



ESTRUTURA E ÁGUA DISPONÍVEL DE UM CAMBISSOLO SUBMETIDO A PERÍODOS DE PASTEJO ROTACIONADO

SOIL STRUCTURE AND AVAILABLE WATER OF AN INCEPTISOL SUBMITTED TO PERIODS OF ROTATION GRAZING

ARTIGO ORIGINAL

Darcy Bitencourt Junior¹

<https://orcid.org/0000-0002-4232-5124>

Luís Eduardo Akiyoshi Sanches Suzuki*¹

<https://orcid.org/0000-0003-4149-5583>

Eloy Antônio Pauletto¹

<https://orcid.org/0000-0001-9679-3081>

Adilson Luís Bamberg¹

<https://orcid.org/0000-0002-3068-9836>

Márcio Renato Nunes¹

<https://orcid.org/0000-0002-3674-279X>

Douglas Perazzoli¹

<https://orcid.org/0000-0002-7249-1676>

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Catarinense, campus Rio do Sul

*Autor para correspondência:

E-mail: dusuzuki@gmail.com

Agradecimentos

Ao IF Catarinense - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Catarinense, campus Rio do Sul, pela disponibilidade da área experimental e auxílio na condução do experimento. Ao técnico Paulo Luis da Luz Antunes, do Laboratório de Física do Solo da FAEM/UFPel, pelo auxílio nas análises de laboratório.

RESUMO: A compactação do solo causada pelo intenso pisoteio animal, sem controle das condições do solo, da pastagem e dos animais, tem levado à degradação dos solos e tem preocupado produtores, técnicos rurais e instituições que atuam na área. Nesse sentido, objetivou-se avaliar o tempo de pastejo e a presença e ausência de pastejo rotacionado, sobre as propriedades físicas e hídricas de um Cambissolo, em Santa Catarina. O experimento constou de plantio de milho para silagem, um período de pousio e plantio de pastagem, sendo dois tratamentos avaliando o número de pastejo rotacionado (2 ou 3 vezes por um período de, respectivamente, 2 ou 3 meses), subdivididos em presença e ausência de pastejo de gado leiteiro. Foram avaliadas em quatro camadas de solo a porosidade, densidade, água disponível para as plantas e a curva de retenção de água do solo. Até o momento, o uso de 3 pastejos rotacionados por área com intervalo médio de 29 dias entre pastejos, em um período de 3 meses, tem melhorado a macroporosidade e a porosidade total do solo, comparado à área em pousio e ao pastejo rotacionado por 2 vezes. A macroporosidade é o atributo mais sensível para identificar diferenças entre os tratamentos (níveis de pisoteio animal). O uso do pastejo rotacionado por 2 ou 3 vezes no período de 2 ou 3 meses, respectivamente, não causa compactação adicional ao solo.

Palavras-Chave: pisoteio animal, tempo de pastejo, compactação do solo, propriedades físicas do solo, curva de retenção de água

ABSTRACT: Soil compaction caused by intense animal trampling, without adoption of strategies of control the soil conditions, pasture and animals, has led to soil degradation and has worried farmer, rural technicians and institutions working in the area. In this sense, the objective was to evaluate the grazing time and the presence and absence of rotational grazing, on the physical and hydric properties of an Inceptisol, in Santa Catarina State. The experiment consisted of corn planting for silage, a fallow period and pasture planting, with two treatments evaluating the number of rotational grazing (2 and 3 times for a period of, respectively, 2 and 3 months), subdivided in the presence and absence of dairy cattle grazing. Porosity, bulk density, available water for plants and the soil water retention curve were evaluated in different soil layers. So far, the use of 3 rotated grazing for area with an average gap of 29 days between trampling, for a period of 3 months, has improved the macroporosity and the total porosity of the soil, compared to the fallow area and rotated grazing for 2 times. Macroporosity is most sensitive attribute to identify differences between treatments (levels of animal trampling). The use of rotational grazing for 2 or 3 times for a period of 2 or 3 months, respectively, do not cause soil compaction.

Keywords: animal trampling, grazing time, soil compaction, soil physical properties, soil water retention curve

INTRODUÇÃO

A compactação resultante do manejo inadequado do solo, das pastagens e dos animais tem preocupado produtores rurais e técnicos, devido às restrições nas propriedades físicas e hídricas do solo e no crescimento e desenvolvimento das plantas.

