de Palmeira das Missões (b); e vista aérea da área de estudo (c).



Fonte: maps.google.com.br (adaptado).

Figura 2 – Valores diários de precipitação em mm, temperatura máxima e temperatura mínima em °C durante o período do experimento.



Os tratamentos consistiram em quatro intensidades de pastejo, sendo T1= sem pastejo, T2= consumo de 30% da quantidade total de forragem, T3= consumo de 50% da quantidade total de forragem; T4= consumo de 80% da quantidade total de forragem. Para o controle do consumo da forragem foram realizadas medições da altura média antes da entrada dos animais, estimado o número de animais para realizar o consumo de forragem desejado no período de 4 horas e monitorado o consumo até que se alcançasse a altura desejada.

A área experimental contava com 1.760 m², subdivididos em 16 piquetes que receberam as diferentes lotações, cada piquete contou com uma área útil equivalente a 100 metros quadrados, e o restante da área foi utilizado para cercas e corredores.

O preparo da área iniciou em agosto de 2014, onde foi realizada amostragem de solo para análise química, a qual foi enviada ao Laboratório de Análise de Solos/UFSM, o qual segue a metodologia proposta por Tedesco et al. (1995). A interpretação da análise foi realizada com auxílio do manual de adubação e calagem (CQFS RS/SC, 2004).

De acordo com a análise, aplicou-se 2,5 t ha⁻¹ de calcário com PRNT (Poder Relativo de Neutralização Total) 60%. Na sequência foi realizada a escarificação até ± 20 cm de profundidade, seguida de gradagem. Após a gradagem, foi aplicado 146 kg ha⁻¹ de superfosfato triplo, 138 kg ha⁻¹ de cloreto de potássio e 150 kg ha⁻¹ de ureia, que foram incorporados com nova gradagem. Após cada pastejo foi realizada nova aplicação de ureia em cobertura (150 kg ha⁻¹).

A forrageira Jiggs (*Cynodon dactylon* L.) foi implantada no início do mês de setembro com o uso de mudas, as quais foram dispostas em um espaçamento de 0,50 X 0,50 m (Figura 3), e aproximadamente 5 cm de profundidade, noventa dias após a implantação das mudas foi iniciado o pastejo.

A área foi pastejada sob diferentes intensidades de pastejo, que foram controladas com diferentes lotações animais, isso por um período de seis meses, período compreendido entre os meses de dezembro de 2014 a junho de 2015, época correspondente ao ciclo da forrageira (Tabela 2).

O pastejo foi em sistema rotacionado, os animais permaneceram nos piquetes por um período aproximado de quatro horas, para se obter as diferentes intensidades de pastejo variado o número de animais, no T1 foram utilizados zero animais, T2 três animais, T3 seis animais e T4 nove animais.

Após os animais foram retirados dos piquetes e a forragem remanescente foi removida, de maneira que todos os piquetes ficassem com a mesma quantidade de

material vegetal recobrando o solo, após aguardava-se a forrageira atingir uma altura média de 0,35 m de altura, para iniciar um novo pastejo.

Figura 3 – Implantação da forrageira após aração, gradagem e correção da fertilidade química do solo.



Foram realizadas coletas periódicas, 3 em 3 meses, sendo essas compreendidas entre os meses de junho de 2015 a junho de 2016, essas amostragens foram realizadas com intuito de monitorar a recuperação da estrutura do solo. Dessa forma foram comparados os tempos 0, 90, 180, 270 e 360 dias após a exclusão de pastejo. O conteúdo volumétrico de água no momento em que as coletas foram realizadas constam na Tabela 3.

Tabela 2 – Data em que foram realizados os pastejos e datas em que foram realizadas coletas e tempo exato de exclusão dos pastejos, em que foram coletas de amostras indeformadas e avaliação da infiltração de água no solo.

Atividade (d)	Data da coleta	Tempo de exclusão (d)
Implantação do experimento	08/09/2014	
Pastejo 1	13/12/2014	
Pastejo 2	23/01/2015	
Pastejo 3	26/02/2015	
Pastejo 4	17/04/2015	
Pastejo 5	06/06/2015	
-----Início do Período de Avaliação da Recuperação do Solo-----		
0	06/06/2015	0
90	04/09/2015	90
180	06/12/2015	183
270	23/02/2016	263
360	11/06/2016	369

Ao fim do ciclo da forrageira, no mês de junho, foi realizada uma coleta com o intuito de caracterizar as propriedades físicas do solo naquele momento. Após a área permaneceu em pousio, sem à entrada dos animais, onde foi apenas realizado o corte da forragem quando a mesma chegava a uma altura de 0,35 m.

Tabela 3 – Média dos valores do conteúdo volumétrico de água no momento em que as coletas foram realizadas.

		Profundidade (cm)			
TEP*	0-5				
	T1	T2	T3	T4	
0	0,33	0,30	0,35	0,35	
90	0,29	0,31	0,31	0,33	
180	0,36	0,38	0,39	0,39	
270	0,33	0,34	0,33	0,34	
360	0,32	0,33	0,31	0,32	
		5-10			
0	0,34	0,31	0,36	0,35	
90	0,30	0,33	0,34	0,35	
180	0,37	0,38	0,39	0,39	
270	0,33	0,35	0,35	0,35	
360	0,32	0,34	0,33	0,32	
		10-15			
0	0,36	0,33	0,36	0,36	
90	0,30	0,33	0,34	0,36	
180	0,38	0,39	0,40	0,40	
270	0,35	0,35	0,35	0,33	
360	0,33	0,34	0,33	0,32	
		15-20			
0	0,36	0,33	0,37	0,36	
90	0,30	0,34	0,35	0,36	
180	0,38	0,39	0,40	0,40	
270	0,35	0,36	0,37	0,35	
360	0,34	0,33	0,34	0,33	
Média	1,37	1,37	1,39	1,39	

*Tempo de Exclusão do Pastejo; T1 é a intensidade de pastejo 0% de consumo da forragem, T2 é a intensidade de pastejo 30% de consumo da forragem, T3 é a intensidade de pastejo 50% de consumo da forragem, T4 é a intensidade de pastejo 80% de consumo da forragem,

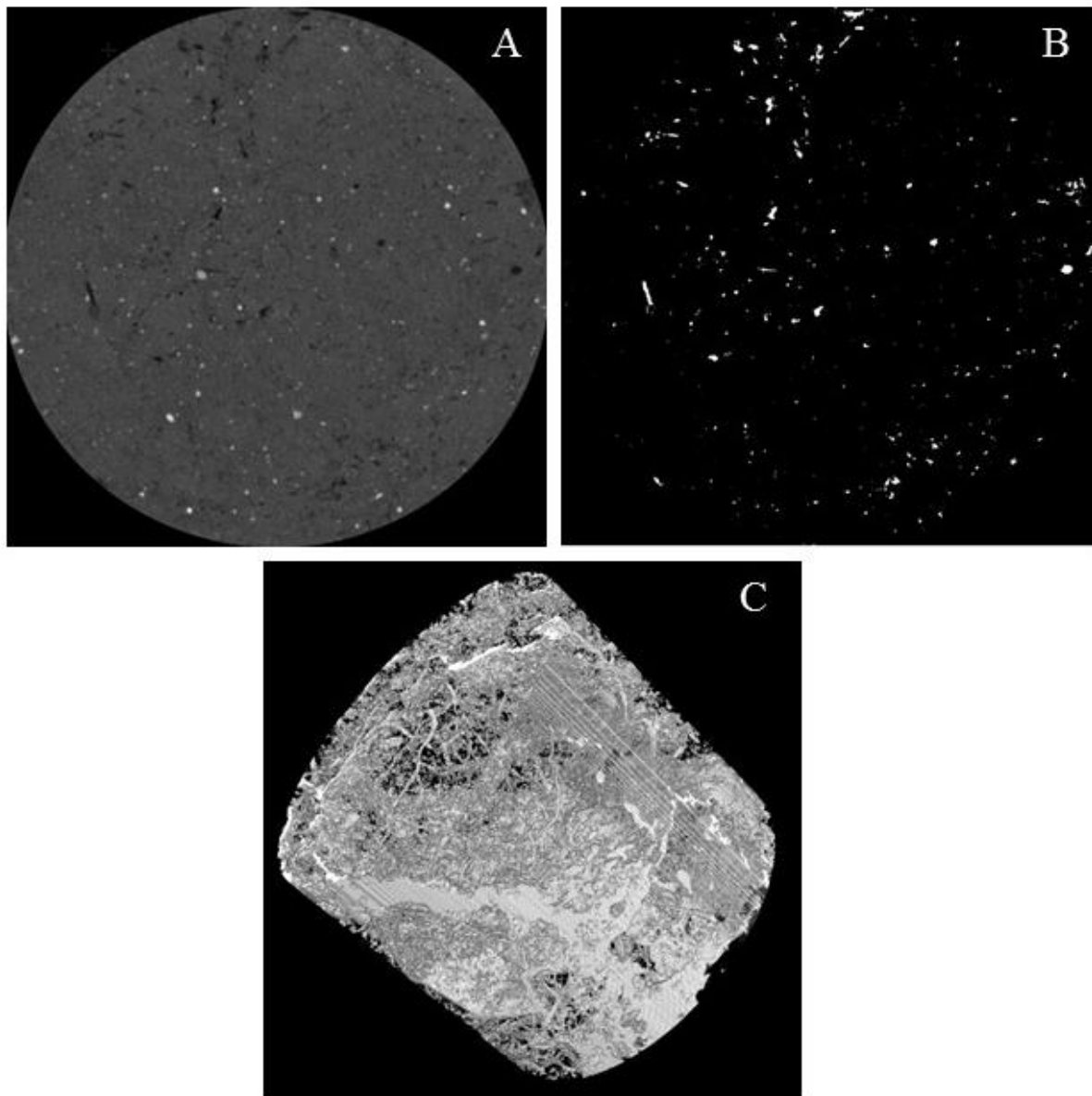
5.2 METODOLOGIA ETAPA 1

Foram coletadas amostras indeformadas no experimento de campo conduzido em Palmeira das Missões e encaminhadas para o laboratório de física do solo da Universidade de Kassel na Alemanha para ensaios de compressibilidade cíclica e análise da distribuição e tamanho dos poros por meio de tomografia computadorizada. A amostragem foi por meio do extrator de Uhland, a camada amostrada foi a camada superficial (0-7cm).

O escaneamento da tomografia computadorizada foi realizado com o tomógrafo Zeiss, no qual foi utilizada a energia máxima durante o escaneamento de 140 keV, com 1.600 projeções, o que resultou em um comprimento da aresta do voxel entre 45 e 50 micrômetros. A amostra possuía 7 centímetros de altura e diâmetro, para o escaneamento foi selecionada a parte central da amostra, removendo 1 centímetro do topo e da base, e 0,5 centímetros das bordas, dessa forma a parte escaneada possuiu 5 centímetros de altura e 6 centímetros de diâmetro.

Para a reconstrução das imagens foi utilizado o software Tool IP, inicialmente foi aplicado um filtro para aumentar o contraste entre os pontos escuros (poros) e a parte cinza (partículas de solo). Também foram removidas as partes laterais, que não faziam parte das amostras (Crop and Mask). Ao aumentar o contraste e remover as partes que não fazem parte da amostra foi realizada a segmentação das imagens, que também pode ser chamada de binarização da imagem, que é a inversão das cores, onde os poros são colocados na cor branca e o restante fica na cor preta (Figura 4). Depois da imagem segmentada foi quantificada a distribuição do tamanho de poros, bem como foi determinado o número de Euler, o qual faz uma relação entre área dos poros que possuem superfície convexa com a área de superfície côncava, quanto maior a área de superfícies côncavas, maior será o número de Euler e menor será a continuidade dos poros.

Figura 4 – Reconstrução das imagens obtidas pela tomografia computadorizada. (A) Imagem obtida do tomógrafo, (B) imagem segmentada, (C) visão em 3 dimensões da distribuição de poros da amostra.

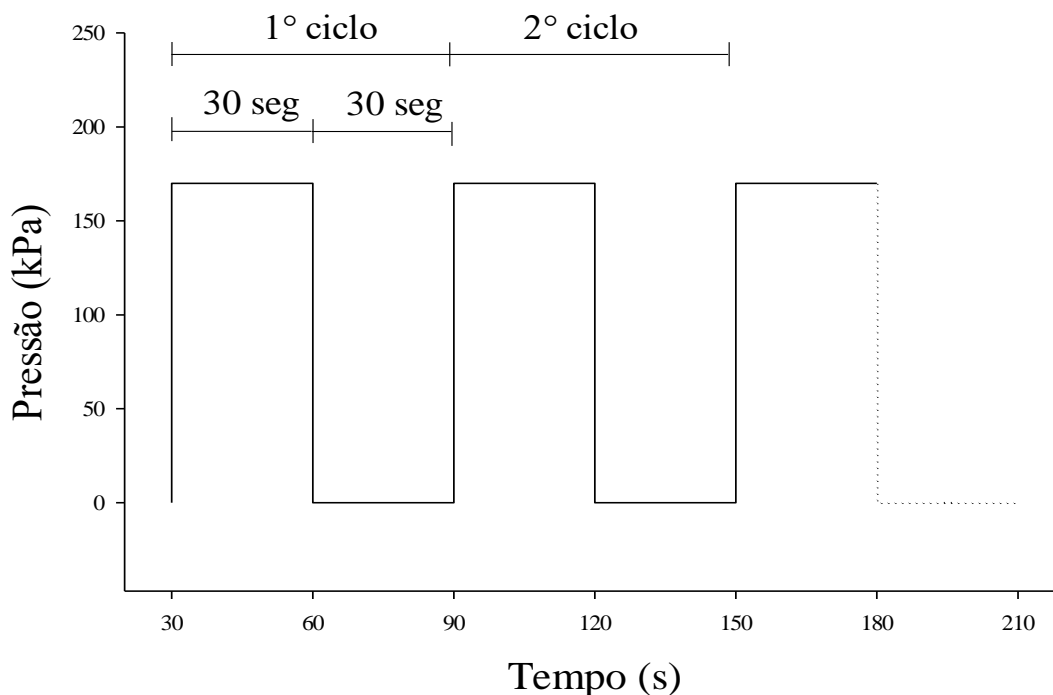


Ao término das análises tomográficas foram extraídas sub amostras das amostras utilizadas na tomografia para a realização da compressibilidade cíclica. As dimensões das amostras extraídas possuíam 5 centímetros de diâmetro e 3 centímetros de altura, e foram acondicionadas em um anel metálico onde a amostra permaneceu confinada. Após extrair

a sub amostra a mesma foi saturada e, em seguida, encaminhada a mesa de tensão até o equilíbrio de 6 kPa.

Quando atingido o equilíbrio a amostra foi pesada e encaminhada para o ensaio de compressibilidade cíclica. A compressibilidade cíclica foi realizada em um Oedômetro pneumático padrão totalmente programável, modelo Zwick Roell, conectado a um computador no qual está instalado o software TestXpert II V3.6, responsável pelo controle da carga e do tempo de duração da carga. As amostras confinadas foram submetidas ao ensaio de compressão uniaxial, conforme ocorreu o ensaio de compressão ocorria livre drenagem da água contida na amostra. Os tempos de carregamento e descarregamento foram de 30 segundos, totalizando um tempo de 60 segundos por ciclo (Figura 5), foram aplicados ao total 128 ciclos com uma pressão de carregamento de 170 kPa, a pressão aproximada da que é exercida pelo casco bovino (Greenwood e McKenzie, 2001).

Figura 5 – Gráfico representando ciclos de carregamento e descarregamento em função do tempo.



Fonte: PETH e HORN 2006 (adaptado).

Com o ensaio de compressibilidade cíclica foram obtidas as deformações em cada carregamento e descarregamento, a partir destes valores foram calculados o índice de compressibilidade cíclica, que é uma regressão dos resultados obtidos do índice de vazios e o logaritmo do número de ciclos, o índice de elasticidade, que é a relação entre a deformação quando houve a remoção da pressão dividido pela deformação quando a pressão foi aplicada em cada ciclo, a porosidade total ao final de cada carregamento (Eq. 1).

$$E_i = \frac{\text{Deformação Carregamento}}{\text{Deformação Após remoção da carga}} \quad \text{Eq. 1}$$

Também foi realizado o teste de permeabilidade do solo ao ar, o fluxo de ar que passava pela amostra foi medido antes de ser aplicada a primeira carga, ou seja, ciclo 0, e após os ciclos 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 e 128.

A permeabilidade ao ar das amostras foi determinada utilizando-se um permeâmetro de carga constante. O ar é aplicado a baixa pressão (0,1 kPa) e constante, para evitar o fluxo turbulento. O gradiente de pressão entre o ambiente e o ar que flui pela amostra é medido por um manômetro de água, adotando-se a estratégia descrita em Horn et al., (2004). A permeabilidade do solo ao ar (K_a) foi obtida pela determinação da condutividade ao ar (K_l), medida em um permeâmetro de carga constante. O princípio da metodologia é baseado na quantificação do fluxo de ar que passa pela amostra de solo, mantendo-se um gradiente de pressão constante (1 cm de coluna de água). A medição no aparelho foi realizada quando se atinge a diferença de pressão de 1 cm de H_2O , faz-se a leitura no respectivo fluxímetro da densidade de fluxo de ar que passa pelo fluxímetro, ar este que necessariamente também estará passando pela amostra de solo.

A K_l (Eq. 2) é calculada a partir da quantidade de ar que passa em uma determinada amostra, através da equação:

$$K_l = \rho_l g \left(\frac{\Delta V_l}{\Delta t \Delta p A} \right) \quad \text{Eq. 2}$$

A partir do valor de (K_l) pode-se calcular a permeabilidade ao ar K_a (Eq. 3), como:

$$K_a = K_l \left(\frac{\eta}{\rho_l g} \right) \quad \text{Eq. 3}$$

Em que:

K_l é a condutividade ao ar (cm s^{-1});

ρ_l é a densidade do ar na hora da medição (kg m^{-3});

g é a aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m s}^{-2}$);

ΔV é a quantidade de ar que passa pela amostra no Δt (m^3);

l é a altura da amostra (m);

Δp é a pressão do ar que passa pela amostra (10 cm);

A é a área superficial do anel (m^2);

η é a viscosidade do ar ($\text{g s}^{-1} \text{ cm}^{-1}$);

Δt é a variação de tempo (min).

Ao fim dos testes de compressibilidade cíclica e permeabilidade do solo ao ar as amostras foram encaminhadas a estufa a 105°C até peso constante, posteriormente pesadas.

Com as massas obtidas das amostras retiradas da mesa de tensão a -6 kPa e a massa das amostras secas em estufa foi determinada a microporosidade (Eq. 4), porosidade total (Eq. 5) e macroporosidade (Eq. 6), bem como a densidade do solo (Eq. 7). Seguindo metodologia sugerida pela Embrapa (1997). Abaixo seguem as equações utilizadas:

$$M_i = \left(\frac{MSU - MSS}{V_t} \right) \quad \text{Eq. 4}$$

$$P_t = 1 - \left(\frac{DS}{DP} \right) \quad \text{Eq. 5}$$

$$M_a = (P_t - M_i) \quad \text{Eq. 6}$$

$$DS = \left(\frac{MSS}{V_t} \right) \quad \text{Eq. 7}$$

Em que:

M_i é a microporosidade ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)

MSS é a massa do solo seco em estufa (105°C) (g);

MSU é a massa do solo úmido (removido da coluna de areia (-6 kPa)) (g);

Pt é a porosidade total ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$);

DS é a densidade do Solo (g cm^{-3});

Ma é a macroporosidade ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$);

Vt é o volume total da amostra (cm^3);

O delineamento experimental utilizado foi de blocos ao acaso com 4 tratamentos e 4 repetições. Os resultados foram submetidos à análise da variância, ao nível de 5% de probabilidade de erro. Quando houve significância, foi aplicado o teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade de erro. Para os cálculos de análise de variância e teste de média foi utilizado o programa SAS V8 (SAS Institute, 2001).

5.2 METODOLOGIA ETAPA 2

As amostras coletadas a campo nos tempos de exclusão do pastejo 0, 90, 180, 270 e 360 foram encaminhadas ao laboratório saturadas e realizada a determinação da condutividade hidráulica do solo saturado. Para determinação da condutividade hidráulica do solo saturado foi utilizado permeâmetro de carga decrescente, no qual as amostras previamente saturadas são acopladas e em seguida aplicadas cargas hidráulicas decrescentes sobre as amostras.

Esse procedimento consiste em medir o tempo gasto para a passagem de um determinado volume de água pela amostra de solo, esse volume de água é previamente acondicionado em um tubo graduado e a carga hidráulica considerada foi altura da água no ponto 1 (H_1) e ponto 2 (H_2) do tubo. Para determinação da condutividade saturada foi utilizada a equação (Eq. 1):

$$K_{\text{sat}} = \frac{2,3 \cdot a \cdot L}{A \cdot (t_2 - t_1) \cdot (\text{Log}(H_1) + \text{Log}(H_2))} \quad \text{Eq. 8}$$

Em que:

K_{sat} é a condutividade hidráulica do solo saturado (cm h^{-1});

a é a área do tubo (cm^2);

L é a altura da amostra (cm);

A é a área da amostra (cm^2);

t_1 e t_2 é o tempo (h) que a água passa pela altura H_1 e H_2 ;

H_1 e H_2 que são as respectivas cargas hidráulicas (cm);

As amostras saturadas foram pesadas e em seguida submetidas às tensões de 1, 6 e 10 kPa em coluna de areia (REINERT & REICHERT, 2006) e 100 kPa em Câmara de Richard. Após o equilíbrio em cada tensão, foi medido o fluxo de ar nas amostras, utilizando-se um permeâmetro de carga constante, conforme metodologia descrita na etapa 1.