Aliar a produção vegetal e animal nas regiões tropicais, com elevada produtividade e sustentabilidade ambiental, é um grande desafio devido a presença de solos altamente intemperizados que exigem um manejo conservacionista (PIGNATARO NETTO *et al.*, 2009). Em áreas pastejadas, pelo fato de os animais não permanecerem estáticos na área, é comum observar pontos mais compactados (correspondentes às marcas dos cascos dos animais) distribuídos na superfície solo. No entanto, com o passar do tempo, a tendência é a área ficar praticamente toda compactada (LIMA *et al.*, 2004).

Trabalhos (SILVA *et al.*, 2000; COLLARES, 2005; LANZANOVA *et al.* 2007) têm apresentado os impactos negativos do pisoteio bovino na estrutura do solo. Por exemplo, Lima *et al.* (2013) observaram valores de resistência à penetração em níveis críticos ao desenvolvimento satisfatórios de raízes de plantas até a profundidade de 0,30 m em um Latossolo sob pastagem com bovinos há 25 anos, com taxa de lotação variada e sem renovação da pastagem. Torres *et al.* (2012) verificaram aumento da densidade de um Latossolo após 16 meses de pastejo rotacionado. Collares *et al.* (2011) verificaram que houve compactação pelo gado leiteiro na camada superficial (0,10 m) de Latossolos em propriedades agrícolas do planalto gaúcho.

Por outro lado, também há relatos na literatura onde o pisoteio animal teve pouco impacto ou não atinge níveis críticos de propriedades físicas do solo a ponto de restringir o crescimento das raízes das plantas (CONTE *et al.*, 2011; KUNZ *et al.*, 2013).

A compactação do solo pode afetar de forma diferente as espécies forrageiras, pois cada espécie pode ser mais ou menos tolerante à compactação (BONELLI *et al.*, 2011). Assim como cada espécie forrageira pode influenciar de forma diferente o solo (PIGNATARO NETTO *et al.*, 2009). Magalhães *et al.* (2009) verificaram em experimento em casa de vegetação que o capim-tifton 85 (*Cynodon dactylon* cv tifton 85) recuperou a qualidade estrutural de um Argissolo Vermelho-Amarelo a partir da descompactação biológica do solo.

Estudos específicos e regionais para cada condição de solo, espécie forrageira e manejo de solo e animais podem ajudar a entender os impactos destes na qualidade do solo. Em uma revisão sobre os atributos físicos do solo e as pressões exercidas pelos animais em pastejo, especialmente na região do semiárido brasileiro, Parente e Maia (2011) indicam ser importante definir períodos de descanso da pastagem e conhecimento dos atributos físicos do solo, para a manutenção das pastagens e garantia do sucesso da atividade

pecuária. Na mesma linha, Gurgel *et al.* (2020) citam que o pisoteio dos animais é a principal causa da compactação do solo nos sistemas de produção animal, sendo agravado por pastejos intensos e com maior frequência, com efeito na nutrição mineral e produtividade de plantas forrageiras nesses sistemas.

Dentre as estratégias para mitigar a compactação do solo, têm se proposto formas de intervenção com práticas mecânicas (revolvimento mecanizado) (NUNES *et al.*, 2019), biológicas (introdução de plantas com sistema radicular agressivo) (ABREU *et al.*, 2004; WILLIAMS; WEIL, 2004), ou de prevenção, como o ajuste da carga animal e da intensidade de pastejo (SILVA *et al.*, 2014). Alguns entraves limitam as estratégias de intervenção, e o pastejo rotacionado se mostra como uma alternativa promissora para prevenir e mitigar efeitos adversos do pisoteio animal à qualidade do solo.

O objetivo foi avaliar a influência do número de vezes em que ocorreu o pastejo rotacionado durante o inverno e início da primavera e a presença e ausência de pastejo, sobre os atributos físicos e hídricos relacionados à compactação de um Cambissolo Háplico.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi realizado na área experimental do campus do Instituto Federal Catarinense (IFC), município de Rio do Sul, Santa Catarina, Brasil. A altitude do local é de 700 m e o clima da região é do tipo Cfb (subtropical mesotérmico úmido com verão quente). A média anual de temperatura, umidade relativa e precipitação é de, respectivamente, 18 a 19 °C, 68,7%, e 1.300 a 1.500 mm (PANDOLFO *et al.*, 2002). Para o período do estudo, a partir de dados da EPAGRI-Estação Experimental de Ituporanga, verificou-se precipitações de 747,5 e 579 mm para safra e 748 e 527 mm para safrinha, respectivamente para os anos agrícolas 2006/2007 e 2007/2008.