Foi determinado a densidade do solo, porosidade total, macroporosidade, microporosidade utilizando a metodologia descrita na etapa 1.

A taxa de infiltração de água no solo foi determinada com o infiltrômetro de Cornell adaptado (Figura 6), que consiste de um reservatório de aproximadamente 95

litros, contendo na parte inferior 490 microtúbulos de 0,06 cm de diâmetro interno por 19 cm de comprimento, acoplado sobre um cilindro com 50 cm de diâmetro e 35 cm de altura, previamente enterrado no solo a uma profundidade de 25 cm.

Figura 6 – Infiltrômetro de Cornell utilizado para determinação da taxa de Infiltração de água no solo.



O equipamento tem por objetivo simular chuva constante em alta intensidade, gerando escoamento superficial de água no solo, devido a intensidade simulada ser maior que a taxa de infiltração. Há um furo na lateral do anel inserido no solo, onde é coletada a água para determinar o volume do escoado. A intensidade de chuva média de trabalho foi de 300 mm h^{-1} . A leitura do volume escoado foi realizada a cada 3 minutos. A intensidade da chuva foi controlada através das diferenças de leituras, a cada 3 minutos, do volume de água no reservatório. As leituras da intensidade da chuva e escoamento superficial (ES) foram realizadas simultaneamente. Cada teste teve duração de 60 minutos, conforme a metodologia descrita por Van Es e Schindelbeck (2003).

O modelo utilizado para ajustar as curvas de infiltração foi Smith (1972) adaptado, descrito abaixo (Eq. 8):

$$e = e_c \left\{ 1 - \left(\frac{t_e}{t} \right)^b \right\} \text{ para } t > t_e \quad \text{Eq. 8}$$

Em que:

e é a taxa de escoamento superficial de água no solo em um determinado tempo (mm h^{-1});

e_c é a taxa de escoamento constante (mm h^{-1});

t_e é o tempo de início do escoamento em minutos (min);

t é o tempo após o início do escoamento (min);

b é um parâmetro de ajuste do modelo.

O delineamento experimental utilizado foi em esquema fatorial com parcelas subdivididas, sendo considerado subdivisão as coletas realizadas nos diferentes tempos de exclusão de pastejo, o delineamento contou com 4 fatores principais, 5 tempos de exclusão (efeito de subparcela) e 4 repetições, o modelo que foi utilizado é:

$$Y_{ijk} = m + P_i + B_K + T_j + (PT)_{ij} + e_{jk}$$

Em que:

Y_{ijk} é o modelo que pressupõe as observações individuais; m a média geral das repetições;

P_i é o efeito isolado do fator a (intensidade de pastejo);

B_k é o efeito de bloco;

T_j é associado ao efeito isolado do fator b (tempo);

PT é referente a interação entre os fatores;

e_{jk} é o erro experimental em nível de subparcela.

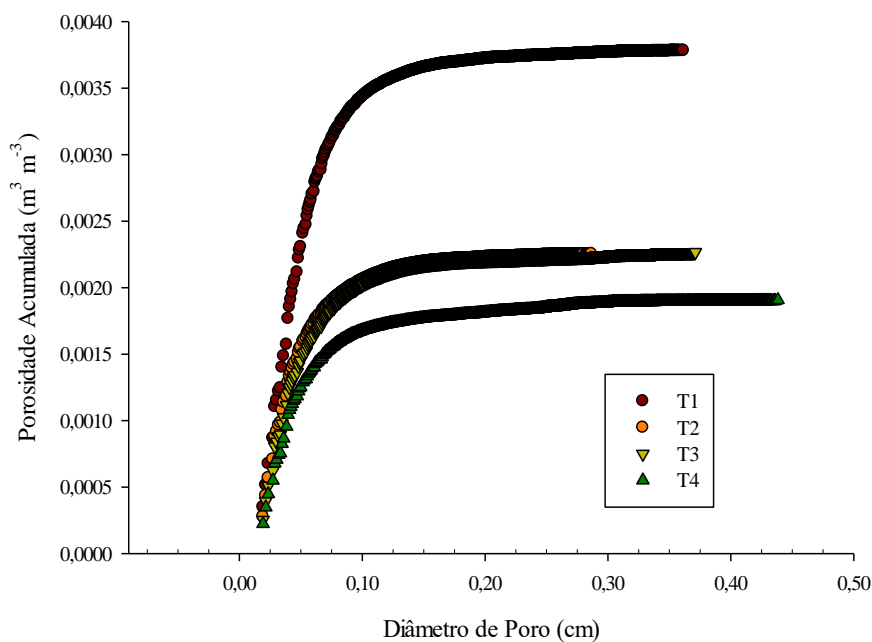
Os resultados foram submetidos à análise da variância, ao nível de 5% de probabilidade de erro. Quando houve significância, foi aplicado o teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade de erro. Para os cálculos de análise de variância e teste de média foi utilizado o programa SAS V8 (SAS Institute, 2001).

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 COMPRESSIBILIDADE CÍCLICA E TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA

A grande maioria dos trabalhos que quantificam a degradação estrutural do solo devido ao efeito do pisoteio animal realizam análises quantitativas (BONETTI et al., 2015; BORTOLINI et al., 2016), não considerando o efeito do pisoteio na continuidade, conectividade e distribuição dos poros no solo, dessa forma este trabalho buscou avaliar esses efeitos. Na figura 7, pode se verifica que no tratamento T1, onde não houve pastejo, a soma do volume de poros maiores que 0,08 cm de diâmetro é superior a todos os demais tratamentos. Conforme há aumento na intensidade de pastejo há efeito mais pronunciado sobre a soma do volume de poros. As intensidades intermediarias T2 e T3, apresentaram resultados bastante semelhantes ao efeito do pisoteio animal, onde apesar de haver redução da porosidade acumulada, essa não repercutiu de forma tão severa quanto a intensidade T4.

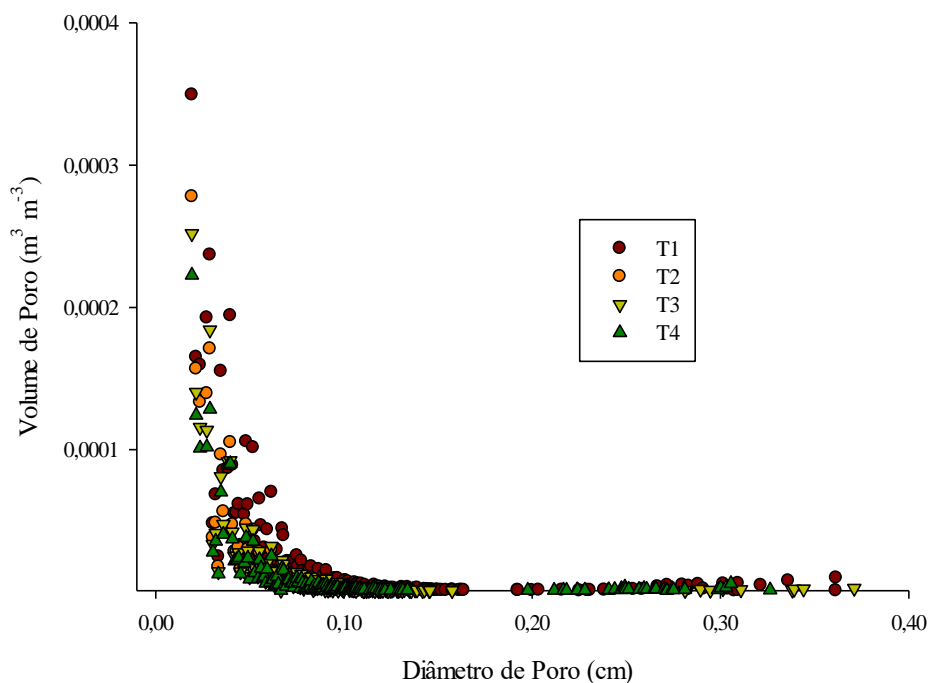
Figura 7 – Efeito das diferentes intensidades de pastejo no volume acumulado de poros.



Os valores de porosidade em cada diâmetro de poro sofreram grande efeito pelo pisoteio animal. Na figura 8 é possível verificar que na intensidade de pastejo mais alta (T4) o volume de poros existentes com diâmetro maior que 0,06 cm é praticamente inexistente, já onde não houve o efeito do pisoteio animal (T1) ainda há maior volume de poros desse diâmetro. Mesmo em diâmetro de poros bastante pequenos é possível verificar que o T1 apresenta valor superior aos demais tratamentos quanto ao volume de poros. Kunz et al. (2013), Albuquerque et al. (2001) relatam que o pisoteio animal tem grande efeito sobre a porosidade, nos trabalhos publicados por estes autores está evidenciado o efeito degradante do pisoteio principalmente pela redução da macroporosidade.

A partir dos resultados de volume de poros em diferentes diâmetros é possível verificar que o pisoteio tem influência principalmente nos poros grandes, já que poros de diâmetro de 0,30 cm são praticamente inexistentes onde houve pastejo, já na intensidade T1, apesar de ser em volume pequeno é possível verificar a presença de poros deste diâmetro.

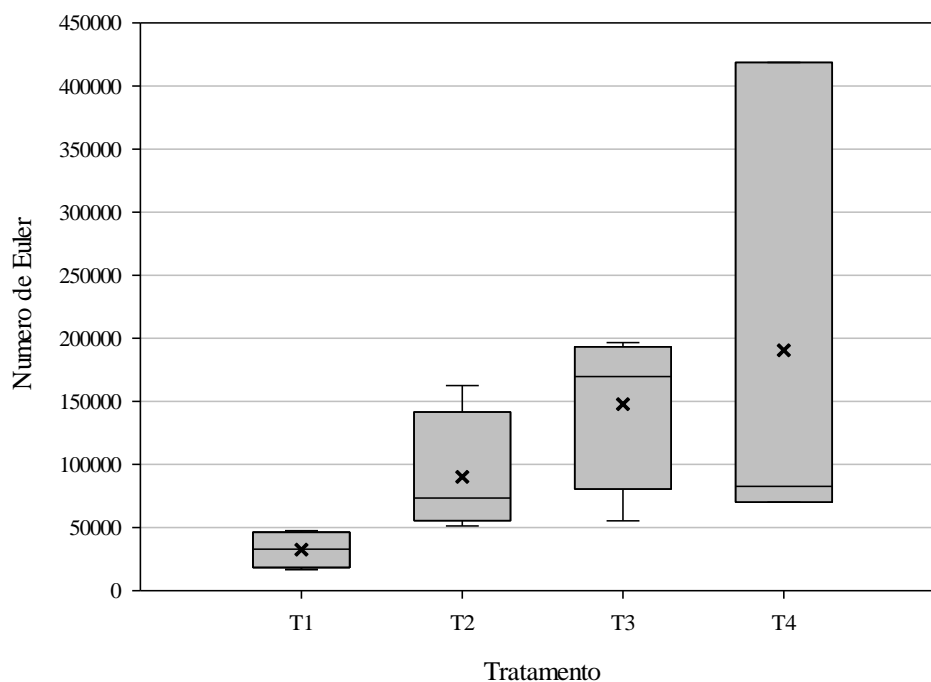
Figura 8 – Volume de poros em diferentes diâmetros de poros.



O maior volume de poros no T1 se repercute a outros fatores que auxiliam na funcionalidade do solo, isso pode ser verificado quando se analisa os resultados obtidos como número de Euler, o qual dá ideia da conectividade dos poros. Na figura 9 pode-se perceber que quanto maior a intensidade maior é o número de Euler, o que repercute em menor conectividade dos poros, no T1 foram obtidos os menores valores, conforme se aumenta a intensidade de pastejo os valores do número de Euler também aumentam. Já nas intensidades de pastejo T2 e T3, assim como na porosidade acumulada, os valores obtidos foram bastante próximos, diferente do T4 que apresentou variabilidade bastante grande dos valores, que embora o valor médio seja próximo aos encontrados nas intensidades T2 e T3, a dispersão dos valores observados é grande.

Tendo em vista que o número de Euler é um coeficiente representante da conectividade dos poros do solo, é evidente que o efeito do pisoteio resulta na alteração da funcionalidade do solo, principalmente no sentido de transportar água e ar para camadas mais profundas ou mesmo armazenar água para posterior utilização pelas plantas.

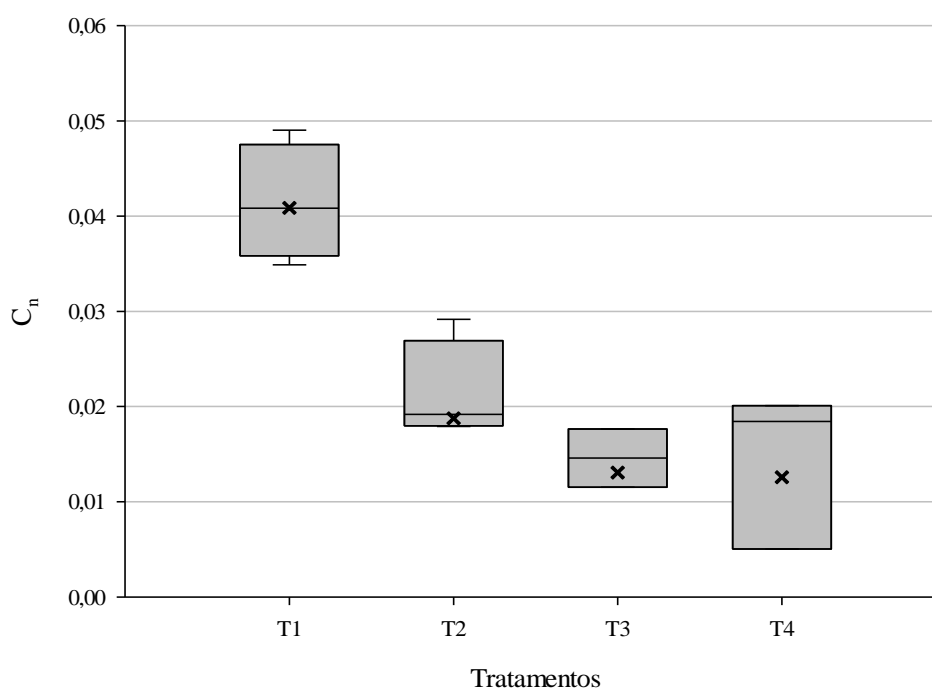
Figura 9 – Número de Euler em um Latossolo Vermelho submetido a quatro intensidades de pastejo.



O número de Euler se confirma um bom indicador da conectividade dos poros, quando avaliamos a correlação entre a permeabilidade do solo ao ar e o número de Euler, que é de -0,79. Mostrando que quanto menor os valores do número de Euler, maior será a capacidade de o solo cumprir a suas funções ambientais, tais como propiciar as trocas gasosas para manutenção da atividade e desenvolvimento de comunidades biológicas e microbiológicas aeróbicas do solo, bem como ser um ambiente propício para o crescimento e desenvolvimento de raízes de plantas.

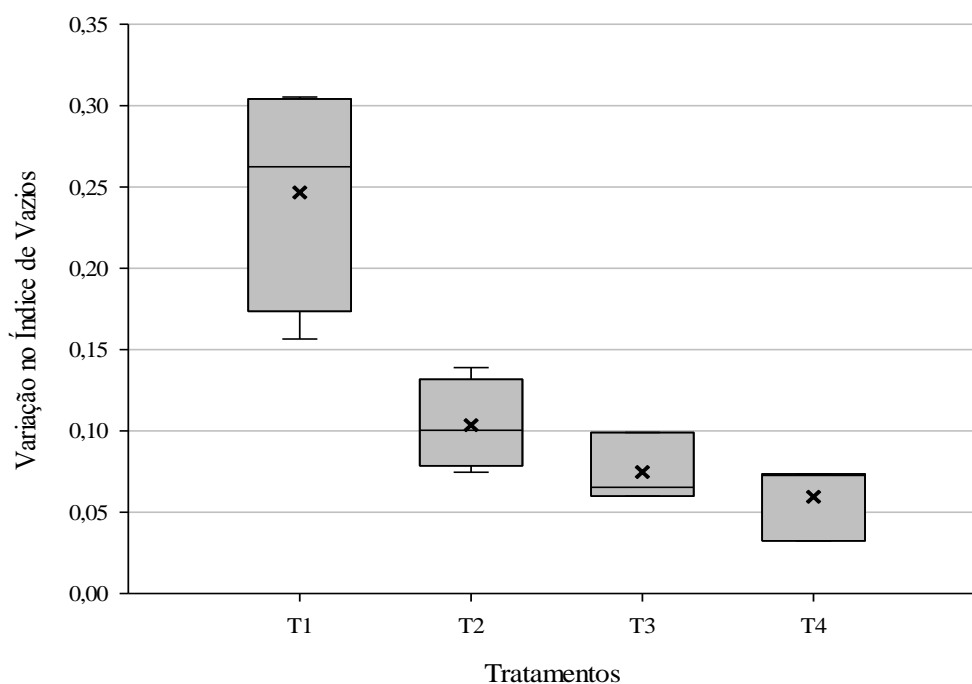
Quando avaliado o comportamento mecânico do solo, observa-se que também houve alteração pelo pisoteio animal, sendo que o índice de compressibilidade cíclica tem relação inversa com a intensidade de pastejo. No T4 (Figura 10) foram encontrados os menores valores, isso devido ao fato do solo já se encontrar em estado de compactação mais avançado, o que faz com esse índice tenha valores menores, dessa forma conforme reduz a intensidade de pastejo há aumento no índice de compressibilidade. Peth e Horn, (2006) encontraram correlação negativa do índice de compressibilidade cíclica com a densidade do solo, e positiva com a porosidade do solo.

Figura 10 – Coeficiente de compressibilidade de um Latossolo Vermelho submetido a quatro intensidades de pastejo.



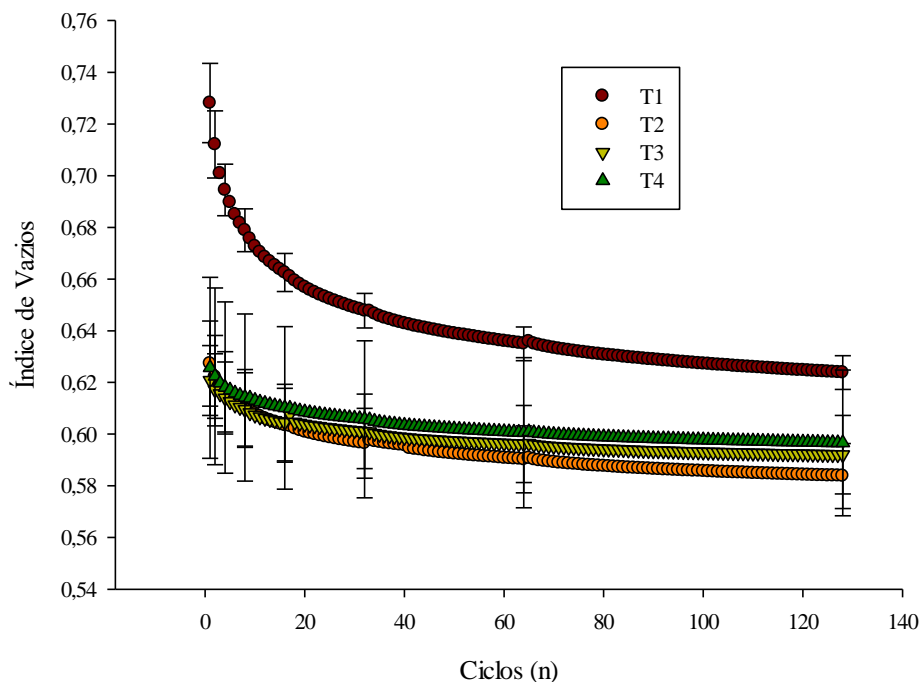
O índice de vazios teve menor variação onde houve pastejo (Figura 11), isso é resultado do histórico de cargas aplicadas previamente nestas áreas, o que acarretou em deformações plásticas prévias ao teste de compressibilidade cíclica, dessa forma quando foram realizados os testes, o valor de deformações plásticas foi reduzindo em função do aumento da intensidade de pastejo. Outro fato é que na intensidade T1 tem maior número de poros grandes, como visto nas Figuras 7 e 8, isso possibilita que se tenha variação maior do índice de vazios, já que na intensidade mais alta, T4, não há essa variação pronunciada.

Figura 11 – Variação do índice de vazios de um Latossolo Vermelho submetido a quatro intensidades de pastejo.



Essa elevada variação do índice de vazios nos alerta o quanto este solo nestas condições é suscetível a compactação, tendo em vista que no T1 houve uma redução muito mais acentuada que as intensidades onde houve pastejo prévio. Apesar do índice de vazios no T1 ser maior no início do teste do que nas áreas onde houve pisoteio (Figura 12), após 64 ciclos de carregamentos essa diferença já não é mais significativa quanto ao índice de vazios nas diferentes intensidades de pastejo.