O experimento foi instalado em um Cambissolo Háplico (SANTOS *et al.*, 2006) com 26% de argila, organizado em um delineamento de blocos ao acaso, com três blocos. O trabalho iniciou em 2005 com o plantio de pastagem para obtenção de biomassa para dessecação e plantio direto da cultura do milho. Anterior à implantação do experimento, a área passou por três anos sob plantio direto. O experimento constou de plantio de milho para silagem, um período de pousio e plantio de pastagem, sendo dois tratamentos avaliando o número de vezes em que ocorreu o pastejo rotacionado (2 e 3 pastejos em um período de, respectivamente, 2 e 3 meses) (Figura 1), subdivididos com presença de pastejo de gado leiteiro e ausência (corte mecânico). Maiores informações sobre o experimento podem ser obtidas em Bitencourt Junior (2010).

A carga animal utilizada na safra 2006/safrinha 2007 foi de 7.200 kg/300 m² e na safra 2007/safrinha 2008 foi de 7.400 kg/300 m², e permanência nas parcelas durante 30 a 40 minutos dia⁻¹, durante dois a três dias, e a disponibilidade

mínima para entrada foi de 1.500 kg biomassa seca ha⁻¹ e para saída a altura residual de 0,07 a 0,10 m.

em março, permanecendo a área sob pousio e, em seguida, plantio da pastagem, ficando na área por aproximadamente dois meses. No outro tratamento, o milho safrinha foi

No período de 2 meses de pastejo, os animais entraram na área por 2 vezes, enquanto no período de 3 meses, eles entraram 3 vezes. Em um dos tratamentos o plantio do milho foi feito em outubro e novembro e a colheita semeado em janeiro e fevereiro, sendo colhido em maio, e até o plantio da pastagem, que permaneceu na área por aproximadamente três meses, a área ficou sob pousio.

2006								2007								2008										
M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J
Tempo de uso para pastejo: 2 meses (2 pastejos)																										
Pastagem								Milho				Pousio				Pastagem				Milho				Pousio		
CS*																										
Tempo de uso para pastejo: 3 meses (3 pastejos)																										
Pastagem								Milho				Pousio				Pastagem				Milho				Pousio		
CS*																										

Figura 1 - Esquema representativo dos períodos e culturas envolvidas no experimento instalado em um Cambissolo, município de Rio do Sul, Santa Catarina. *CS: coleta de solo.

A semeadura do milho (híbrido AS32 Agroeste®) foi realizada em plantio direto sobre palhada dessecada com Glyphosate® (2,0 L ha⁻¹), com um trator Valmet 785 e semeadora de quatro linhas, e a colheita da silagem foi feita com uma ensiladeira em um trator Massey Ferguson 292 equipado com tração 4x4, rebocando uma carreta que recebeu a silagem. No momento da dessecação, a biomassa seca foi de 2,28 e 3,68; 3,7 e 4,47 t ha⁻¹, respectivamente para a safra (22/10/2006 e 06/11/2007), com 49 e 44 dias de acúmulo de biomassa seca, e safrinha (05/01/2007 e 21/01/2008), com 90 e 94 dias de acúmulo. Foram semeadas 60.000 sementes ha⁻¹ de milho, com espaçamento entre linhas 0,80 m. O corte para silagem foi realizado com o grão no ponto de farináceo duro.

A implantação da pastagem de inverno foi feita através de cultivo mínimo com gradagem leve, com semeadura a lanço em 29/05/2006 e 14/06/2007, com a mistura de aveia preta (*Avena strigosa* Scherb.) (50 kg ha⁻¹), azevém (*Lolium multiflorum* Lam.) (15 kg ha⁻¹) e trevo vesiculoso (*Trifolium vesiculosum* Savi) (12,5 kg ha⁻¹) este último somente no primeiro ano. O tempo para início da utilização da pastagem foi de 54 e 65 dias (da semeadura ao primeiro pastejo), respectivamente para 2006 e 2007. O período médio entre os pastejos e cortes para as áreas utilizadas por 2 e 3 meses foi de 29 dias, variando entre 22 e 36 dias.

As coletas de amostras de solo com estrutura preservada foram realizadas no período de outubro a novembro/2007 no tempo de uso para pastejo de 2 meses, e janeiro/2008 para o tempo de uso para pastejo de 3 meses, em cilindros metálicos com diâmetro de 4,85 cm e altura de 3,00 cm. Seis amostras por parcela e camada de solo foram coletadas nas camadas de 0,00 a 0,05; 0,05 a 0,10; 0,10 a 0,15 e 0,15 a 0,20 m, totalizando 18 amostras por tratamento e camada de solo.

No laboratório de Física do solo da UFPel, as amostras coletadas foram saturadas por capilaridade e submetidas a equilíbrio e pesagem nas tensões sequenciais de 1 e 6 kPa na mesa de tensão, e nas tensões de 10, 33, 100 e 1.500 kPa em câmaras de pressão de Richards (KLUTE,

1986). Em seguida, as amostras foram levadas para estufa a uma temperatura de 105 °C (± 1°C) para secagem até massa constante. Utilizando essas informações, calculou-se a macroporosidade (poros de diâmetro maior que 50 µm), a microporosidade (poros de diâmetro menor que 50 µm), a porosidade total e a densidade do solo (BLAKE; HARTGE, 1986). A umidade volumétrica das amostras foi obtida pela relação entre a quantidade de água retida em uma determinada tensão e o volume do cilindro de coleta.

Para ajuste das curvas de retenção de água no solo foi utilizado o modelo de van Genuchten (1980) pelo programa computacional SWRC (Soil Water Retention Curve) (DOURADO-NETO *et al.*, 2001), de acordo com a equação:

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) / [1 + (\alpha\psi)^n]^m$$

Onde: θ = umidade volumétrica (m³ m⁻³); θ_r = umidade residual (m³ m⁻³); θ_s = umidade de saturação (m³ m⁻³); ψ = potencial matricial (kPa); α , n , m = parâmetros de ajuste da curva de retenção de água.

O volume de água disponível foi calculado pela diferença da umidade volumétrica entre a capacidade de campo (tensão = 10 kPa) e o ponto de murcha permanente (tensão = 1.500 kPa).

A partir das tensões aplicadas nas amostras de solo com estrutura preservada, calculou-se a distribuição do tamanho de poros do solo. A porcentagem de poros com diâmetro superior ao calculado para cada tensão foi obtida pela equação:

$$\%V = 100 \{ [1 - (PT - UV)] / PT \}$$

Onde: V = volume de poros do solo com diâmetro superior ao calculado para cada tensão, %; PT = porosidade total do solo, %; UV = umidade volumétrica correspondente à tensão utilizada para o cálculo do diâmetro dos poros, %.

Para as tensões 1, 6, 10, 33, 100 e 1.500 kPa, os respectivos diâmetros de poros são 0,30000, 0,05000, 0,02941, 0,00882, 0,00294 e 0,00020 mm.

A análise estatística foi realizada através da análise de variância considerando o número de vezes em que ocorreu o pastejo rotacionado (2 ou 3 vezes, realizados respectivamente em 2 ou 3 meses), pastejo (com ou sem pastejo) e camada do solo (0,00 a 0,05; 0,05 a 0,10; 0,10 a 0,15; 0,15 a 0,20 m). Para as variáveis com efeito de tratamento significativo (teste F a 5% de significância), a comparação de médias foi realizada considerando-se o teste

de Tukey a 5% de significância. Também se realizou a regressão linear a partir dos dados disponíveis das variáveis-resposta: densidade, porosidade total, macro e microporosidade e água disponível.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise de variância indicou significância para a porosidade total na causa de variação número de pastejo e, para a macroporosidade foi significativo para o número de pastejo e pastejo (Tabela 1).

Tabela 1 - Síntese da análise de variância dos tratamentos para as variáveis físicas e hídrica de um Cambissolo, município de Rio do Sul, Santa Catarina.