Figura 12 – Variação do índice de vazios nos diferentes ciclos de carregamento.



A porosidade do solo foi afetada pelo pastejo, fato esse evidenciado tanto quando avaliamos a porosidade estimada pela tomografia (Tabela 4), bem como quando avaliamos a porosidade avaliada pelo método tradicional, avaliando a porosidade total e macroporosidade. Bonetti et al. (2015) e Iglesias et al. (2014) avaliando a influência do pastejo sobre as propriedades físicas do solo constataram que o pisoteio animal acarreta em redução da porosidade total. Assim como a densidade do solo, onde os menores valores foram encontrados nos tratamentos em que houve pisoteio, não havendo diferença entre as intensidades de pastejo, a diferença ocorre apenas com relação ao T1.

A porosidade determinada pela tomografia computadorizada (Porosidade CT) abrange poros maiores que 0,0048 cm de diâmetro, poros responsáveis principalmente pelo fluxo de água no solo, essenciais para que ocorra a infiltração de água no solo, bem como o transporte e armazenamento de água em camadas sub superficiais, fazendo com que dessa forma o solo cumpra sua funcionalidade ambiental no ciclo hidrológico

Tabela 4 – Média dos valores de porosidade calculada em voxel a partir das imagens (Porosidade CT), porosidade estimada a partir da amostra utilizada para compressibilidade cíclica (PT), Densidade do solo (DS), macro porosidade (macro), microporosidade (micro) e permeabilidade do solo ao ar (Kar).

	Porosidade CT (m ³ m ⁻³)	PT (m ³ m ⁻³)	DS (Mg m ⁻³)	MACRO (m ³ m ⁻³)	MICRO (m ³ m ⁻³)	KAR (Log(μm ²))
T1	0,13 B	0,48 A	1,38 B	0,14 A	0,34 B	1,20 A
T2	0,07 A	0,42 B	1,55 A	0,05 B	0,37 A	-0,18 AB
T3	0,07 A	0,42 B	1,56 A	0,05 B	0,37 A	0,32 AB
T4	0,06 A	0,41 B	1,58 A	0,04 B	0,36 AB	-0,60 B

* T1 é a intensidade de pastejo 0% de consumo da forragem, T2 é a intensidade de pastejo 30% de consumo da forragem, T3 é a intensidade de pastejo 50% de consumo da forragem, T4 é a intensidade de pastejo 80% de consumo da forragem, médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade de erro.

A permeabilidade do solo ao ar está intimamente correlacionada com a porosidade do solo (Tabela 5), dessa forma como houve efeito do pisoteio sobre a porosidade, isso repercutiu diretamente na permeabilidade do solo ao ar. Schjønning et al. (2013) avaliaram a rede de poros por meio de tomografia computadorizada e verificaram que a compactação tem grande efeito sobre o volume de poros bloqueados, o que causa grande redução no potencial de aeração. Essa relação entre a permeabilidade e porosidade é confirmada quando observamos os dados na Tabela 5, referente a correlação de Pearson das variáveis analisadas, quando avaliamos a correlação entre a CT Porosity e a permeabilidade do solo ao ar a mesma é de 0,63, já quando comparamos com a PT ou com a macro essa correlação é superior a 0,80, que embora a CT Porosity abranja apenas poros maiores que 0,0048 cm, estes estão contabilizados tanto na macro quanto na porosidade total do solo.

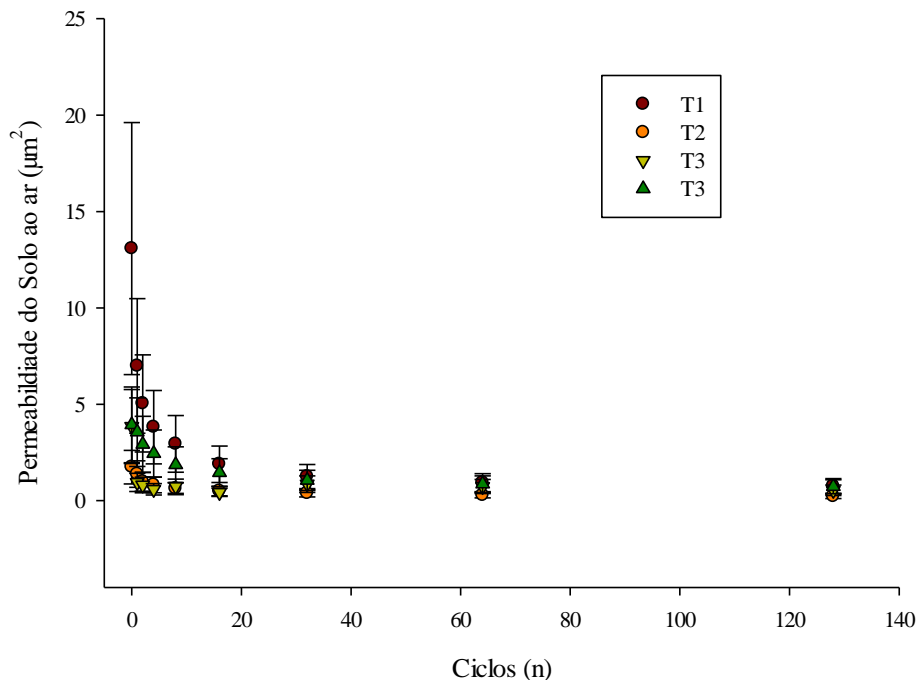
O índice Cn se mostrou um bom indicador da qualidade física do solo, visto a alta correlação, acima de 0,90, com outros atributos do solo como a densidade, porosidade total e macro porosidade atributos estes já consagrados como indicadores da qualidade física do solo. Alves et al. (2007) e Cherubin et al. (2015) ao avaliar indicadores da qualidade física do solo relatam que a densidade do solo, porosidade total e macroporosidade são indicadores da qualidade física do solo passíveis de serem utilizados.

Tabela 5 – Correlação de Pearson das diferentes variáveis mensuradas nos diferentes tratamentos.

	CT Porosity	PT	DS	Macro	Micro	Kar	Euler_26	Cn
CT Porosity	1	0,83038	-0,83038	0,82129	-0,74397	0,63529	-0,64048	-0,93526
		0,0001	0,0001	0,0002	0,0015	0,0109	0,0101	<0,0001
PT		1	-1	0,9879	-0,89256	0,80047	-0,68922	-0,94873
			<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0003	0,0045	<0,0001
DS			1	-0,9879	0,89256	-0,80047	0,68922	0,94873
				<0,0001	<0,0001	0,0003	0,0045	<0,0001
Macro				1	-0,95171	0,80064	-0,65463	-0,94872
					<0,0001	0,0003	0,0081	<0,0001
Micro					1	-0,74312	0,53887	0,87789
						0,0015	0,0382	<0,0001
Kar						1	-0,79494	-0,75498
							0,0004	0,0018
Euler_26							1	0,74713
								0,0021
Cn								1

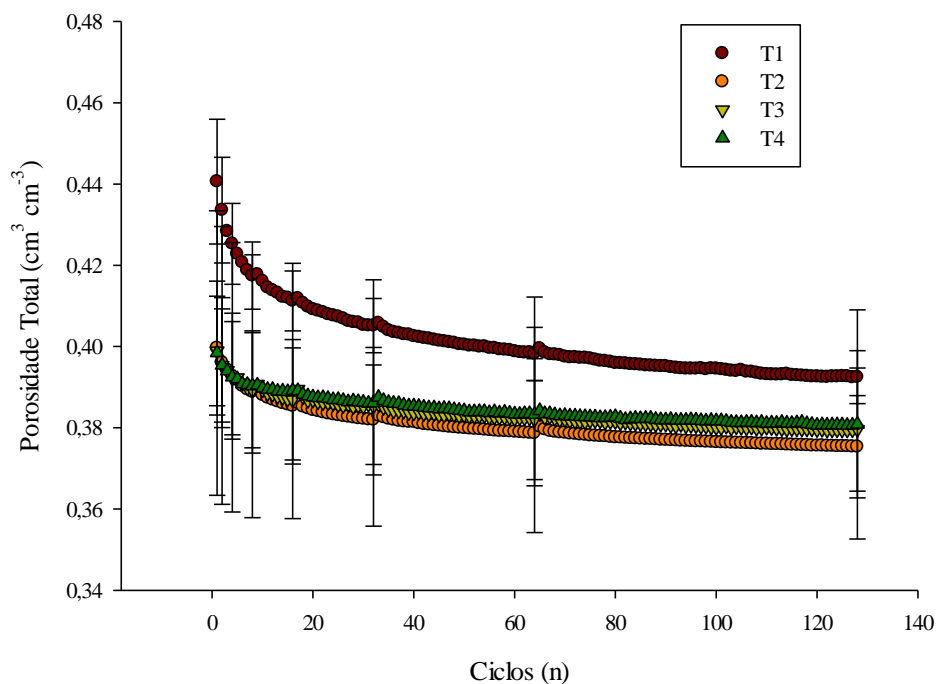
A permeabilidade do solo ao ar sofreu grande influência dos ciclos de carregamento (Figura 13), após o término do primeiro ciclo já não houve mais diferença significativa entre os tratamentos. Essa diferença não aparece principalmente em virtude do grande coeficiente de variância entre os resultados, porém a diferença numérica entre as intensidades de pastejo avaliadas se mantém após 32 ciclos de carregamento, após esses ciclos a diferença entre as intensidades de pastejo já são praticamente inexistentes, bem como a diferença entre os ciclos de carregamento, as quais a partir do 32 ciclo tendem a um valor constante, e próximo a zero.

Figura 13 - Permeabilidade do solo ao ar em função dos números de ciclos de carregamento.



O resultado da permeabilidade do solo ao ar ter pouca variação a partir do 32º ciclo de carregamento se dá em função de haver pouca variação da porosidade total em função dos ciclos de pastejo. Na Figura 14 é possível verificar que a porosidade total sofre grande redução nos primeiros 16 ciclos de carregamento, e a partir do 32º passa a ser praticamente constante. Nas intensidades mais altas, T3 e T4, a partir do 16º ciclo a redução da porosidade passa a ser pouco expressivo, os valores observados tendem a um valor constante. Já na intensidade T1 e T2 a maior redução da porosidade total também ocorre nos primeiros 16 ciclos, porém, a partir daí é possível verificar que a redução da porosidade total ocorre em menor magnitude. Esse resultado está vinculado ao fato que nas intensidades T3 e T4 já receberam um histórico de cargas previamente ao ensaio, já nas intensidades T1 e T2 essas cargas não chegaram ao ponto de acarretar na estabilização do processo de adensamento.

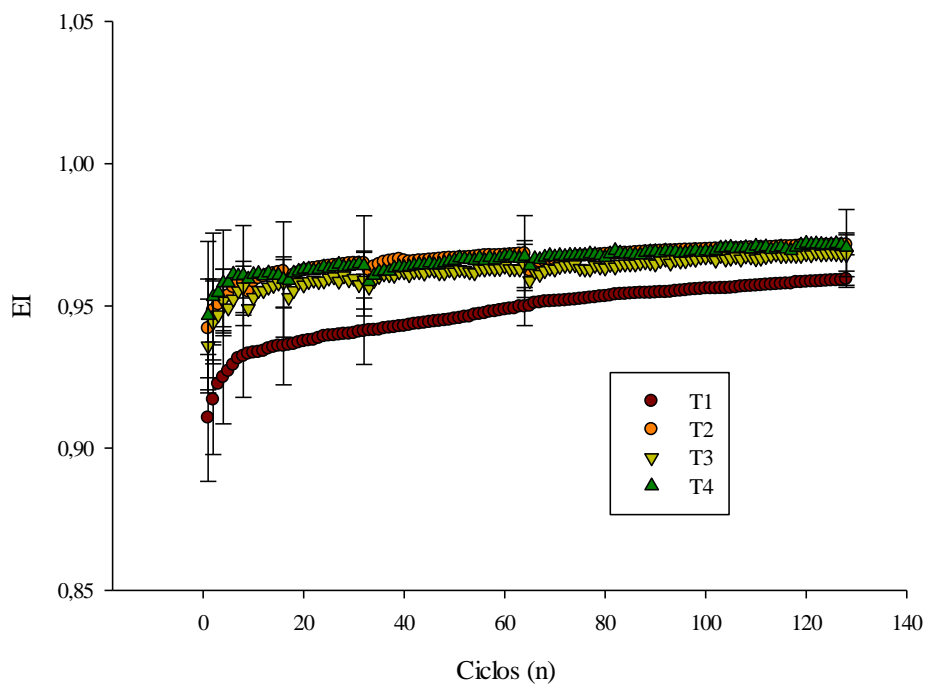
Figura 14 – Porosidade total do solo em função dos números de ciclos de carregamento.



O índice de elasticidade não foi afetado significativamente pelas intensidades de pastejo (Figura 15). De maneira geral o índice de elasticidade é menor nos primeiros carregamentos em virtude de ocorrer as deformações mais pronunciadas nessa fase do processo de adensamento, com o andamento do ensaio de compressibilidade cíclica as deformações plásticas tendem a ser menores e constantes, predominando as deformações elásticas, ou seja, a deformação no carregamento e descarregamento tendem a serem as mesmas.

A intensidade de pastejo T1 apresenta menor índice de elasticidade quando comparado com as demais intensidades, resultado de que nas demais intensidades quando realizado o pastejo, o pisoteio animal promoveu a uma quantidade grande de deformações elásticas, fato esse que não houve na intensidade T1, vindo por ocorrer apenas após o início do ensaio de compressibilidade cíclica.

Figura 15 – Índice de elasticidade em função dos ciclos de carregamento.



6.2 COMPACTAÇÃO E RESILIÊNCIA

As diferentes intensidades de pastejo têm grande influência nos atributos físicos do solo, com o aumento da intensidade fica evidente o aumento do estado de compactação. Na tabela 6 pode ser observado que mesmo em intensidades de pastejo consideradas baixas é possível verificar aumento da densidade do solo principalmente nas camadas superficiais do solo. Com o aumento da profundidade esse efeito do pisoteio vai reduzindo, na camada de 15-20 cm o efeito do pisoteio animal já é pouco pronunciado. Resultados semelhantes a esse foram encontrados por Lamandé et al. (2017) e Pilon et al. (2017), em que os autores relatam aumento da densidade do solo e da resistência a penetração, bem como a redução da porosidade total, acarretadas pelo pisoteio bovino, principalmente nas camadas superficiais do solo.

Ao avaliarmos os resultados de densidade e porosidade no tempo é possível observar que praticamente não ocorreu variação dos valores de densidade do solo, com exceção das camadas subsuperficiais, diferente do que era esperado, pois na camada superficial a atividade biológica tende a ser mais pronunciada e os ciclos de umedecimento e secagem também são mais amplos. Como esperado no tratamento sem pastejo não houve essa variação no tempo, pois não houve diferença entre os diferentes tempos de exclusão. O que evidencia uma certa estabilidade do sistema.

Apesar da recuperação no tempo não ter sido significativa estatisticamente na camada superficial (0-5 cm), a mesma pode ser percebida quando avaliamos a amplitude de variação da densidade do solo entre as intensidades de pastejo, que nos tempos 270 e 360 o T1 e T2 já passam ser iguais estatisticamente, bem como o T2, T3 e T4 também passam a ser iguais. Na maior intensidade (T4), na camada superficial foram obtidos valores de até $1,51 \text{ Mg m}^{-3}$, já na camada subsequente há uma redução nos valores, sendo que o máximo valor obtido foi de $1,48 \text{ Mg m}^{-3}$, que embora seja um valor menor, ainda fica na faixa dos valores considerados como limitantes por muitos autores. Moraes et al. (2011) avaliando um Latossolo com 73% de argila encontraram que o valor de densidade crítica é de $1,34 \text{ Mg m}^{-3}$, já Kaiser et al. (2009) também avaliando um Latossolo com teores de argila similares aos da área onde foi conduzido o presente estudo encontraram valores críticos de $1,40 \text{ Mg m}^{-3}$.

Tabela 6 – Média dos valores de densidade do solo (Mg m^{-3}) em um Latossolo Vermelho, manejado sob diferentes intensidades de pastejos, em quatro profundidades em cinco tempos após exclusão do pastejo.

TEP*	Profundidade (cm)				Média
	0-5				
	T1	T2	T3	T4	
0	1,29 C a	1,37 B a	1,37 B b	1,49 A a	1,38
90	1,26 C a	1,35 B a	1,47 A a	1,51 A a	1,40
180	1,28 C a	1,38 B a	1,47 A a	1,44 AB a	1,39
270	1,28 B a	1,40 AB a	1,44 A ab	1,50 A a	1,40
360	1,30 B a	1,38 AB a	1,43 A ab	1,48 A a	1,40
Média	1,28	1,38	1,44	1,48	
5-10					
0	1,33 B a	1,38 B a	1,37 B b	1,46 A ab	1,39
90	1,33 A a	1,44 B a	1,41 B b	1,45 B ab	1,41
180	1,39 B a	1,40 B a	1,48 A a	1,48 A a	1,43
270	1,34 B a	1,41 AB a	1,43 AB ab	1,46 A ab	1,41
360	1,37 B a	1,45 A a	1,43 A ab	1,43 A b	1,42
Média	1,35	1,41	1,42	1,45	
10-15					
0	1,40 AB a	1,36 B b	1,39 AB b	1,44 A ab	1,39
90	1,38 B a	1,45 A a	1,47 A b	1,44 A ab	1,44
180	1,38 A a	1,41 A ab	1,43 A ab	1,44 A ab	1,41
270	1,36 B a	1,39 AB ab	1,41 AB ab	1,46 A a	1,40
360	1,34 B a	1,36 AB b	1,42 A ab	1,40 AB b	1,38
Média	1,37	1,39	1,42	1,44	
15-20					
0	1,41 A a	1,35 B a	1,35 B b	1,39 AB ab	1,37
90	1,36 B ab	1,37 AB a	1,42 A a	1,40 AB ab	1,39
180	1,37 A ab	1,39 A a	1,42 A a	1,44 A a	1,40
270	1,40 A a	1,37 A a	1,38 A ab	1,39 A ab	1,39
360	1,30 B b	1,37 A a	1,39 A ab	1,35 AB b	1,35
Média	1,37	1,37	1,39	1,39	

*Tempo de Exclusão do Pastejo; T1 é a intensidade de pastejo 0% de consumo da forragem, T2 é a intensidade de pastejo 30% de consumo da forragem, T3 é a intensidade de pastejo 50% de consumo da forragem, T4 é a intensidade de pastejo 80% de consumo da forragem, médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e seguidas de mesma letra minúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

Na profundidade de 10-15, embora de forma menos pronunciada ainda é possível visualizar o efeito do pisoteio sob os valores de densidade do solo, principalmente no T4 onde a intensidade de pastejo foi mais elevada, resultando em maior valor de densidade

do solo, Iglesias et al. (2014) relatam que o pisoteio animal pode causar danos ao solo até 15 centímetros de profundidade.

O efeito é ainda menos pronunciado na profundidade de 15-20 cm. Essa variação pode ser apenas em virtude da ação do escarificador ter sido de em média 20 cm, sendo que esta pode não ter sido homogênea em toda a área das parcelas, acarretando nas variações observadas.

Com relação a porosidade total (Tabela 7) os resultados obtidos foram semelhantes aos encontrados na densidade do solo. Com o aumento da intensidade de pastejo há uma redução significativa na porosidade total, principalmente na camada superficial do solo (0-5 cm).

Nas camadas subsuperficiais também acontece essa alteração na porosidade total, porém menos pronunciada quando comparada com a profundidade de 0-5 cm. Essa maior diferença que ocorre entre as intensidades de pastejo é mais clara logo após a exclusão do pastejo, ou seja, no tempo 0 (zero).

Para a camada superficial, após 180 dias após a exclusão do pastejo as diferenças da porosidade total começam a reduzir, resultado da recuperação estrutural do solo, que acarretou no incremento da porosidade total principalmente nos tratamentos onde houve maior intensidade de pastejo. Aos 270 dias após a exclusão do pastejo nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm, os tratamentos T1 e T2 já não apresentam mais diferença estatística entre si.

Ao avaliarmos a porosidade total no tempo, a recuperação estrutural do solo ficou mais clara, há incremento nos valores de porosidade total com o decorrer do tempo, isso tanto na camada superficial (0-5 cm) quanto em sub-superfície, na camada 5 - 10 cm. Na maior intensidade de pastejo (T4) na qual a recuperação estrutural do solo foi estatisticamente significativa, pois há aumento na porosidade total, sendo estatisticamente significativo já após 180 dias de exclusão do pastejo, o que nos remete a planejar os períodos de pastejo com períodos de pousio e assim seja possível a recuperação estrutural destas áreas. Drewry et al. (2004) relatam aumento da porosidade total e redução da densidade após a exclusão de pastejo. Esse incremento na porosidade total pode ser atribuído a atividade biológica, principalmente o crescimento radicular da cultura que fez com que houvesse recuperação da porosidade do solo (RUPOLLO, 2016).

Tabela 7 – Média dos valores de Porosidade total ($m^{-3} m^3$) em um Latossolo Vermelho, manejado sob diferentes intensidades de pastejos, em quatro profundidades em cinco tempos após exclusão do pastejo.