Causa de variação	Densidade	Porosidade			Água disponível
		Total	Macro	Micro	
Número de pastejo	ns	**	**	ns	ns
Pastejo	ns	ns	*	ns	ns
Camada	ns	ns	ns	ns	ns
Número de pastejo x Pastejo	ns	ns	ns	ns	ns
Número de pastejo x Camada	ns	ns	ns	ns	ns
Pastejo x Camada	ns	ns	ns	ns	ns
Número de pastejo x Pastejo x Camada	ns	ns	ns	ns	ns
Coefficiente de variação, %	8,22	18,62	40,01	20,88	23,83

Número de pastejo: 2 ou 3 vezes, respectivamente por, 2 ou 3 meses; Pastejo: com ou sem pastejo; Camada: camada de solo 0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,15; 0,15-0,20 m. ns: $p > 0,05$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$.

A densidade do solo não foi influenciada pelo número de pastejo rotacionado (2 ou 3 vezes) nem pela presença ou ausência de pastejo (Tabela 1).

Independente do tratamento, a densidade do solo foi menor na camada superficial do solo (0 a 0,05 m) e subsuperficial (0,15-0,20 m) (Tabela 2). Para a camada superficial, tal fato pode estar associado ao grande volume de raízes do milho e da pastagem nessa camada, ao aporte de resíduos orgânicos e matéria orgânica, além do cultivo mínimo com gradagem leve para implantação da pastagem de

inverno. Para a camada de 0,15-0,20 m, o pisoteio animal e o tráfego de máquinas podem não ter afetado esta camada, indicando que a carga animal, o acúmulo de biomassa e o número de pastejo foram adequados nos tratamentos.

Considerando o coeficiente de variação, para a macroporosidade este foi considerado muito alto, seguido por valores altos da microporosidade e água disponível, médio para porosidade total e baixo para a densidade do solo (PIMENTEL-GOMES; GARCIA, 2002).

Tabela 2 - Valores médios de densidade do solo e porosidade total considerando o número de vezes, presença ou ausência de pastejo e camada de um Cambissolo.

Camada, m	Densidade do solo ($Mg\ m^{-3}$)			Porosidade total ($m^3\ m^{-3}$)		
	Número de pastejo			Número de pastejo		
	2 vezes	3 vezes	Média	2 vezes	3 vezes	Média
	Com pastejo			Com pastejo		
0,00-0,05	1,43	1,40	1,42	0,43	0,44	0,44
0,05-0,10	1,48	1,48	1,48	0,41	0,43	0,42
0,10-0,15	1,48	1,46	1,47	0,40	0,46	0,43
0,15-0,20	1,47	1,45	1,46	0,41	0,47	0,44
Média	1,47	1,45		0,41 b	0,45 a	
	Sem pastejo			Sem pastejo		
0,00-0,05	1,46	1,47	1,46	0,37	0,42	0,40
0,05-0,10	1,48	1,52	1,50	0,39	0,43	0,41
0,10-0,15	1,49	1,57	1,53	0,41	0,42	0,41
0,15-0,20	1,41	1,52	1,47	0,43	0,43	0,43
Média	1,46	1,52		0,40 a	0,42 a	

Médias seguidas pela mesma letra, na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Silva *et al.* (2000) verificaram para solo de classe textural franca, maior densidade de raízes de milho na camada de 0 a 0,10 m. Os autores também constataram que sob condições controladas de carga animal de acordo com o crescimento da pastagem de forrageiras anuais, o sistema de manejo do solo (plantio direto ou convencional) apresentou maior influência na compactação do solo do que o pisoteio bovino.

De forma semelhante, Marchão *et al.* (2009) verificaram valores críticos de resistência à penetração nas trilhas dos bovinos, devido à ausência de cobertura do solo, retirada durante o pisoteio sucessivo dos animais, porém, os autores citam que na maioria das situações a compactação superficial é eliminada pela ação da semeadora com sulcadores do tipo “botinha”.

Um incremento da densidade foi observado na camada de 0,05 a 0,15 m em relação à camada de 0 a 0,05 m, apesar de não significativo. Maiores valores de densidade em subsuperfície estão normalmente relacionados a condições naturais de adensamento do solo ou, como nesse caso, ao tráfego de máquinas e ao uso agrícola anterior ao período avaliado no experimento. As tensões aplicadas na superfície do solo podem ser transmitidas em profundidade, e essa redistribuição as tensões depende das características da máquina e do solo (REICHERT *et al.*, 2007). Com o passar do tempo as diferenças da densidade entre as camadas do solo podem se tornar mais pronunciadas no caso de um

manejo inadequado do solo e dos animais. Neste caso, conjuntos de ações preventivas (controle da carga animal e do tráfego) ou interventoras (como o revolvimento mecânico e a escarificação biológica com espécies de plantas com sistema radicular agressivo) podem ser adotadas para reduzir os efeitos adversos da compactação sobre a performance produtiva dos cultivos.