TEP*	Profundidade (cm)				Média
	0-5				
	T1	T2	T3	T4	
0	0,51 A b	0,48 B a	0,48 B a	0,44 C bc	0,48
90	0,52 A ab	0,49 B a	0,45 C b	0,43 C c	0,47
180	0,55 A a	0,51 B a	0,50 B a	0,50 B a	0,51
270	0,54 A ab	0,51 AB a	0,49 B a	0,48 B a	0,51
360	0,52 A ab	0,50 AB a	0,48 B a	0,47 B ab	0,49
Média	0,53	0,50	0,48	0,46	
	5-10				
0	0,50 A a	0,48 A cb	0,48 A a	0,45 B b	0,48
90	0,50 A a	0,46 B c	0,47 B a	0,45 B b	0,47
180	0,52 A a	0,52 A a	0,47 A a	0,49 A a	0,50
270	0,52 A a	0,50 AB ab	0,48 B a	0,48 B a	0,49
360	0,51 A a	0,49 B bc	0,49 B a	0,48 B a	0,49
Média	0,51	0,49	0,48	0,47	
	10-15				
0	0,47 AB a	0,49 A a	0,48 AB b	0,46 B b	0,47
90	0,48 A a	0,45 B b	0,45 B c	0,46 B b	0,46
180	0,49 A a	0,51 A a	0,50 A a	0,50 A a	0,50
270	0,51 A a	0,51 A a	0,49 AB ab	0,48 B a	0,50
360	0,50 AB a	0,51 A a	0,47 B b	0,48 AB a	0,49
Média	0,49	0,49	0,48	0,48	
	15-20				
0	0,46 B c	0,49 A a	0,49 A ab	0,47 AB b	0,48
90	0,49 A bc	0,48 AB a	0,46 B b	0,47 AB b	0,48
180	0,54 A a	0,49 AB a	0,51 AB a	0,48 B ab	0,51
270	0,51 A ab	0,50 A a	0,51 A a	0,51 A a	0,51
360	0,52 A ab	0,49 BC a	0,48 C ab	0,51 AB a	0,50
Média	0,50	0,49	0,49	0,49	

*Tempo de Exclusão do Pastejo; T1 é a intensidade de pastejo 0% de consumo da forragem, T2 é a intensidade de pastejo 30% de consumo da forragem, T3 é a intensidade de pastejo 50% de consumo da forragem, T4 é a intensidade de pastejo 80% de consumo da forragem, médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e seguidas de mesma letra minúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

Assim como nas camadas superficiais, no T4, nas camadas de 10-15 e 15-20 cm a recuperação estrutural também pode ser percebida após 180 dias de exclusão do pastejo, em todas as áreas em que houve pastejo. Essa recuperação não foi tão expressiva a ponto de resultar no incremento para que os valores de porosidade total fossem iguais a área

sem pastejo (T1), embora essa recuperação não tenha sido tão expressiva, há aumento da porosidade total.

Avaliando os resultados de macroporosidade (Tabela 8) se confirma o efeito degradante do pisoteio bovino, nas maiores intensidades de pastejo (T3 e T4) ocorre aumento do estado de compactação do solo, evidenciado pela redução da macroporosidade, esse efeito compactante se perpetua até a profundidade de 10-15 cm. Resultado do processo de compactação do solo que afeta em maior intensidade os poros de maior diâmetro do solo. O efeito do pisoteio é mais pronunciado nas camadas superficiais do solo (0-5 e 5-10 cm), em que mesmo em intensidades de pastejo baixas acarretam em redução da macroporosidade a condições consideradas restritivas, menores que $0,10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (REICHERT et al., 2003; BAQUERO et al., 2012).

Quando avaliado no decorrer do tempo, a recuperação da macroporosidade é significativa a partir dos 90 dias em todas as áreas em que houve pisoteio bovino, alcançado valores muito próximos ou até mesmos superiores aos considerados como adequados para trocas gasosas e o desenvolvimento de plantas. A partir disso podemos inferir que apesar de estarmos avaliando um solo com baixa quantidade de argilominerais expansivos, e com altos teores de óxidos, o mesmo apresenta outros mecanismos de recuperação além da expansão e contração gerada pelos ciclos de umedecimento e secagem. Possivelmente pelo fato das avaliações terem sido iniciadas no inverno, período no qual a pastagem entra em dormência e a ocorrência de morte de uma quantidade significativa de raízes, contribuindo para que, dessa forma ocorresse o aumento de macroporosidade, Barros (2015) avaliando o acúmulo de massa seca radicular de pastagens nas diferentes estações do ano, observou uma redução na massa de raízes no período invernal. Ainda, Reszkowska et al. (2011) avaliando a recuperação estrutural do solo com a exclusão do pastejo, relatam que o processo de recuperação depende do clima e das principais espécies de plantas, que levarão a uma recuperação mais ou menos pronunciada da estrutura do solo.

Tabela 8 – Média dos valores de macroporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) em um Latossolo Vermelho, manejado sob diferentes intensidades de pastejos, em quatro profundidade em cinco tempos épocas após exclusão do pastejo.

TEP*	Profundidade (cm)				Média
	0-5				
	T1	T2	T3	T4	
0	0,13 A b	0,07 B c	0,07 BC b	0,03 C b	0,07
90	0,19 A a	0,15 A a	0,09 B ab	0,08 B a	0,13
180	0,15 A b	0,11 B abc	0,08 C ab	0,08 C a	0,11
270	0,20 A a	0,13 B ab	0,11 B a	0,11 B a	0,14
360	0,15 A a	0,10 B bc	0,08 B ab	0,08 B a	0,10
Média	0,16	0,12	0,08	0,08	
	5-10				
0	0,12 A bc	0,08 B b	0,08 B b	0,05 B c	0,08
90	0,16 A ab	0,11 B ab	0,12 B a	0,11 B a	0,12
180	0,11 AB c	0,12 A ab	0,09 AB b	0,08 B b	0,10
270	0,16 A a	0,14 AB a	0,10 B ab	0,10 B ab	0,13
360	0,12 A abc	0,08 B b	0,10 AB ab	0,10 AB ab	0,10
Média	0,13	0,10	0,10	0,09	
	10-15				
0	0,08 AB b	0,11 A b	0,07 B b	0,06 B b	0,08
90	0,15 A a	0,10 B b	0,08 B b	0,11 B a	0,11
180	0,13 A ab	0,11 AB b	0,10 AB b	0,09 B a	0,11
270	0,16 A a	0,15 A a	0,13 AB a	0,11 B a	0,14
360	0,12 A ab	0,13 A ab	0,10 A b	0,10 A a	0,11
Média	0,13	0,12	0,10	0,10	
	15-20				
0	0,08 A b	0,09 A b	0,10 A ab	0,07 A b	0,08
90	0,15 A a	0,14 AB a	0,12 B ab	0,12 B a	0,13
180	0,12 A a	0,12 A ab	0,10 AB ab	0,08 B b	0,11
270	0,14 A a	0,14 A a	0,13 A a	0,12 A a	0,13
360	0,13 A a	0,11 A ab	0,09 B b	0,12 A a	0,11
Média	0,12	0,12	0,11	0,10	

*Tempo de Exclusão do Pastejo; T1 é a intensidade de pastejo 0% de consumo da forragem, T2 é a intensidade de pastejo 30% de consumo da forragem, T3 é a intensidade de pastejo 50% de consumo da forragem, T4 é a intensidade de pastejo 80% de consumo da forragem, médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e seguidas de mesma letra minúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

Outro fato importante da recuperação estrutural por intervenção biológica e não pela ação de equipamentos descompactadores, como subsoladores, escarificadores e arados, é, apesar dessa recuperação ser mais lenta a mesma apresenta maior persistência dos poros formados, pois mesmo decorrido um longo período o volume de poros maior

que 50 μm continuam com valores semelhantes aos observados 90 dias após a exclusão do pastejo, em todas as camadas e em todas as profundidades.

Fidalski et al., (2015) avaliando sistema plantio direto encontraram que a escarificação teve efeito efêmero por apenas seis meses, e Colussi et al. (2014) avaliando o efeito da escarificação em pastagem cultivada encontraram que a duração foi inferior a nove meses. A formação e manutenção da porosidade do solo é fundamental para um bom crescimento e desenvolvimento de plantas, pois tem influência direta no fluxo de água e nutrientes bem como nas trocas gasosas que ocorrem no solo. Dessa forma torna-se crucial para a conservação da qualidade estrutural do solo, o planejamento das atividades nas propriedades, seja pelo aumento do intervalo na entrada dos animais nas áreas, ou pela adoção da colheita mecanizada, tendo em vista que autores como Nascimento et al. (2017) relatam que a colheita mecanizada da forragem causa menos dano ao solo quando comparada com o pastejo dos animais.

Na tabela 9 estão os valores de microporosidade, a qual também sofre efeitos do pisoteio animal. Há aumento nos valores de microporos com o aumento da intensidade de pastejo, isso devido a pressão gerada pelo pisoteio animal resultar na redução do tamanho dos poros, ou seja, a transformação dos macroporos em microporos.

O efeito do pisoteio sobre a microporosidade é evidenciado até a profundidade de 10- 15 cm, onde é possível observar diferença entre as intensidades de pastejo, principalmente no tempo zero, logo após o pastejo, na camada superficial o efeito é ainda mais significativo, a amplitude entre o T1 e o T4 é de $0,04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, maior amplitude observada em todas as camadas e todas as épocas de avaliação.

A exclusão do pastejo repercutiu na redução da microporosidade, na camada de 0-5 cm houve redução significativa estatisticamente entre os diferentes tempos de exclusão, quanto maior a intensidade de pastejo maior é amplitude dos valores observados entre a coleta logo após o pastejo e 360 dias após a exclusão. O T4 apresentou variação de $0,03 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, entre a primeira e última avaliação, esse efeito se repete nas profundidades de 5-10 e 10-15 cm, embora com amplitude menor.

Tabela 9 – Média dos valores de Microporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) em um Latossolo Vermelho, manejado sob diferentes intensidades de pastejos, em quatro profundidade em cinco tempos após exclusão do pastejo.

TEP*	Profundidade (cm)				Média
	0-5				
	T1	T2	T3	T4	
0	0,38 B ab	0,41 A a	0,42 A a	0,42 A a	0,41
90	0,33 A d	0,34 A c	0,36 A c	0,35 A c	0,34
180	0,40 B a	0,41 B a	0,43 A a	0,42AB a	0,41
270	0,35 B cd	0,37 A b	0,38 A bc	0,38 A b	0,37
360	0,37 B bc	0,39 AB ab	0,40 A ab	0,39 AB b	0,39
Média	0,37	0,38	0,40	0,39	
	5-10				
0	0,38 B ab	0,40 A a	0,40 A a	0,40 A a	0,40
90	0,34 A c	0,35 A b	0,35 A b	0,34 A c	0,34
180	0,40 A a	0,40 A a	0,39 A ab	0,41 A a	0,40
270	0,36 A bc	0,36 A b	0,38 A ab	0,38 A b	0,37
360	0,39 AB a	0,40 A a	0,38 AB ab	0,38 B b	0,39
Média	0,37	0,38	0,38	0,38	
	10-15				
0	0,39 BC a	0,38 C ab	0,41 A a	0,40 AB ab	0,39
90	0,33 B b	0,36 A c	0,36 A cd	0,35 AB d	0,35
180	0,37 A ab	0,40 Aa	0,40 A ab	0,41 A a	0,39
270	0,36 AB ab	0,35 B c	0,36 AB d	0,37 A c	0,36
360	0,39 A a	0,38 A b	0,38 A bc	0,38 A bc	0,38
Média	0,37	0,37	0,38	0,38	
	15-20				
0	0,39 A a	0,40 A a	0,40 A ab	0,40 A a	0,40
90	0,33 A c	0,34 A d	0,35 A c	0,35 A b	0,34
180	0,40 AB a	0,37 B bc	0,41 A a	0,40 AB a	0,40
270	0,36 B b	0,36 B cd	0,37 AB bc	0,38 A a	0,37
360	0,39 A a	0,38 B b	0,39 AB ab	0,38 AB a	0,39
Média	0,38	0,37	0,38	0,39	

*Tempo de Exclusão do Pastejo; T1 é a intensidade de pastejo 0% de consumo da forragem, T2 é a intensidade de pastejo 30% de consumo da forragem, T3 é a intensidade de pastejo 50% de consumo da forragem, T4 é a intensidade de pastejo 80% de consumo da forragem, médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e seguidas de mesma letra minúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

A condutividade hidráulica do solo saturado (Tabela 10) foi influenciada pelo pisoteio animal, com o aumento da intensidade de pastejo houve redução da condutividade hidráulica do solo saturado. Resultados semelhantes foram encontrados por Pietola et al. (2005) e Tuffuor et al. (2014), ao avaliarem o efeito do pisoteio animal

sobre estes atributos em solo, os autores relatam severa redução no fluxo de água no solo, acarretada pelo pisoteio animal. Rasa e Horn, (2013) avaliando diferentes sistemas de manejo relatam que o pisoteio animal tem efeito degradante sobre a estrutura o que resulta em alteração das propriedades hidráulicas do solo saturado principalmente por alterar não só a quantidade, mas também a conectividade dos poros do solo.

Tabela 10 – Média dos valores de condutividade Hidráulica do Solo Saturado ($\text{Log}_{10}(\text{mm h})$) em um Latossolo Vermelho, manejado sob diferentes intensidades de pastejos, em quatro profundidades em cinco tempos após exclusão do pastejo

	Profundidade (cm)				
	0-5				Média
	T1	T2	T3	T4	
0	2,00 A a	1,31 AB ab	1,77 AB a	0,87 B a	1,49
90	1,96 A a	1,66 A ab	0,97 A a	0,73 A a	1,33
180	2,22 A a	1,90 AB a	0,96 C a	1,22 BC a	1,58
270	2,11 A a	1,88 A a	1,61 A a	1,13 A a	1,68
360	2,05 A a	0,91 B b	0,62 B a	0,89 B a	1,12
Média	2,07	1,53	1,19	0,97	1,44
	5-10				
0	1,64 A ab	1,50 A a	0,87 AB a	0,60 B b	1,15
90	1,90 A ab	1,41 A a	1,41 A a	1,10 A b	1,46
180	1,88 A ab	1,76 A a	1,32 AB a	0,88 B b	1,46
270	2,27 A a	1,77 A a	1,75 A a	1,93 A a	1,93
360	1,16 A b	1,33 A a	1,05 A a	1,26 A ab	1,20
Média	1,77	1,56	1,28	1,15	1,44
	10-15				
0	1,41 A a	1,79 A ab	1,50 A ab	1,05 A a	1,44
90	1,40 A a	0,96 A b	1,15 A b	1,16 A a	1,17
180	1,79 A a	1,65 A ab	1,53 A ab	1,49 A a	1,62
270	2,17 A a	1,98 A a	2,22 A a	1,71 A a	2,02
360	1,31 A a	1,28 A ab	1,33 A b	1,32 A a	1,31
Média	1,62	1,53	1,55	1,34	1,51
	15-20				
0	0,79 A b	1,29 A a	1,12 A b	0,77 A a	0,99
90	1,58 A ab	1,49 A a	1,39 A ab	1,06 A a	1,38
180	1,80 A a	1,47 A a	1,45 A ab	1,15 A a	1,47
270	2,18 A a	2,20 A a	1,96 AB a	1,45 B a	1,95
360	1,48 A ab	1,29 A a	1,19 A ab	1,50 A a	1,37
Média	1,57	1,55	1,42	1,19	1,43

*Tempo de Exclusão do Pastejo; T1 é a intensidade de pastejo 0% de consumo da forragem, T2 é a intensidade de pastejo 30% de consumo da forragem, T3 é a intensidade de pastejo 50% de consumo da forragem, T4 é a intensidade de pastejo 80% de consumo da forragem, médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e seguidas de mesma letra minúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

O maior efeito do pisoteio animal sobre a condutividade hidráulica do solo saturado se repercute nas camadas superficiais (0-5 e 5-10 cm), principalmente em virtude da redução da macroporosidade. A partir da profundidade de 10-15 cm, não é mais significativo o efeito do pisoteio sobre a condutividade hidráulica do solo saturado, resultado este também vinculado a macroporosidade, que sofreu menor redução nestas camadas (Tabela 8), e essa pequena redução na macroporosidade não foi suficiente para que houvesse redução significativa na condutividade hidráulica do solo saturado.

A recuperação da condutividade hidráulica do solo saturado no tempo não teve variação significativa na camada superficial (0-5 cm). Já na profundidade de 5-10 cm, após 270 dias da exclusão do pastejo é evidenciada a recuperação da condutividade hidráulica do solo saturado, que no T4 há aumento estatisticamente significativo dos valores. Embora apenas no T4 há diferença significativa em função do tempo de exclusão do pastejo, se avaliarmos a diferença entre as médias das diferentes intensidades de pastejo em cada um dos tempos de exclusão é possível ver que as diferenças entre as intensidades de pastejo reduzem no tempo, o que significa que há recuperação estrutural, que embora não seja significativa, esse aumento da condutividade se repercute na redução das diferenças entre as intensidades de pastejo.

O aumento das intensidades de pastejo reduziram a porosidade do solo e também reduziram a permeabilidade do solo ao ar -6 kPa (Tabela 11), conforme há aumento na intensidade de pastejo há redução da permeabilidade, principalmente nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm. Ambus, (2016) avaliando sistemas de integração lavoura pecuária, encontrou valores bastante reduzidos nas áreas em que houve pastejo, mesmo nas intensidades consideradas baixas, quando comparado com as áreas sem pastejo.

Nas camadas mais profundas, 10-15 e 15-20 cm, embora tenham acarretado alterações na porosidade do solo, essa não foi suficiente para repercutir significativamente na Kar à -6 kPa. Isso em parte devido ao grande coeficiente de variação que essa variável apresenta e parte em essa ser uma variável de intensidade, a qual é bastante dinâmica e não depende unicamente do volume de poros, mas depende também de tamanho, conectividade, tortuosidade dos poros do solo.

Tabela 11 – Média dos valores de Permeabilidade do solo ao ar ($\text{Log}_{10}(\text{Kar} -6 \text{ kPa}+1)$) em um Latossolo Vermelho, manejado sob diferentes intensidades de pastejos, em quatro profundidades em cinco tempos épocas após exclusão do pastejo.

Profundidade (cm)					
0-5					Média
	T1	T2	T3	T4	
0	1,11 A a	0,58 AB a	1,09 A a	0,18 B a	0,74
90	1,28 A a	1,15 AB a	0,32 BC a	0,26 C a	0,75
180	1,36 A a	0,88 AB a	0,21 B a	0,40 B a	0,71
270	1,64 A a	1,10 AB a	0,76 AB a	0,49 B a	1,00
360	1,41 A a	0,52 B a	0,29 B a	0,59 B a	0,70
Média	1,36	0,85	0,53	0,38	0,78
5-10					
0	1,17 A ab	0,82 AB ab	0,59 BC a	0,20 C b	0,70
90	1,24 A ab	0,82 AB ab	0,61 AB a	0,51 B b	0,80
180	1,08 A ab	0,75 AB b	0,48 B a	0,34 B b	0,66
270	1,63 A a	1,47 A a	1,10 A a	1,15 A a	1,34
360	0,68 A b	0,74 A b	0,59 A a	0,73 A ab	0,68
Média	1,16	0,92	0,67	0,58	0,83
10-15					
0	0,67 A a	0,98 A ab	0,79 A ab	0,51 A a	0,74
90	0,81 A a	0,46 A b	0,35 A b	0,51 A a	0,53
180	1,05 A a	0,76 A ab	0,72 A b	0,70 A a	0,81
270	1,47 A a	1,31 AB a	1,38 AB a	0,94 B a	1,27
360	0,82 A a	0,75 A ab	0,69 A b	0,66 A a	0,73
Média	0,96	0,85	0,79	0,66	0,82
15-20					
0	0,35 A b	0,63 A a	0,73 A a	0,31 A a	0,51
90	1,00 A a	0,80 A a	0,80 A a	0,70 A a	0,83
180	0,94 A ab	0,78 A a	0,57 A a	0,41 A a	0,68
270	1,40 A a	1,30 A a	1,08 AB a	0,77 B a	1,14
360	0,85 A ab	0,75 A a	0,63 A a	0,77 A a	0,75
Média	0,91	0,85	0,76	0,59	0,78

*Tempo de Exclusão do Pastejo; T1 é a intensidade de pastejo 0% de consumo da forragem, T2 é a intensidade de pastejo 30% de consumo da forragem, T3 é a intensidade de pastejo 50% de consumo da forragem, T4 é a intensidade de pastejo 80% de consumo da forragem, médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e seguidas de mesma letra minúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

Aos avaliarmos a valores de Kar -6 kPa no decorrer do tempo de exclusão do pastejo, não houve diferença entre os tempos de exclusão de pastejo na primeira camada (0-5 cm), porém assim como pôde ser observado na condutividade hidráulica do solo

saturado, na Kar -6 kPa a diferença entre as intensidades de pastejo reduzem com o decorrer do tempo, resultado da recuperação da rede de poros do solo.

Na segunda camada (5-10 cm) é possível visualizar a recuperação no tratamento T4, o qual apresenta aumento significativo depois de decorridos 270 e 360 dias sem pastejo. Embora não esteja evidente a recuperação do solo nas demais intensidades é evidenciado que há redução dos efeitos degradantes do pisoteio animal entre os tratamentos, já que a amplitude entre os mesmos é menor conforme aumenta o tempo de exclusão do pastejo. Isso demonstra que os mecanismos de recuperação do solo estão em ação, e embora o solo não apresente capacidade resiliênte muito pronunciada, o mesmo está se recuperando. Portanto, isso nos remete a ter ainda mais cuidado com as práticas de manejo envolvidas. Devido ao fato do mesmo apresentar uma capacidade de recuperação limitada, deve-se adotar práticas de manejo menos degradantes a fim de manter e preservar sua qualidade estrutural.

A interação entre intensidade de pastejo e tempo de exclusão não foi estatisticamente significativa, portanto, foram realizados apenas teste de média para as médias gerais das intensidades de pastejo e tempos de exclusão, ou seja, não foi realizado desmembramento simples do efeito do tempo de exclusão em cada intensidade de pastejo, nem o efeito de intensidade de pastejo nos diferentes tempos de exclusão. Na Kar -100 kPa (Tabela 12), o que contrasta a diferença entre as intensidades de pastejo, é que nas primeiras avaliações nas intensidades de pastejo mais elevadas, T3 e T4, houve grande redução da permeabilidade, resultando em uma média geral mais baixa, o que não ocorreu no T1, onde não houve pastejo, os valores se mantêm elevados em todas as coletas. O aumento resultante da recuperação estrutural do solo não é suficiente para que deixe de haver diferença significativa entre as áreas pastejadas e não pastejada. Na camada de 0-5 cm, é onde esse efeito é mais pronunciado, conforme aumenta a profundidade da camada avaliada esse efeito vai minimizando.

Ao avaliarmos as intensidades de pastejo ao longo do tempo de exclusão, o efeito na profundidade de 0-5 cm não ficou completamente elucidado principalmente em virtude da recuperação nas diferentes intensidades ser diferenciada. Os valores de Kar -100 kPa encontrados no T1 são bastante elevados em todas as avaliações, enquanto nas demais intensidades houve grande oscilação nos valores obtidos fazendo com que a recuperação no tempo não possa ser evidenciada. Já quando avaliamos a exclusão do pastejo na profundidade de 5-10 cm é possível perceber que há recuperação, embora os valores do

T1 também sejam elevados o incremento nos valores de permeabilidade das demais intensidades é mais elevado, resultando em um aumento estatisticamente significativo.

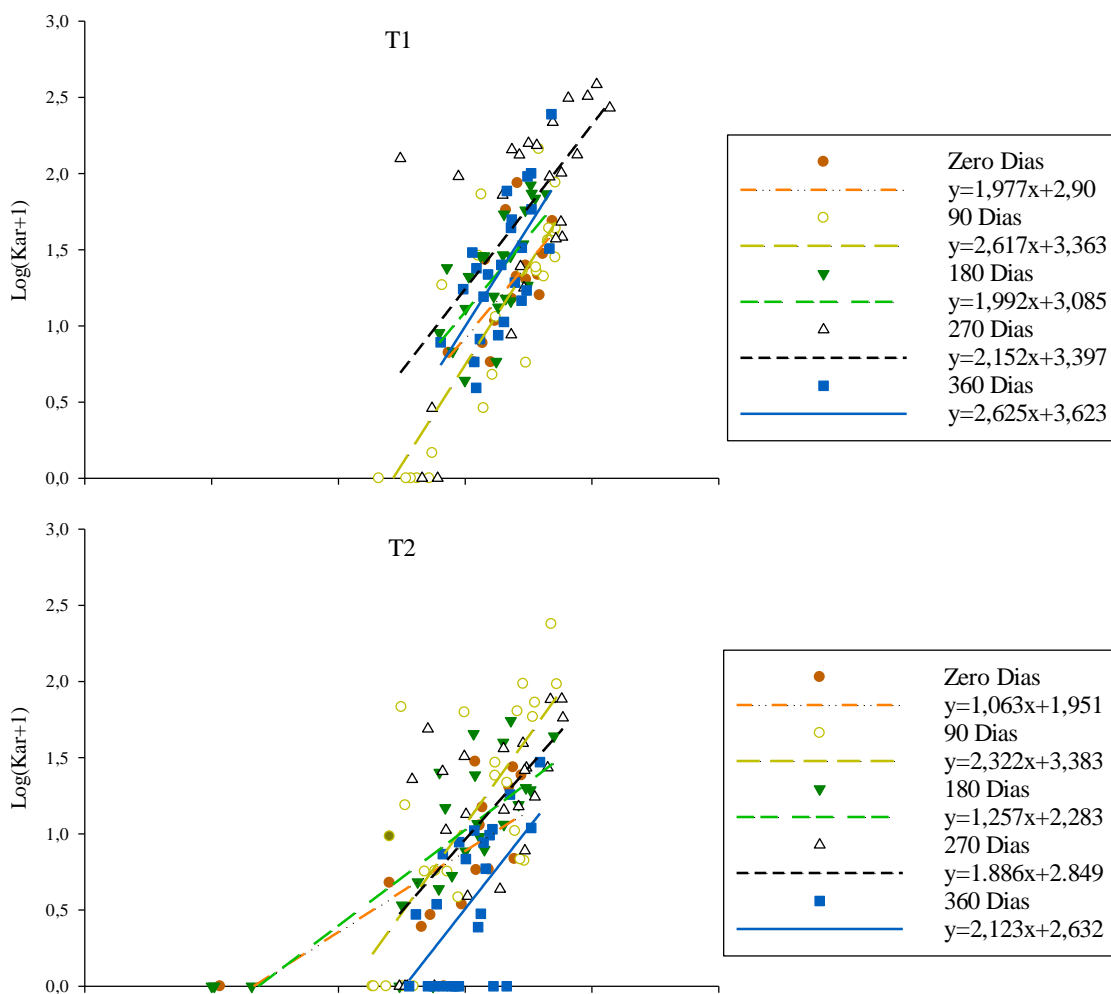
Tabela 12 – Média dos valores de Permeabilidade do solo ao ar (Log_{10} (Kar - 100 kPa μm^2)) em um Latossolo Vermelho, manejado sob diferentes intensidades de pastejos, em quatro profundidade em cinco tempos épocas após exclusão do pastejo.

Profundidade (cm)					
0-5					Média
	T1	T2	T3	T4	
0	1,43	1,08	1,28	0,35	1,04 ab
90	1,45	1,54	0,58	0,61	1,05 ab
180	1,52	1,12	0,39	0,48	0,88 b
270	1,95	1,42	1,01	1,06	1,36 a
360	1,61	0,71	0,48	0,70	0,87 b
Média	1,59 A	1,17 B	0,75 C	0,64 C	
5-10					
0	1,24	0,92	0,63	0,30	0,77 b
90	1,45	1,06	0,92	0,73	1,04 b
180	1,31	1,06	0,81	0,50	0,92 b
270	1,48	1,70	1,32	1,35	1,46 a
360	1,16	0,97	0,86	0,88	0,97 b
Média	1,33 A	1,14 AB	0,91 BC	0,75 C	
10-15					
0	0,89	1,07	0,95	0,69	0,90 b
90	1,21	0,81	0,64	0,70	0,84 b
180	1,20	1,20	1,00	0,88	1,07 b
270	1,74	1,62	1,66	1,19	1,55 a
360	1,22	0,96	0,88	0,93	1,00 b
Média	1,25 A	1,13 AB	1,03 AB	0,88 B	
15-20					
0	0,54	0,94	0,98	0,48	0,74 b
90	1,12	1,01	0,92	0,93	1,00 b
180	1,02	0,84	0,82	0,67	0,84 b
270	1,59	1,22	1,43	1,18	1,36 a
360	1,02	0,88	0,72	0,87	0,87 b
Média	1,06 A	0,98 A	0,97 A	0,83 A	

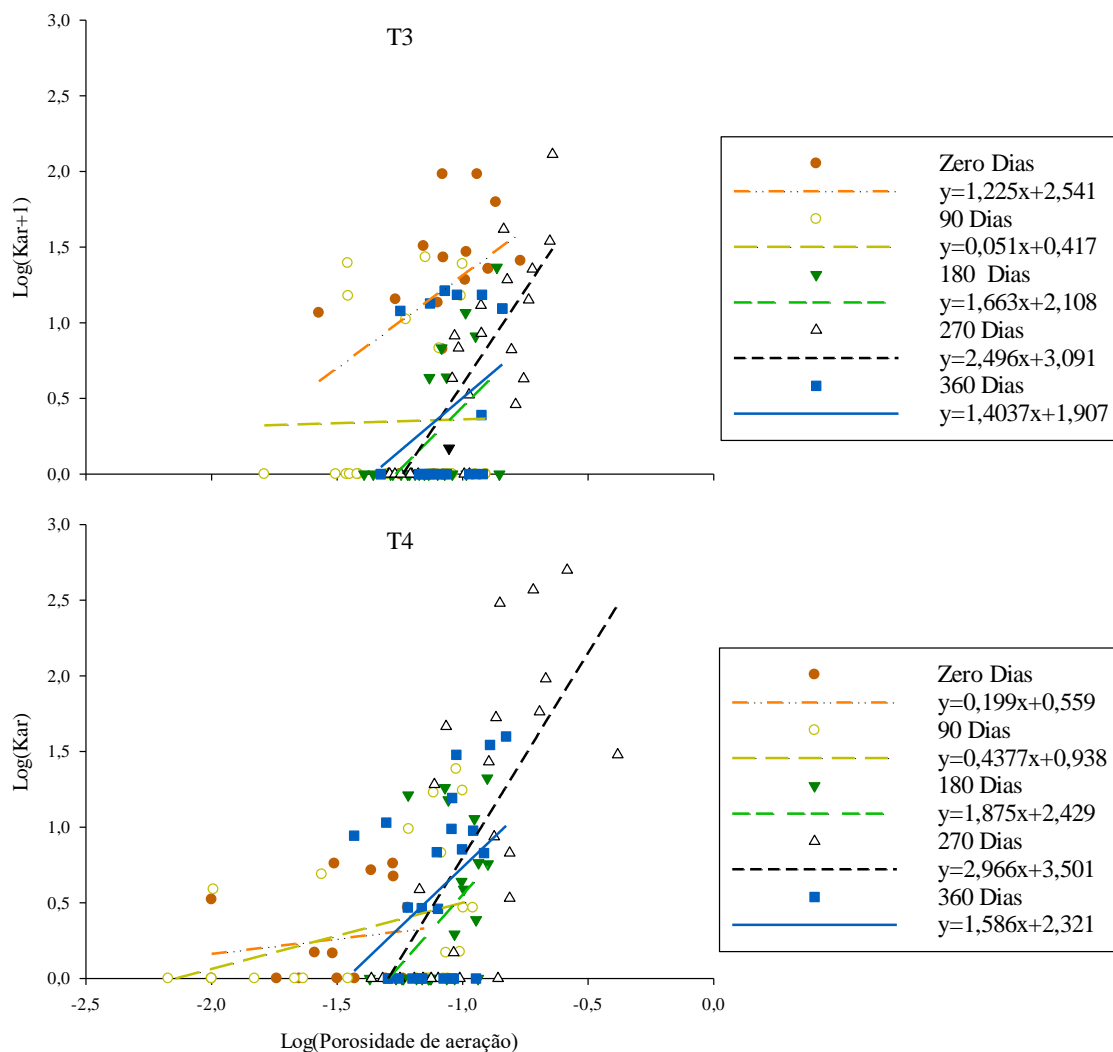
*Tempo de Exclusão do Pastejo; T1 é a intensidade de pastejo 0% de consumo da forragem, T2 é a intensidade de pastejo 30% de consumo da forragem, T3 é a intensidade de pastejo 50% de consumo da forragem, T4 é a intensidade de pastejo 80% de consumo da forragem, médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e seguidas de mesma letra minúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

O pisoteio animal teve grande efeito sobre a relação de permeabilidade do solo ao ar e porosidade de aeração (Figura 16), houve grande variação quanto a declividade das retas desta relação, aumento da declividade significa que o aumento da porosidade de aeração resultará em aumento de permeabilidade ao ar. No T1 é onde se observa grande declividade das retas mesmo logo após a exclusão dos pastejos, resultado do não pisoteio dessa área, o que fez que esse tratamento tenha maior quantidade de poros, os mesmos apresentam elevada conectividade.

Figura 16 – Relação entre permeabilidade do solo ao ar com a porosidade de aeração nas em diferentes intensidades de pastejo na profundidade de 0-5 centímetros



Continua...



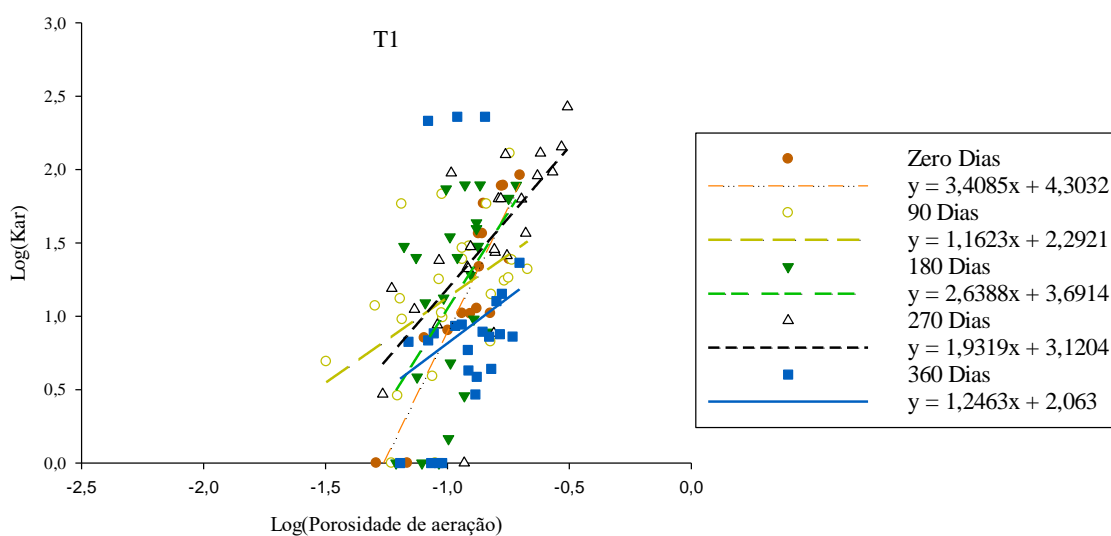
Ao analisarmos os demais tratamentos, onde houve pisoteio há menor declividade na primeira avaliação, resultado do efeito compactante do solo, que algumas vezes não apresenta carga suficiente para reduzir o espaço poroso, mas já é suficiente para modificar a continuidade e a conectividade dos poros do solo. No T2 onde a intensidade foi baixa o efeito do pisoteio não possui resultado tão degradante quando comparado com as intensidades de pastejo mais altas (T3 e T4), pois há redução na declividade, mas não é tão pronunciada. Com o decorrer do tempo, no T2, observa-se aumento na declividade das retas, sendo que nas últimas avaliações as retas têm declividade já bem próximas as encontradas no T1.

O comportamento das restas no T3 e T4 é bastante semelhante, nas primeiras avaliações a declividade é baixa, indicando que apesar de ocorrer aumento na porosidade, não há incremento tão pronunciado na permeabilidade do solo ao ar. Porém decorridos

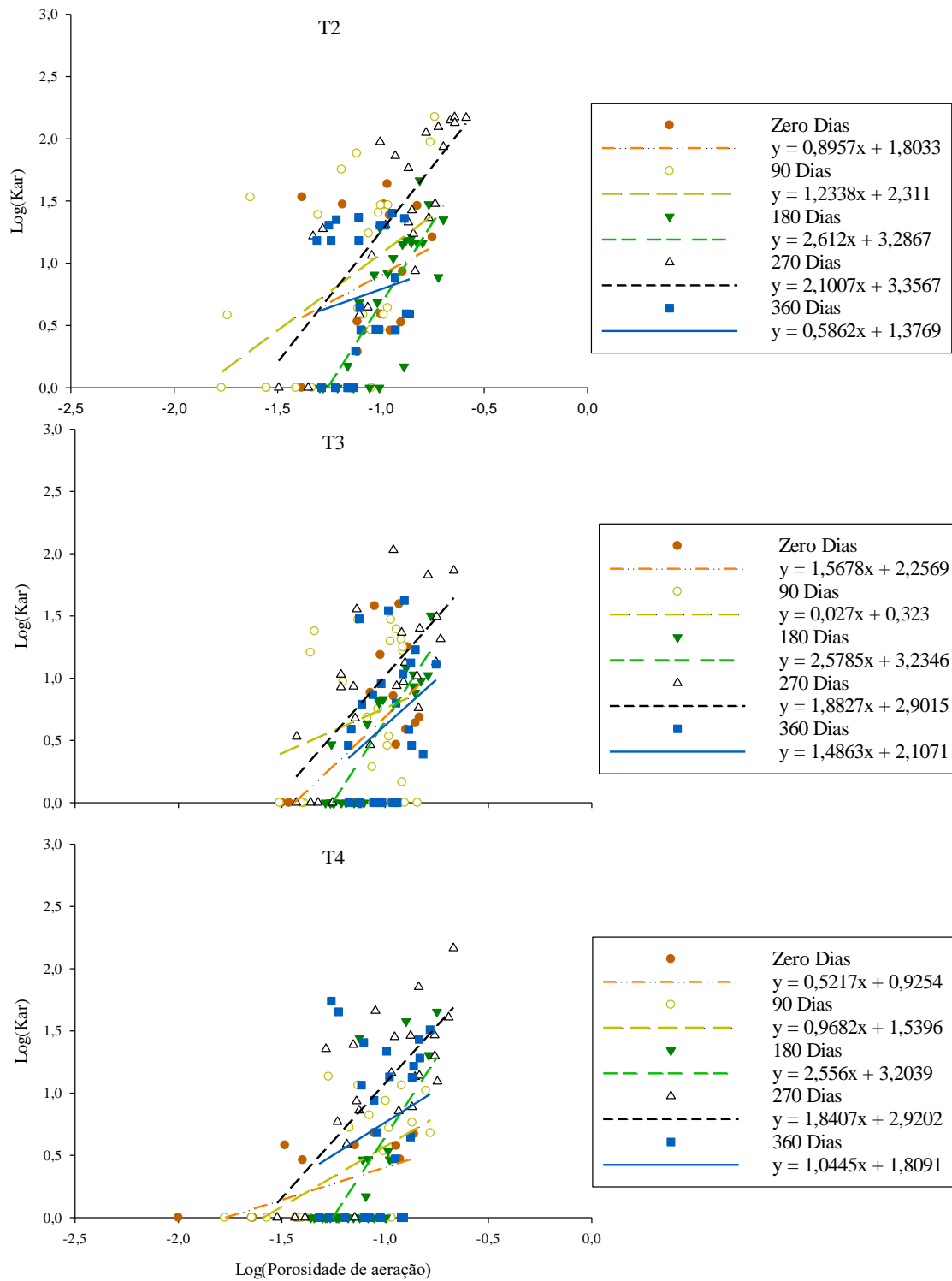
180 após a exclusão do pastejo já se observa grande melhora nessa relação, o resultado está vinculado a soma de fatores como crescimento radicular da forrageira, atividade biológica, ciclos de contração e expansão, entre outros. Bavoso et al. (2012) ao avaliar a permeabilidade do solo ao ar, verificaram que os ciclos de umedecimento e secagem contribuem para o aumento da permeabilidade do solo ao ar. Dec et al. (2012) ao avaliarem o efeito do pisoteio animal em alta intensidade, observaram que a permeabilidade do solo ao ar chegou a níveis críticos, porém, com o decorrer do tempo, ao se excluir os pastejos, o solo conseguiu se recuperar dos estresses gerados pelo pisoteio, recuperando a sua condição estrutural e conseqüentemente melhorando a funcionalidade dos poros.

Na profundidade de 5-10 cm (Figura 17) os resultados encontrados também evidenciam que o pisoteio animal afeta a distribuição e a continuidade de poros, pois principalmente nas intensidades de pastejo mais altas, T3 e T4, é verificado menor declividade das retas entre a permeabilidade do solo ao ar e a porosidade de aeração, porém assim como avaliado nos demais atributos discutidos anteriormente, com o decorrer do tempo há melhora dessa relação, havendo incremento do coeficiente angular, o que demonstra que há reestruturação, resultado que só é possível devido aos poros apresentarem conectividade entre si.

Figura 17 – Relação entre permeabilidade do solo ao ar com a porosidade de aeração em diferentes intensidades de pastejo profundidade de 5-10 centímetros.



Continua...

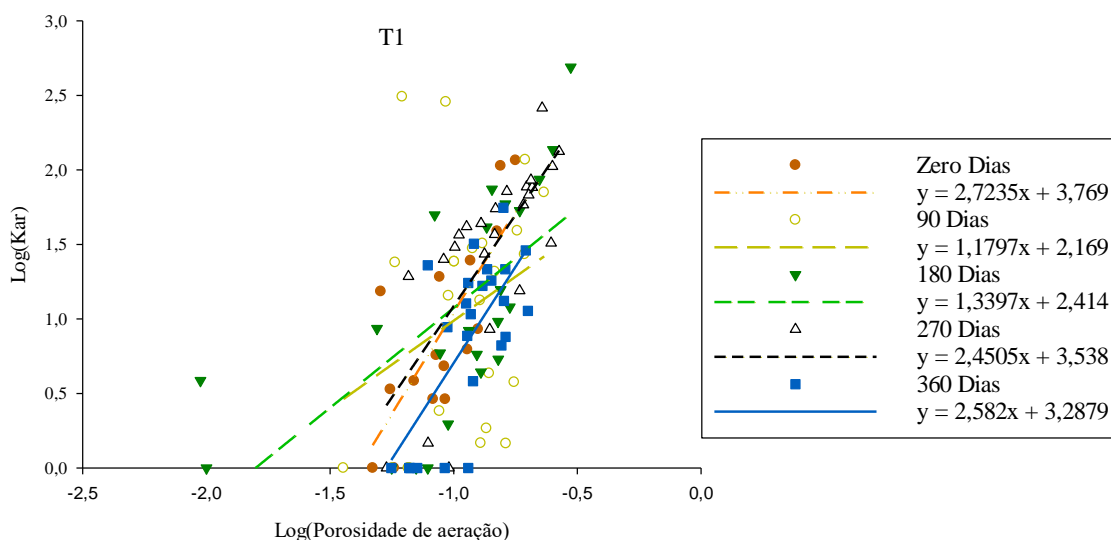


No T2, na profundidade de 5-10, o efeito do pisoteio não foi tão expressivo quanto na camada superficial, já que a variação da declividade das retas entre as avaliações não foi tão pronunciada como na camada superficial. Porém nas intensidades mais altas como o caso do T3 e T4, nas avaliações iniciais as retas apresentaram menor declividade. No

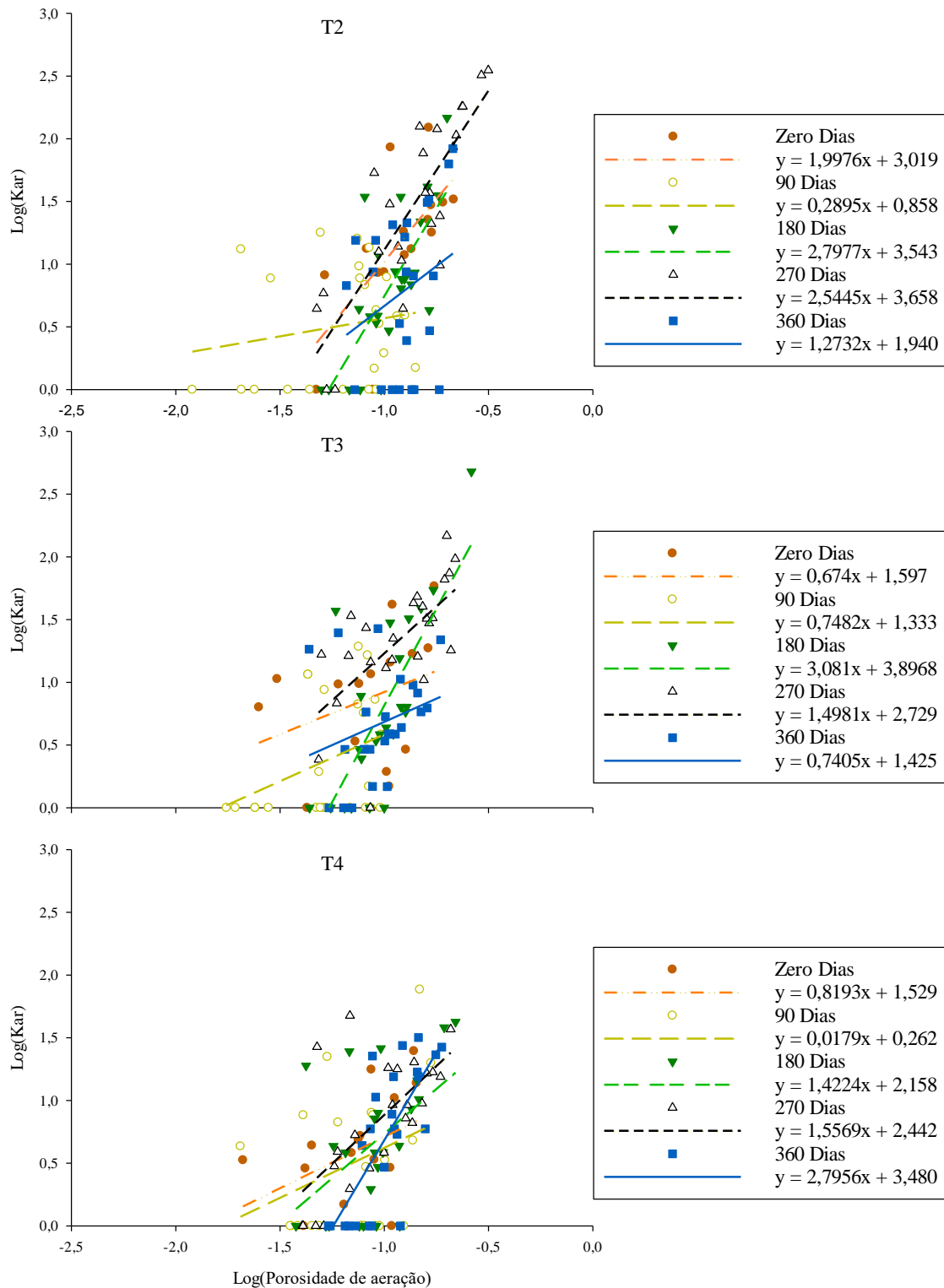
T3 a avaliação dos 90 dias foi onde se obteve a menor declividade, já no T4, o tempo 0 foi onde se alcançou a menor declividade. Mas em ambas as intensidades, T3 e T4, é possível observar a recuperação da conectividade dos poros, pois quando comparamos com tempo zero, há um incremento na declividade das retas. Esse resultado evidencia que após 180 dias após a exclusão dos animais da área a recuperação estrutural do solo já é bastante expressiva, fazendo com que haja melhora significativa no cumprimento da funcionalidade ambiental do solo, no que diz respeito a troca de gases entre solo e atmosfera.

Na profundidade de 10-15 cm (Figura 18) o efeito do pisoteio animal entre as intensidades de pastejo é bem expressivo, conforme aumenta a intensidade de pastejo há redução significativa na relação entre a porosidade de aeração e permeabilidade ao ar. Nas intensidades mais elevadas, T3 e T4, é onde esse efeito é mais evidente, pois ao compararmos no tempo 0 e 90, o aumento da porosidade de aeração não repercute em aumento tão elevado da Kar como na intensidade T1.

Figura 18 – Relação entre permeabilidade do solo ao ar com a porosidade de aeração em diferentes intensidades de pastejo profundidade de 10-15 centímetros.



Continua...



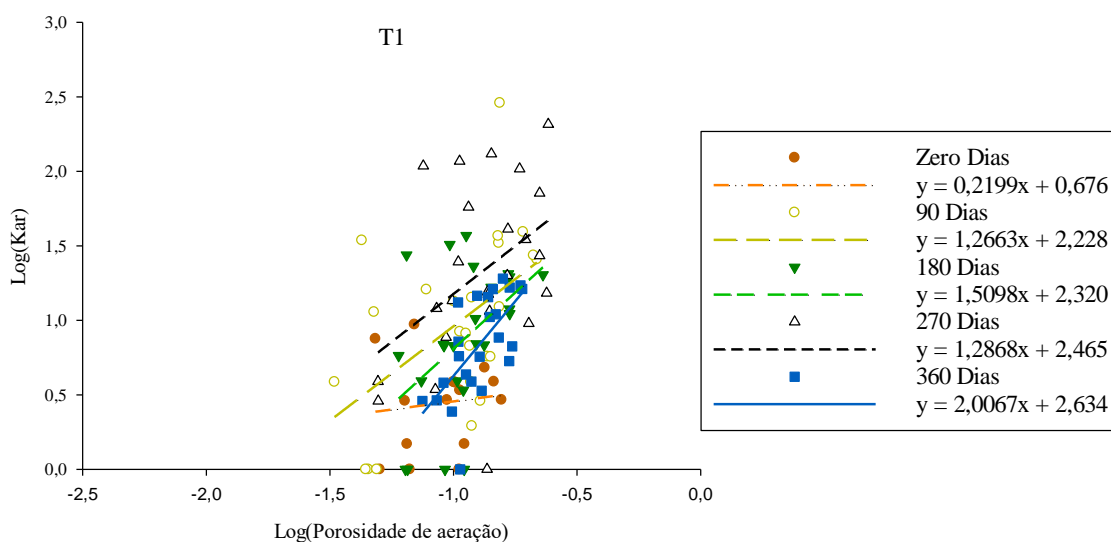
Com o decorrer do tempo de exclusão de pastejo é possível observar que há melhora da relação entre a porosidade de aeração com a Kar, sendo que 180 dias após a exclusão do pastejo, mesmo nas intensidades de pastejo consideradas altas, há aumento

expressivo da declividade das retas, a declividade das retas se aproxima a aquelas encontradas na intensidade T1, onde não houve pastejo.

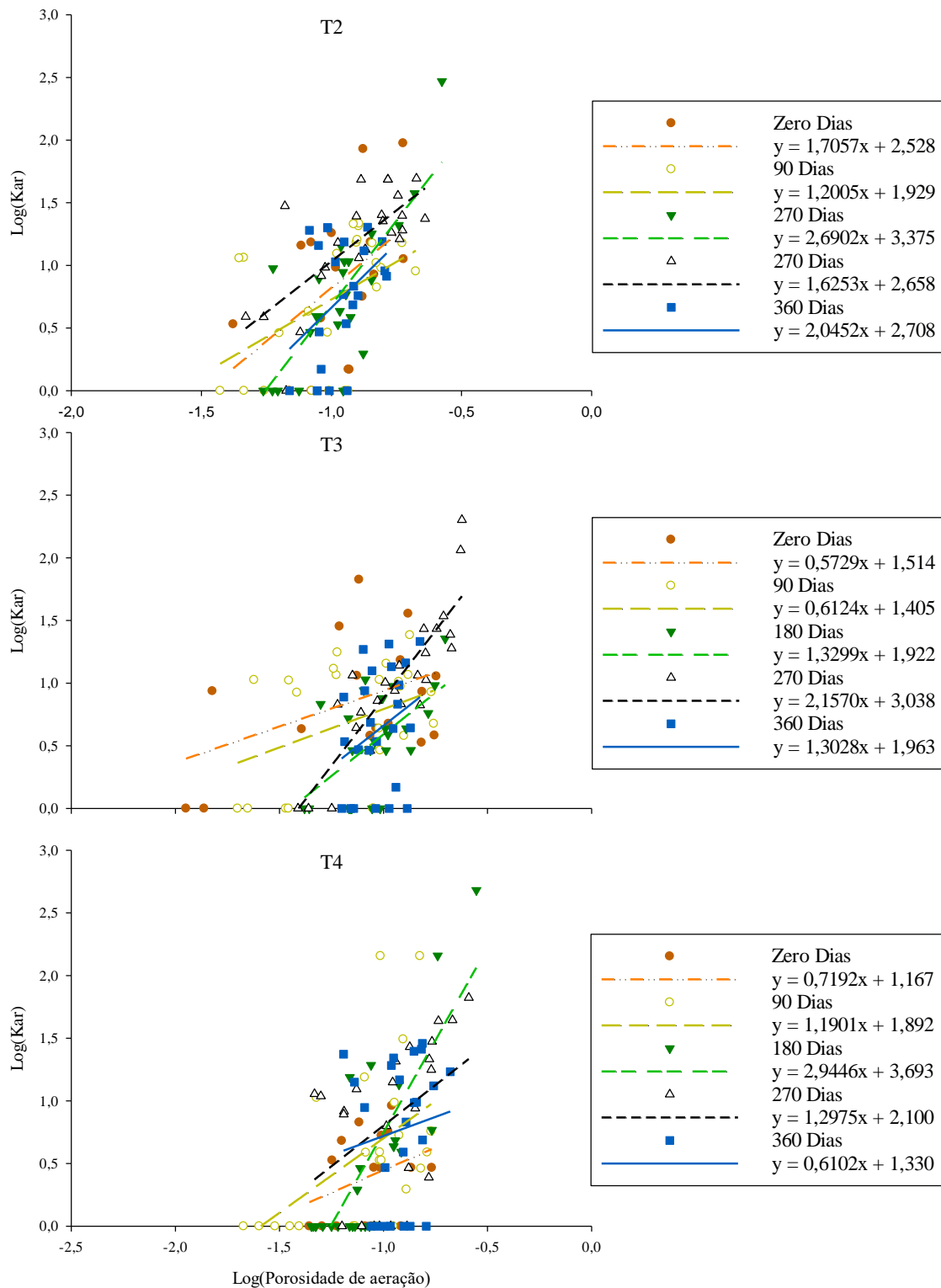
De 15-20 cm (Figura 19) não é possível identificar o efeito do pisoteio animal sobre a relação de porosidade de aeração e Kar, ao se comparar as diferentes intensidades em cada um dos tempos de exclusão não se tem variação padrão, possivelmente essa variação seja mais resquícios da intervenção mecânica realizada antes da implantação do experimento do que propriamente do efeito do pisoteio.

Ao avaliarmos a profundidade de 15-20 cm em função dos tempos de exclusão identificamos aumento na declividade das retas, esse resultado pode ser atribuído ao crescimento radicular da forrageira, que logo após os pastejo apresentava densidade e comprimento de raiz, nessa camada, bem menos pronunciado quando comparado com as demais camadas (RUPOLLO, 2016). Dessa forma, possivelmente após a exclusão dos pastejos o crescimento foi mais expressivo resultando na melhora da continuidade e conectividade dos poros do solo.

Figura 19 – Relação entre permeabilidade do solo ao ar com a porosidade de aeração em diferentes intensidades de pastejo profundidade de 15-20 centímetros.



Continua...

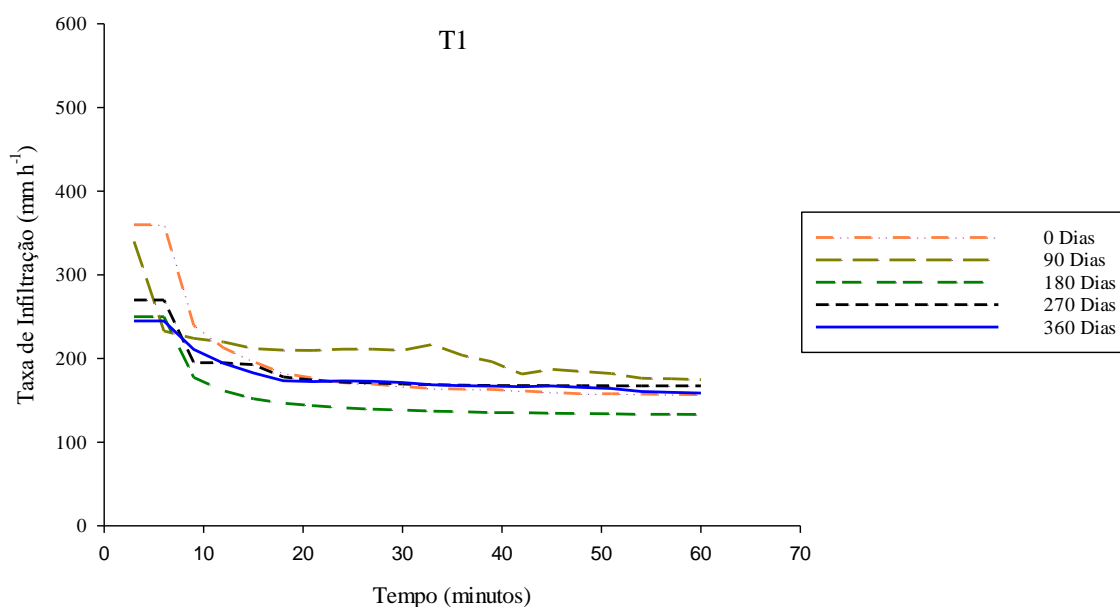


Gregory et al. (2009) ao avaliar a resiliência física e biológica de diversos solos, relataram recuperação diferenciada entre os diferentes tipos de solo, porém, solos de pastagem apresentaram maior recuperação quando comparado com solos arados, devido

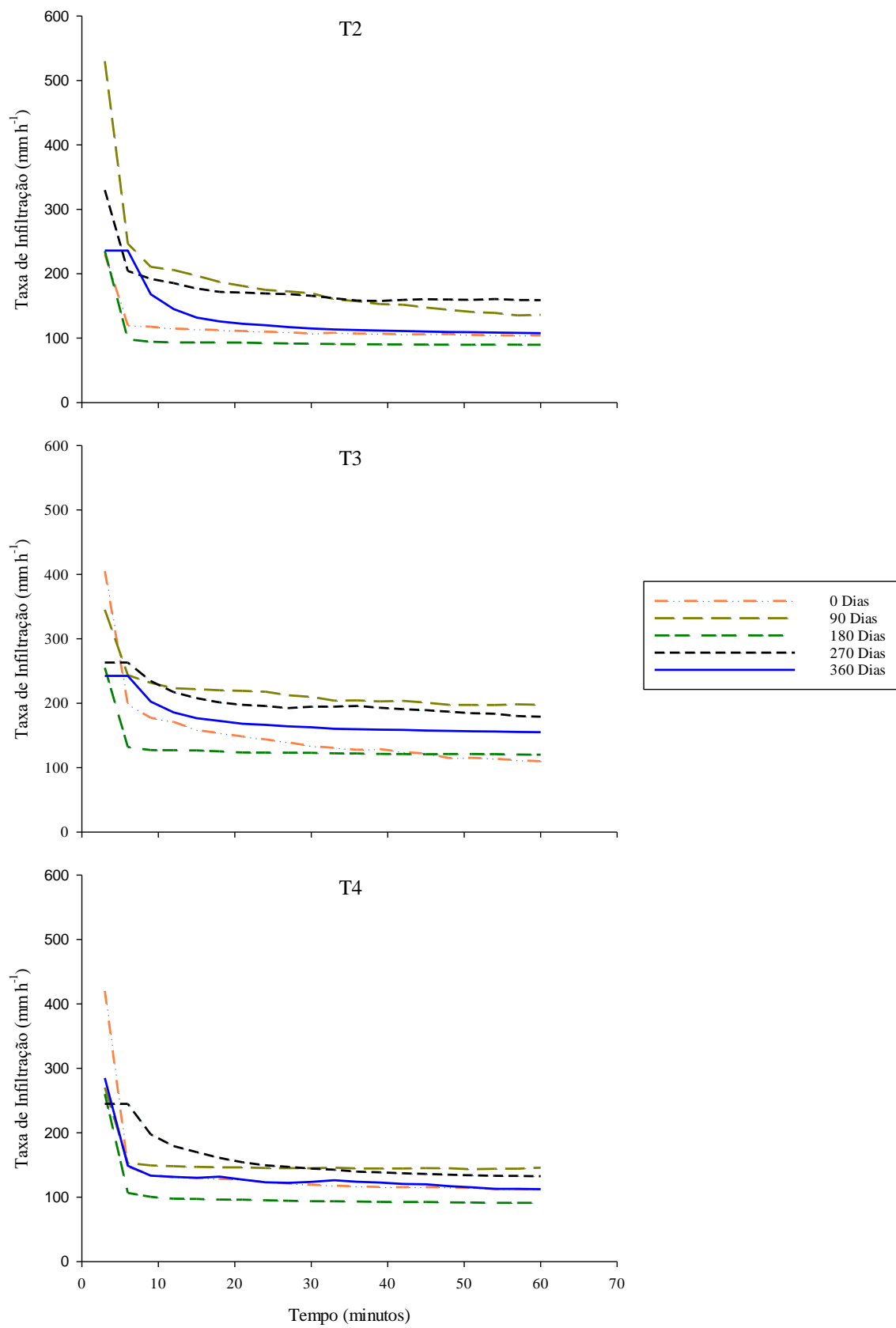
ao fato de que esta condição de manejo propicia maior aporte de material orgânico e favorece o desenvolvimento e a atividade de comunidades biológicas e microbiológicas, as quais conseqüentemente contribuirão para a recuperação estrutural do solo. Dessa forma é necessário traçar estratégias de manejo, como ajuste de lotação animal, adequação e intensidade de pastejo que propiciem aporte de material vegetal em quantidades e períodos de descanso mínimos entre os pastejos para que o solo possa se recuperar do estresse gerado pelo pisoteio animal e se atinja o manejo sustentável das pastagens.

A taxa de infiltração (Figura 20) teve variação em função das intensidades de pastejo. Onde não houve pastejo a taxa de infiltração se manteve elevada, quando comparada com a taxa encontrada nas demais intensidades de pastejo, desde a primeira avaliação, resultado basicamente da grande quantidade de poros existente nessa intensidade, devido a mesma não ter sofrido pressões causadas pelo pisoteio animal, o qual acarreta danos ao solo, principalmente resultando na redução da porosidade (POTT et al., 2017). Nas áreas onde houve pastejo não ocorreram grandes variações da taxa de infiltração de água no solo em função das intensidades de pastejo.

Figura 20 – Taxa de infiltração em quatro intensidades de pastejo e em cinco tempos de exclusão de pastejo.



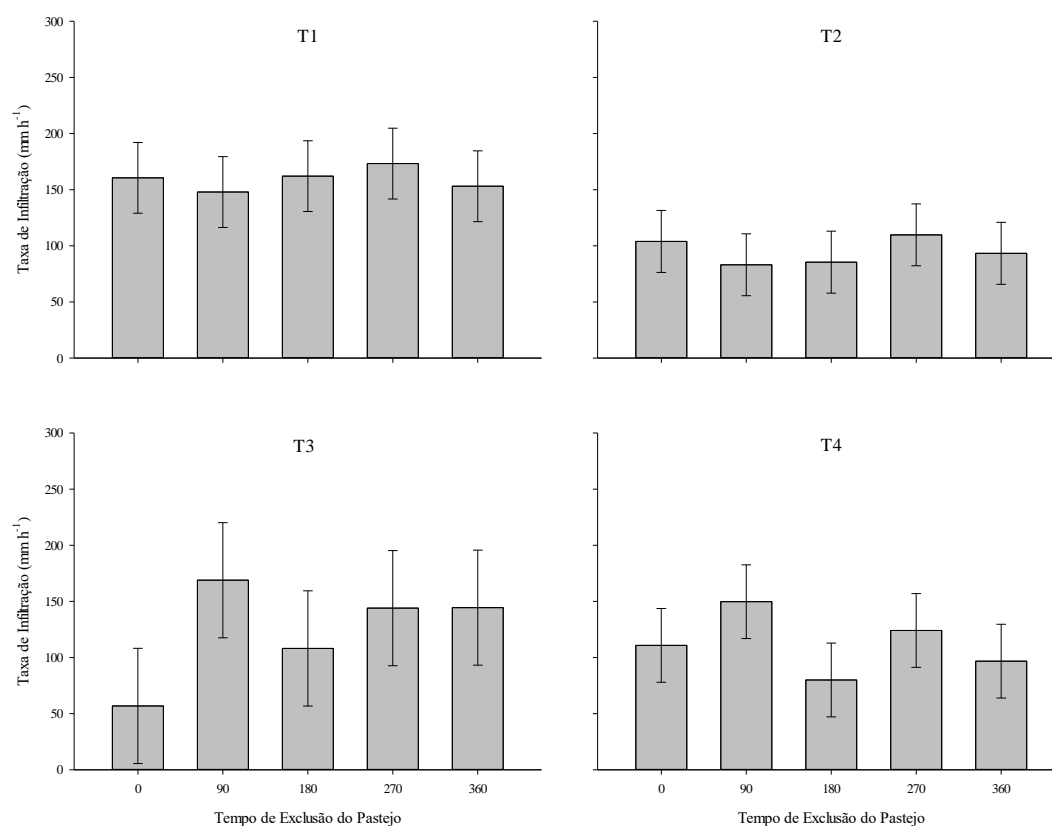
Continua...



Quando avaliada a taxa de infiltração nos diferentes tempos de exclusão, a variação da taxa foi maior em função da sazonalidade de crescimento da forrageira do que propriamente em função da exclusão dos pastejos. De maneira geral os tempos com menor taxa de infiltração foram o tempo 0 e o 180 dias após a exclusão do pastejo. Piazzetta et al. (2014) e Soares Filho et al. (2015) em seus trabalhos mostram a íntima relação entre o crescimento de parte aérea e sistema radicular das plantas forrageiras, que onde houve maior crescimento da parte aérea também repercutiu no maior crescimento de raízes.

Na Figura 21, onde estão avaliados valores de taxa de infiltração após decorridos 60 minutos após o início do teste, fica mais claro a variação entre os tempos de exclusão. Principalmente nas intensidades de pastejo mais elevadas, T3 e T4, onde no tempo 0 e 180 dias são encontrados valores reduzidos da taxa de infiltração.

Figura 21 – Velocidade Básica de infiltração após 60 minutos do início do teste.

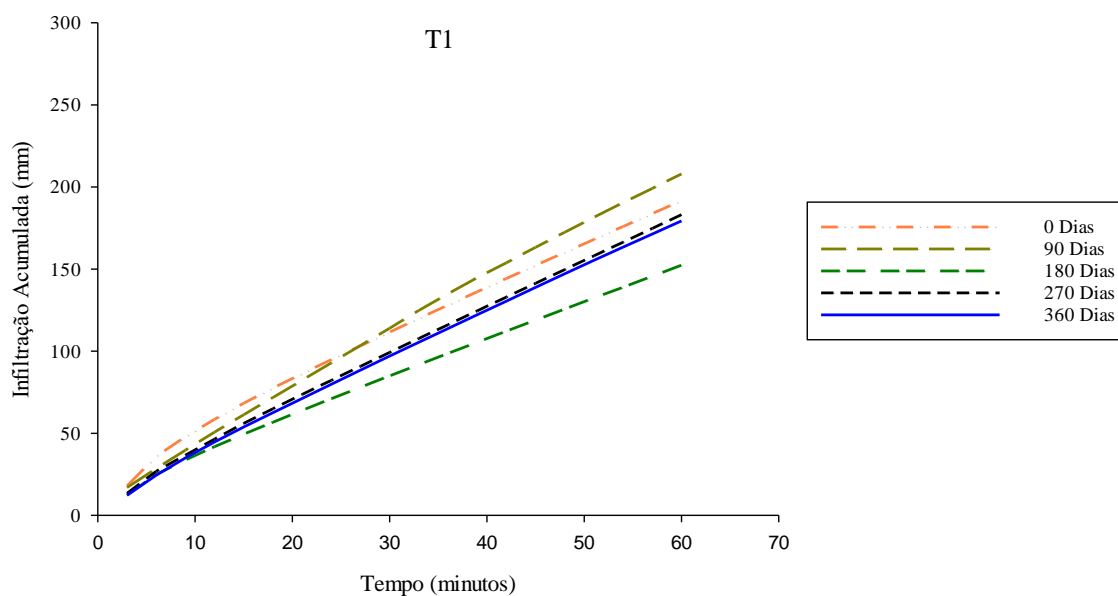


Esse resultado é atribuído a dois fatores principais, no tempo 0 é em virtude do pisoteio animal que acarretou na compactação da camada superficial do solo, diminuindo a quantidade de poros para que ocorresse a efetiva infiltração de água no solo e aos 180 dias pelo crescimento da forrageira, visto que aos 180 dias coincidiu com o período de pleno crescimento da planta, mês de dezembro (LUCCA et al., 2017).

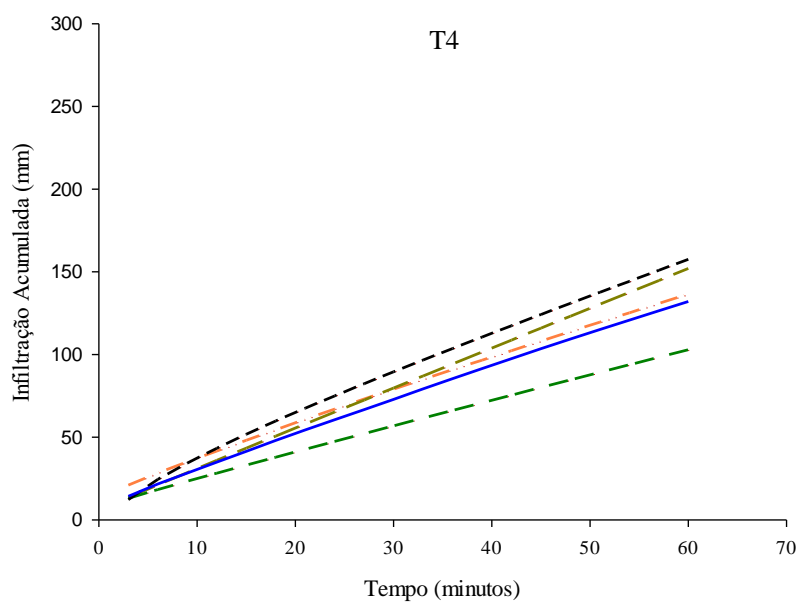
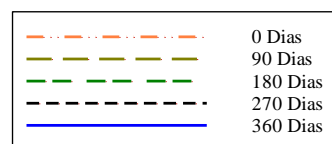
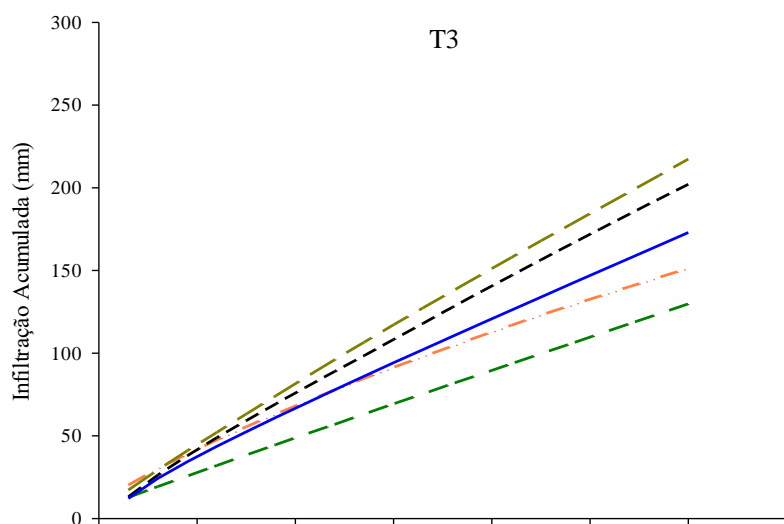
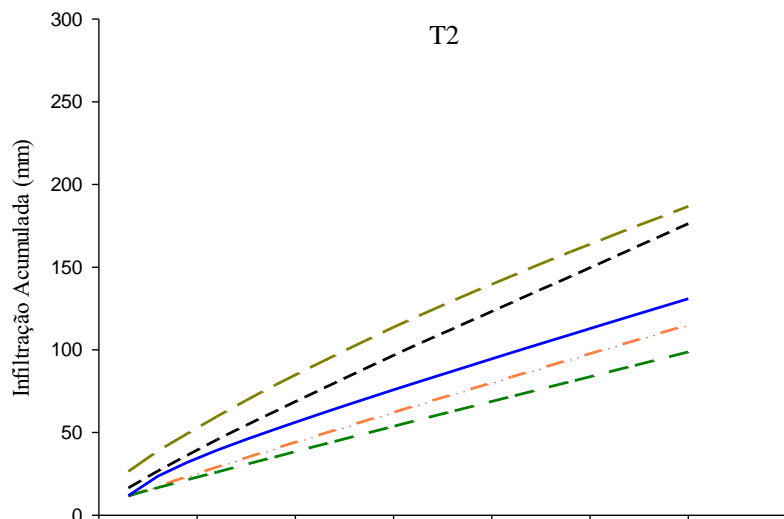
O maior crescimento fez com que o sistema radicular da planta ocupasse parte do sistema poroso do solo e assim acarretou na redução da taxa de infiltração de água no solo, bem como no período de 90 dias coincidiu com a saída do período invernal, época onde há senescência de parte das raízes da forrageira, resultando no aumento da taxa de infiltração de água no solo.

Assim como na taxa de infiltração, houve influência das intensidades de pastejo na infiltração acumulada (Figura 22), embora em menor magnitude também houve essa interferência, em que conforme há aumento da intensidade de pastejo há redução da infiltração acumulada. Esse efeito é maior na intensidade de pastejo T4, no qual houve maior redução dos valores de infiltração acumulada.

Figura 22 – Infiltração acumulada em quatro intensidades de pastejo e em 5 tempos de exclusão do pastejo.



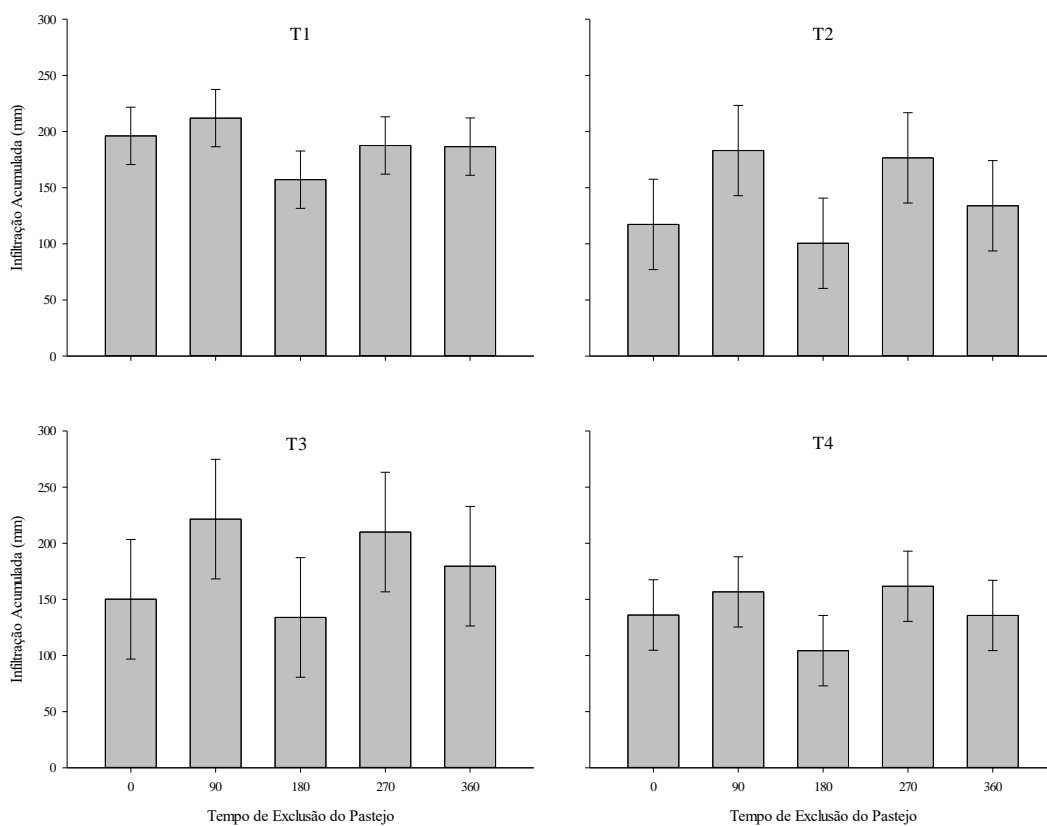
Continua...



Com relação a infiltração acumulada nos diferentes tempos de exclusão de pastejo também houve variação, resultado esse principalmente em virtude do crescimento da forrageira, que propiciou maior ou menor quantidade de poros obstruídos pelo sistema radicular, acarretando em maior ou menor infiltração acumulada.

Na Figura 23 pode se observar a variação da infiltração acumulada após decorridos 60 minutos de teste, nesta figura é possível verificar que em todas as intensidades a variação da infiltração acumulada foi bastante semelhante, porém em magnitudes distintas, ou seja, em todos os tratamentos há aumento na taxa de infiltração acumulada após decorridos 90 dias de exclusão do pastejo, após 180 dias há redução da infiltração acumulada e aos 270 dias os valores novamente começam a aumentar. Atribui-se esse resultado ao crescimento da forrageira que varia em função da estação do ano, já que a umidade do solo teve pouca variação.

Figura 23 – Infiltração acumulada após 60 minutos do início do teste.



7 CONCLUSÕES

A tomografia computadorizada é uma ótima ferramenta para caracterizar a qualidade estrutural do solo, pois além de ser possível quantificar o volume de poros é possível verificar a forma, tamanho e distribuição. O número de Euler fornecido pelo software MAVI ToolIP é um ótimo indicador da qualidade estrutural do solo.

O aumento do estado de compactação inicial do solo reduz o índice de compressibilidade cíclica, pois possui um menor índice de vazios inicial o que conseqüentemente tem menor amplitude entre o índice de vazios inicial e final. O índice de compressibilidade se mostrou um bom indicador da qualidade física do solo, pois apresenta elevada correlação com variáveis já consagradas como indicadoras da qualidade física, tais como densidade do solo, porosidade total e macroporosidade.

O índice de elasticidade do solo é afetado pelo estado de compactação, conforme aumenta o estado de compactação inicial também aumenta o índice de elasticidade, isso em virtude de que em estados de compactação menos acentuados as deformações plásticas são mais pronunciadas quando comparado a solos com estado de compactação mais avançados.

Mesmo intensidades de pastejo reduzidas podem causar redução da qualidade estrutural do solo. As intensidades de pastejo avaliadas afetam negativamente a qualidade física do solo. Com o aumento da intensidade de pastejo há redução da porosidade total, da macroporosidade, da permeabilidade do solo ao ar bem como o aumento da densidade.

Com a exclusão do pastejo há recuperação da qualidade estrutural do solo, isso pode ser percebido pelo aumento da porosidade total e da macroporosidade, 90 dias sem pastejo já são suficientes para que seja percebido a melhora dos valores de porosidade total e macroporosidade.

Pastejo rotacionado, quando manejado de maneira adequada pode ser uma importante ferramenta para a produção sustentável. Adequando períodos de exclusão de pastejo é possível que se realize o pastejo das áreas sem que ocorra a compactação do solo.

A permeabilidade do solo ao ar e a condutividade hidráulica do solo saturado se mostraram pouco eficientes para evidenciar a recuperação estrutural do solo,

principalmente em virtude da grande variabilidade amostral encontrada nos diferentes tempos de exclusão.

A relação entre permeabilidade do solo ao ar e porosidade de aeração é uma boa indicadora da qualidade física do solo, essa relação reduz conforme se aumenta a intensidade de pastejo e é possível verificar um aumento dessa relação com aumento do tempo de exclusão dos pastejos.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGOSTINI, M. de A.; STUDDERT, G. A.; SAN MARTINO, S.; COSTA, J. L.; BALBUENA, R. H.; RESSIA, J. M.; MENDIVIL, G. O.; LÁZARO, L. Crop residue grazing and tillage systems effects on soil physical properties and corn (*Zea mays* L.) performance. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v.12, p. 271-282, 2012.

ALBUQUERQUE, J. A.; SANGOI, L.; ENDER, M. Efeitos da integração lavoura-pecuária nas propriedades físicas do solo e características da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 25, p.717-723, 2001.

ALVES, M. C.; SANCHES SUZUKI, L. G. A.; SANCHES SUZUKI, L. E. A. Densidade do solo e infiltração de água como indicadores da qualidade física de um Latossolo Vermelho distrófico em recuperação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 31, p. 617-625, 2007.

AMADO, T. J. C.; BAYER, C.; ELTZ, F. L. F.; BRUM, A. C. R. potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p.189-197, 2001.

AMBUS, J. V. **Condições físicas e mecânicas de um Latossolo em sistema integrado de produção agropecuária**. Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal de Santa Maria. Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo-RS. 2016.

ARAUJO JR, C. F.; DIAS JR, M. S.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALCÂNTARA, E. N. Capacidade de suporte de carga e umidade crítica de um Latossolo induzida por diferentes manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.35, p.115-131, 2011.

BAQUERO, J. E.; RALISCH, R.; MEDINA, C. de C.; TAVARES FILHO, J.; GUIMARÃES, M. de F. Soil physical properties sand sugarcane root growth in a Red Oxissol. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.63-70, 2012.

BARROS, A. C. C. de. **Estoque de massa seca de raiz em pastos de Capim-Florico manejados sob intensidades de pastejo**. Dissertação. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Zootecnia. 2015. 63p.

BAVOSO, M. A.; SILVA, A. P. DA; FIGUEIREDO, G. C.; TORMENA, C. A.; GIAROLA, N. F. B. Resiliência física de dois Latossolos Vermelhos sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.36, p.1892-1904, 2012.

BAYER, C.; BERTOL, I. Características químicas de um Cambissolo Húmico afetadas por sistemas de preparo com ênfase à matéria orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 23, p.687-694, 1999.

BENEDETTI, U. G.; VALE JÚNIOR, J. F. DO; SCHAEFER, C. E. G. R.; MELO, V. F.; CÁLIA, S.; UCHÔA, P. gênese, química e mineralogia de solos derivados de sedimentos pliopleistocênicos e de rochas vulcânicas básicas em Roraima, norte Amazônico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.299-312, 2011.

BONETTI, J. A.; PAULINO, H. B.; SOUZA, E. D.; CARNEIRO, M. A. C.; SILVA, G. N. Influência do sistema integrado de produção agropecuária no solo e na produtividade de soja e braquiária. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 45, p. 104-112, 2015.

BONO, J. A. M.; MACEDO, M. C. M.; TORMENA, C. A.; NANNI, M. R.; GOMES, E. P.; MÜLLER, M. M. L. Infiltração de água no solo em um Latossolo Vermelho da região sudoeste dos cerrados com diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.1845-1853, 2012.

BORTOLINI, D.; ALBUQUERQUE, J. A.; RECH, C.; MAFRA, A. L.; RIBEIRO FILHO, H. M. N.; PÉRTILE, P. Propriedades físicas do solo em sistema de integração lavoura-pecuária em Cambissolo Húmico. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v.15, p.60-67, 2016.

BRAIDA, J. A.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; VEIGA, M. da. Teor de carbono orgânico e a susceptibilidade à compactação de um Nitossolo e um Argissolo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** v.14, n.2, p.131–139, 2010.

CAPURRO, E. P. G.; SECCO, D.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Compressibilidade e elasticidade de um Vertissolo afetado pela intensidade de pastejo bovino. **Ciência Rural**. v.44, p.283-288, 2014.

CARNEIRO, M. A. C.; SOUZA, E. D. de; REIS, E. F. dos; PEREIRA, H. S.; AZEVEDO, W. R. de. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.147-157, 2009.

CHERUBIN, M. R.; EITELWEIN, M. T.; FABBRIS, C.; WEIRICH, S. W.; SILVA, R. F.; SILVA, V. R.; BASSO, C. J. Qualidade física, química e biológica de um Latossolo com diferentes manejos e fertilizantes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 39, p. 615-625, 2015.

CNUDDÉ, V.; BOONE, M. N. High-resolution X-ray computed tomography in geosciences: A review of the current technology and applications. **Earth-Science Reviews**. v.123, p. 1–17, 2013.

COLLARES, G. L.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Compactação superficial de Latossolos sob integração lavoura – pecuária de leite no noroeste do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**. v.41, p.246-250, 2011.

COLUSSI, G.I; SOUZA DA SILVA, L.; MINATO, E. A. Escarificação e adubação orgânica: efeito na recuperação estrutural de solo produzindo Tifton 85 **Ciência Rural**. v. 44, p. 1956-1961. 2014.

CONTE, O.; FLORES, J. P. C.; CASSOL, L. C.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. F.; LEVIEN, R.; WESP, C. L. Evolução de atributos físicos de solo em sistema de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.46, n.10, p.1301-1309, out. 2011.

COOPER, M. Degradação e recuperação de solos. Apostila Técnica. Disponível em: <<http://www.esalq.usp.br/gerd/Recuperacao/APOSTILA-Recup%20de%20Solos.pdf>> Acesso em: 20 de dezembro de 2017.

CORTEZ, J. W.; OLSZEWSKI, N.; PIMENTA, W. A.; PATROCÍNIO FILHO, A. P.; SOUZA, E. B.; NAGAHAMA, H. J. Avaliação da intensidade de tráfego de tratores em alguns atributos físicos de um Argissolo Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência Do Solo**, v.38, P.1000-1010, 2014.

COSTA, N. R.; ANDREOTTI, M.; LOPES, K. S. M.; YOKOBATAKE, K. L.; FERREIRA, J. P.; PARIZ, C. M.; BONINI, C. S. B.; LONGHINI, V. Z. Atributos do solo e acúmulo de carbono na integração lavoura-pecuária em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.39, p.852-863, 2015.

CQFS-Comissão de química e fertilidade do solo. **Manual de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. SBCS/NRS. Porto Alegre, 2004. 400p.

CRUZ, D. L. S.; VALE JÚNIOR, J. F.; CRUZ, P. L. S.; CRUZ, A. B. S.; NASCIMENTO, P. P. R. R. Atributos físico-hídricos de um Argissolo Amarelo sob floresta e savana naturais convertidas para pastagem em Roraima. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.38, p.307-314, 2014.

DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C. Atributos físicos do solo e produtividade da soja em sistema de integração lavoura pecuária com braquiária e soja. **Ciência Rural**, v.42, p. 118-1186, 2012.

DEC, D.; DÖRNER, J.; BALOCCHI, O.; LÓPEZ, I. Temporal dynamics of hydraulic and mechanical properties of an Andosol under grazing. **Soil and Tillage Research**. v.125, p. 44-51, 2012.

DIAS-FILHO, M. B. sistemas silvipastoris na recuperação de pastagens tropicais degradadas. **Anais de Simpósios da 43ª Reunião Anual da SBZ – João Pessoa – PB**, 2006.

DIAS-FILHO, M. B. Alternativas para recuperação de pastagens degradadas na Amazônia. **Encontro Internacional da Pecuária da Amazônia**. 2008.

DIAS-FILHO, M. B. **Diagnóstico das pastagens no Brasil**. Belém, PA. Embrapa Amazônia Oriental, 2014.

DOMIT, L. A.; OKUMURA, R. S.; BARBOSA, G. M. de C.; HIGASHIBARA, L. R.; DALBOSCO, M.; MARIANO, D. de C.; ZORZENONI, T. O.; Guimarães, M. de F. Tempo de adoção do sistema plantio direto e a relação com atributos do solo. **Agrarian**. Dourados, v.7, p.560-569, 2014.

DRESCHER, M. S.; ELTZ, F. L. F.; DENARDIN, J. E.; FAGANELLO, A. Persistência do efeito de intervenções mecânicas para a descompactação de solos sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.35, p.1713-1722, 2011.

DREWRY, J. J. Natural recovery of soil physical properties from treading damage of pastoral soils in New Zealand and Australia: A review. **Agriculture, Ecosystems and Environment**. v.114, p.159–169, 2006.

DREWRY, J. J.; PATON R. J. Effects of cattle treading and natural amelioration on soil physical properties and pasture under dairy farming in Southland, New Zealand, **New Zealand Journal of Agricultural Research**, v.43, p. 377-386, 2000.

DREWRY, J. J.; PATON, R. J.; MONAGHAN, R. M. Soil compaction and recovery cycle on a Southland dairy farm: implications for soil monitoring. **Australian Journal of Soil Research**. v.42, p. 851–856, 2004.

EMBRAPA-Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 2ª edição. Rio de Janeiro: Embrapa solos, 1997. 212p.

ENGERS, L. B. O.; MACIEL, D. G.; MACHADO, R. J. M.; CULAO, G. C.; SILVA, D. A. R. Características de propriedades de bovinocultura leiteira da região noroeste do RS. **VI Jornada de Iniciação Científica e Tecnológica**, Universidade Federal Fronteira Sul. Chapecó. 2016.

FEIX, R. D.; LEUSIN JÚNIOR, S. **Painel do agronegócio no Rio Grande do Sul - 2015 Fundação de Economia e Estatística Centro de Estudos Econômicos e Sociais Núcleo de Estudos do Agronegócio**. Porto Alegre, setembro de 2015. 44p.

FIDALSKI, J.; YAGI, R.; TORMENA, C. A. Revolvimento ocasional e calagem em Latossolo muito argiloso em sistema plantio direto consolidado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.39, p.1483-1489, 2015.

FLORES, J. P. C.; ANGHINONI, I.; CASSOL, L. C.; CARVALHO, P. C. F.; LEITE, J. G. D. B.; FRAGA, T. I. Atributos físicos do solo e rendimento de soja em sistema plantio direto em integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.31, p.771-880, 2007.

FREDDI, O. da S.; CENTURION, J. F.; BEUTLER, A. N., ARATANI, R. G.; LEONEL, C. L. Compactação do solo no crescimento radicular e produtividade da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 31, p. 627-636, 2007.

GREGORY, A. S.; WATTS, C. W.; GRIFFITHS, B. S.; HALLETT, P. D.; KUAN, H.; WHITMORE, A. P. The effect of long-term soil management on the physical and biological resilience of a range of arable and grassland soils in England. **Geoderma**. v.153, p.172–185, 2009.

GUBIANI, P. I.; VAN LIER, Q. de J.; DRESCHER, M. S.; MEZZOMO, H. C.; VEIGA, C. M. C. Relação entre densidade do solo e conteúdo de água em repetidos ciclos de contração e expansão em um Latossolo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.39, p.100-108, 2015.

HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil Tillage Research**, v.82, p.121-145, 2005.

HELLIWELL, J. R.; STURROCK, C. J.; GRAYLING, K. M.; TRACY, S. R.; FLAVEL, R. J.; YOUNG, I. M.; WHALLEY, W. R.; MOONEY, S. J. Applications of X-ray computed tomography for examining biophysical interactions and structural development in soil systems: a review. **European Journal of Soil Science**, v.64, p. 279–297, 2013.

HERBIN, T.; HENNESSY, D.; RICHARDS, K. G.; PIWOWARCZY, A.; MURPHY, J. J.; HOLDEN, N. M. The effects of dairy cow weight on selected soil physical properties indicative of compaction. **Soil Use and Management**, v.27, p. 36–44, 2011.

HORN, R.; VOSSBRINK, J.; BECKER, S. Modern forestry vehicles and their impacts on soil physical properties. **Soil and Tillage Research**, v. 79, p.207-219, 2004

IBGE-Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Produção da pecuária municipal. **Anual anteriormente editada pelo Ministério da Agricultura**. Rio de Janeiro, v.1, ISSN 0101-4234. 2016.

IBGE-Instituto Brasileiro de Geografia E Estatística/ **Pesquisa de Pecuária Municipal e Censo Agropecuário**. SIDRA. Disponível em www.sidra.ibge.gov.br 2006.

IGLESIAS, J. O.; GALANTINI, J. A.; KRÜGER, H.; VENANZI, S. Soil pore distribution as affected by cattle trampling under no-till and reduced-till systems. **Agriscientia**. v.31, p. 93-102, 2014.

JOSCHKO, M.; GRAFF, O.; MILLER, P. C.; KOTZKE K.; LINDNER, P.; PRETSCHNER, D. P.; LARINK, O. A non-destructive method for the morphological assessment of earthworm burrow systems in three dimensions by X-ray computed tomography. **Biology and Fertility of Soils**. v.11, p.88-92, 1991.

KAISER, D. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; COLLARES, G. L.; KUNZ, M. 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, 2009.

KATUWAL, S.; NORGAARD, T.; MOLDRUP, P.; LAMANDÉ, M.; WILDENSCHILD, D.; JONGE, L. W. Linking air and water transport in intact soils to macropore characteristics inferred from X-ray computed tomography. **Geoderma** v.237–238, p.9–20, 2015.

KÖPPEN, W. **Climatologia: con un estudio de los climas de la tierra**. Fondo de Cultura Económica, México, 1948.

KUNZ, M.; GONÇALVES, A. D. M. A.; REICHERT, J. M.; GUIMARÃES, R. M. L.; REINERT, D. J.; RODRIGUES, M. F. Compactação do solo na integração soja-pecuária de leite em Latossolo Argiloso com semeadura direta e escarificação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.37, p.1699-1708, 2013.

KWON, H., NKONYA, E., JOHNSON, T., GRAW, V., KATO, E., KIHU, E. Global estimates of the impacts of grassland degradation on livestock productivity from 2001 to 2011. E. Nkonya et al. (eds.), *Economics of Land Degradation and Improvement – A Global Assessment for Sustainable Development*, 2015.

LAL, R. Degradation and resilience of soils. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London** v.352, p.997-1010, 1997.

LAMANDÉ, M.; ERIKSEN, J.; KROGH, P. H.; JACOBSEN, O. H. Water flow in soil from organic dairy rotations. **Journal of Agricultural Science**. v.155, p. 1113-1123, 2017.

LANZANOVA, M. E.; NICOLOSO, R. S.; LOVATO, T.; ELTZ, F. L.; AMADO, T. J. C.; REINERT, D. J. 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.

LIMA, C. L. R.; SILVA, A. P.; IMHOFF, S.; LEÃO, T. P. Compressibilidade de um solo sob sistemas de pastejo rotacionado intensivo irrigado e não irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.28, p.945-951, 2004.

LIMA, S. S.; ALVES, B. J. R.; AQUINO, A. M.; MERCANTE, F. M.; PINHEIRO, E. F. M.; SANT'ANNA, S. A. C.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Relação entre a presença de cupinzeiros e a degradação de pastagens. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, p.1699-1706, 2011.

LUCCA, L. S.; UHDE, L. T.; FERNANDES, S. B. V.; NICOLETTI, P. C.; MENEGAZZI, A.; SCHIAVO, J. Produção forrageira de espécies de estação quente (*Cynodons*) com utilização de fertilização, no ciclo de produção 2016-17 **XXV Seminário de Iniciação Científica**. Ijuí, 2017.

MANZATTO, C. V. FREITAS JUNIOR, E.; PERES, J. R. R. *Uso agrícola dos solos brasileiros*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002. 174 p.

MCKENZIE, B. M.; DEXTER, A. R. Methods for studying the permeability of individual soil aggregates. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.65, p.23-28, 1996.

MEDEIROS, A. P.; MORAES, B. M. M.; FILHO, R. B. Caracterização produtiva e socioeconômica de municípios intensivos na produção leiteira do estado do Rio Grande do Sul. III Seminário de Jovens Pesquisadores em Economia e Desenvolvimento. 2015.

MODOLO, A. J.; FRANCHIN, M. F.; TROGELLO, E.; ADAMI, P. F.; SCARSI, M.; CARNIELETTO, R. Semeadura de milho com dois mecanismos sulcadores sob

diferentes intensidades de pastejo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.33, P.1200-1209, 2013.

MONTOYA, M. A.; PASQUAL, C. A.; FINAMORE, E. B. Os produtores de leite na região da produção do Rio Grande do Sul. Passo Fundo. Ed. Universidade de Passo Fundo, 2014.

MORAES, M. T.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; SILVA, V. R. Intervalo hídrico ótimo em diferentes estados de compactação de um Latossolo Vermelho sob sistema plantio direto. **VI Jornada Acadêmica da Embrapa Soja**. EMBRAPA Soja. Documentos 328. 2011.

MOREIRA, W. H.; BETIOLI JUNIOR, E.; PETEAN, L. P.; TORMENA, C. A.; ALVES, S. J.; COSTA, M. A. T.; FRANCO, H. H. S. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico em sistema de integração lavoura-pecuária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 36, p.389-400, 2012.

NASCIMENTO, V. N.; ALMEIDA, G. L. P.; BATISTA, P. H. D.; COUTINHO, A. S. Atributos físicos do Neossolo Regolítico distrófico sob pastagem submetido à colheita mecanizada da forragem e pastejo animal. **Boletim de Indústria Animal**, v. 74, p.169-175, 2017.

ORTIGARA, C.; KOPPE, E.; LUZ, F. B.; BERTOLLO, A. M.; KAISER, D. R.; SILVA, V. R. Uso do solo e propriedades físico-mecânicas de Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, p.619-626, 2014.

OZCAN, M. Effect of rotational grazing on some soil properties in Düzce of Turkey. **Journal of the Faculty of Forestry Istanbul University**. v.67, p.29-36, 2017.

PAGENKEMPER, S. K.; PUSCHMANN, D. U.; PETH, S.; HORN, R. Investigation of time dependent development of soil structure and formation of macropore networks as affected by various precrop species. **International Soil and Water Conservation Research**, v.2, p.51-66, 2014.

PETH, P.; HORN, R. The mechanical behavior of structured and homogenized soil under repeated loading. **Journal Plant Nutrition and Soil Science**. v.169, p. 401–410, 2006.

PETH, S.; HORN, R.; BECKMANN, F.; DONATH, T.; FISCHER, J.; SMUCKER, A. J. M. Three-dimensional quantification of intra-aggregate pore-space features using synchrotron-radiation-based microtomography. **Soil Science Society America Journal**. v.72, p.897-907, 2008.

PIANO, J. T.; OLIVEIRA, P. S. R.; COSTA, P. F.; TAFFAREL, L. E.; EGEWARTH, J. F.; SEIDEL, E. P.; CASTAGNARA, D. D.; BORSOI, A.; EGEWARTH, V. A. Soil physical attributes under different grazing management of winter forage crops in crop-livestock system at Southern Brazil. **African Journal Of Agricultural Research** v.10, p. 146-153, 2015.

PIAZZETTA, H. V. L.; MORAES, A; RIBEIRO, T. M. D.; SANDINI, I. E.; LUSTOSA S. B. C.; PELISSARI, A. Pastejo e nitrogênio sobre o crescimento de raízes na mistura

de aveia preta e azevém. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 35, n. 4, suplemento, p. 2749-22768, 2014.

PIETOLA, L.; HORN, R.; YLI-HALLA, M. Effects of trampling by cattle on the hydraulic and mechanical properties of soil. **Soil & Tillage Research**, v.82, p.99-108, 2005.

PILON, C.; MOORE, P. A.; POTE, D. H.; PENNINGTON, J. H.; MARTIN, J. W.; BRAUER, D. K.; RAPER, R. L.; DABNEY, S. M.; LEE, J. Long-term effects of grazing management and buffer strips on soil erosion from pastures. **Journal of Environmental Quality**. v.23, 2017.

POTT, C. A.; ZERBIELLI, L. C.; MARTINS, P. J.; GARDIN, E.; GARCIA, M. L. Qualidade física do solo em sistemas florestais, pecuários e integrados de produção. **Brazilian Journal of Applied Technology for Agricultural Science**, Guarapuava-PR, V.10, p.53-60, 2017.

RAB, M. A.; HALING, R. E.; AARONS, S. R.; HANNAH, M.; YOUNG, I. M.; GIBSON, D. Evaluation of X-ray computed tomography for quantifying macroporosity of loamy pasture soils. **Geoderma** V.213, p.460–470, 2014.

RASA, K.; HORN, R. Structure and hydraulic properties of the boreal clay soil under differently managed buffer zones. **Soil Use and Management**, September, v.29, p.410–418, 2013.

REICHERT, J. M.; KAISER, D. R.; REINERT, D. J.; RIQUELME, U. F. B. Variação temporal de propriedades físicas do solo e crescimento radicular de feijoeiro em quatro sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.44, p.310-319, 2009.

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

RESZKOWSKA, A.; KRÜMMELBEIN, J.; PETH, S.; HORN, R.; ZHAO, Y.; GAN, L. Influence of grazing on hydraulic and mechanical properties of semiarid steppe soils under different vegetation type in Inner Mongolia, China. **Plant Soil**. V.340, p.59–72, 2011.

RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; BRITO, O. R.; LLANILLO R. F.; FERREIRA, F. Compactação do solo: causas e efeitos. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 26, p. 321-344, 2005.

RUPOLLO, C. Z. **Avaliação Físico-Hídrica de um Latossolo Vermelho em Pastagem de Jiggs Manejada Sob Diferentes Intensidades de Pastejo**. Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal de Santa Maria. Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo-RS. 2016.

SANTOS, H. G. dos, et al. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2013. 353 p

SAS-Statistical Analysis System. 2001. System for Microsoft Windows: release 8.2. Cary: 1 CD-ROM.

SCHJONNING, P.; LAMANDÉ, M.; BERISSO, F. E.; SIMOJOKI, A.; ALAKUKKU, L.; ANDREASEN, R. R. Gas diffusion, non-darcy air permeability, and computed tomography images of a clay subsoil affected by compaction. **Soil Science Society of America Journal** V. 77, p.1977–1990, 2013.

SEYBOLD, C. A.; HERRICK, J. E.; BREJDA, J. J. Soil resilience: a fundamental component of soil quality. **Soil Science.** v.164, p. 224-234, 1999.

SILVA, A. P.; LEAO, T. P.; TORMENA, C. A., GONÇALVES, A. C. A. Determination of air permeability in undisturbed soil samples by the decreasing pressure method. **Revista Brasileira de Ciência do Solo.** v.33, p.1535-1545, 2009.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Suscetibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo.** v. 24, p.239-249, 2000.

SOARES FILHO, C. V.; HEINRICHS, R.; PERRI, S. H. V.; CORREIA, A. C. Atributos químicos no solo e produção de *Cynodon dactylon* Cv. terra verde sob doses de biofertilizante orgânico. **Revista Brasileira Saúde e Produção Animal**, Salvador, v.16, p.23-35, 2015.

STRIKER, G. G.; INSAUSTI, P.; GRIMOLDI, A. A.; LEÓN, R. J. C. Root strength and trampling tolerance in the grass *Paspalum dilatatum* and the dicot *Lotus glaber* in flooded soil. **Functional Ecology** v. 20, p. 4-10. 2006.

SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; LIMA, C. L. R. Estimativa da suscetibilidade à compactação e do suporte de carga do solo com base em propriedades físicas de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 963-973, 2008.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S.J. **Análise de solo, plantas e outros materiais.** 2. ed. Porto Alegre: Departamento de Solos: UFRGS, p.174, 1995.

TORMENA, C. A.; BARBOSA, M. C.; COSTA, A. C. S.; GONÇALVES, A. C. A. Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Scientia Agricola**, v.59, p.795-801, 2002.

TRACY, S. R.; GÓMEZ, J. F.; STURROCK, C. J.; WILSON, Z. A.; FERGUSON, A. C. Non-destructive determination of floral staging in cereals using X-ray micro computed tomography (μ CT). **Plant Methods.** v.13, p. 1-12, 2017.

TUFFOUR, H. O.; BONSU, M.; KHALID, A. A. Assessment of soil degradation due to compaction resulting from cattle grazing using infiltration parameters. **International Journal of Scientific Research in Environmental Sciences**, v.2, p. 139-149, 2014.

VAN ES, H.; SCHINDELBECK, R. Field procedures and data analysis for the cornell sprinkle infiltrometer. Cornell University, Department of Crop and Soil Sciences Series. Ithaca, NY: 2003. 8 p.

VIANA, E. T.; BATISTA, M. A.; TORMENA, C. A.; COSTA, A. C. S.; INOUE, T. T. Atributos físicos e carbono orgânico em Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do solo**. v. 35, p.2105-2114, 2011.

WATKIN, B. R.; CLEMENTS, R. J. The effects of grazing animals on pasture. In: Wilson, J.R.(ed.) **Plants relations in pastures**. Melbourne Csiro, 1978, p.273-289. Blackwell Publishing Ltd.

ZOCCAL, R.; ALVES, E. R.; GASQUES, J. G. Diagnóstico da pecuária de leite nacional. Estudo preliminar, Contribuição parxa o plano pecuário. 2012.