A compactação do solo causada pelo pisoteio bovino geralmente concentra-se na superfície, até 0,10 m. Esse fato foi observado por Collares (2005), com pisoteio por bovinos de leite em solos com teor de areia variando de 68 a 224 g kg⁻¹ e com teor de argila variando de 411 a 702 g kg⁻¹, e por Lanzanova *et al.* (2007) em um Argissolo Vermelho-Amarelo aluminico típico (248,70 g kg⁻¹ de areia, 406,76 g kg⁻¹ de silte e 344,58 g kg⁻¹ de argila), neste último caso provocado por pisoteio de bovino de corte no sistema de integração lavoura-pecuária. Contudo, neste experimento o pisoteio bovino não causou compactação adicional ao solo, considerando que não houve diferença significativa entre os tratamentos estudados sobre os atributos avaliados e considerados como indicadores deste problema.

A porosidade total foi significativamente maior quando o número de pastejo foi 3 vezes (Tabela 2), enquanto que a microporosidade apresentou valores estatisticamente semelhantes entre os tratamentos (Tabela 3). O aumento da porosidade total na área pastejada por 3 vezes é atribuído ao aumento da macroporosidade (Tabela 3).

Tabela 3 - Valores médios de macroporosidade e microporosidade do solo considerando o número de vezes, presença ou ausência de pastejo e camada de um Cambissolo.

Camada, m	Macroporosidade (m ³ m ⁻³)			Microporosidade (m ³ m ⁻³)		
	Número de pastejo			Número de pastejo		
	2 vezes	3 vezes	Média	2 vezes	3 vezes	Média
	Com pastejo			Com pastejo		
0,00-0,05	0,09	0,11	0,10	0,34	0,33	0,34
0,05-0,10	0,08	0,10	0,09	0,32	0,33	0,33
0,10-0,15	0,09	0,11	0,10	0,31	0,34	0,33
0,15-0,20	0,08	0,11	0,10	0,33	0,36	0,35
Média	0,08 bA	0,11 aA		0,33	0,34	
	Sem pastejo			Sem pastejo		
0,00-0,05	0,06	0,09	0,07	0,31	0,33	0,32
0,05-0,10	0,08	0,08	0,08	0,31	0,35	0,34
0,10-0,15	0,08	0,06	0,07	0,33	0,35	0,34
0,15-0,20	0,08	0,07	0,08	0,34	0,36	0,35
Média	0,08 aA	0,07 aB		0,32	0,35	

Médias seguidas pela mesma letra, minúscula na linha e maiúscula na coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

A porosidade do solo é determinada pela forma como se arranjam suas partículas sólidas. Quando elas se arranjam em íntimo contato, ocorre predominância de sólidos na amostra de solo e a porosidade total é baixa; e se, ao contrário, as partículas se encontram arrançadas em agregados, há a predominância de vazios na amostra de solo e a porosidade é alta (RIBEIRO *et al.*, 2007).

O pastejo por 3 vezes aumentou significativamente a macroporosidade do solo quando comparado ao pastejo por 2 vezes em um período de 2 meses e as áreas sem pastejo

(Tabela 3), mostrando um efeito benéfico do pastejo por 3 vezes em um período de 3 meses na aeração do solo. Este fato pode estar associado ao maior tempo para desenvolvimento das raízes da pastagem e aporte de biomassa ao solo.

Por outro lado, a realização de 2 pastejos por um período de 2 meses não influenciou a macroporosidade quando comparado ao tratamento sem pastejo, indicando que o manejo dos animais adotado neste experimento (permanência de 7.200 kg/300 m² de carga animal utilizada

na safra 2006/safrinha 2007 e de 7.400 kg/300 m² na safra 2007/safrinha 2008, com permanência nas parcelas durante 30 a 40 minutos dia⁻¹, durante dois dias, e a disponibilidade mínima de pasto para entrada de 1.500 kg biomassa seca ha⁻¹ e para saída a altura residual de 0,07 a 0,10 m) não compactou adicionalmente o solo, fato também reforçado pela igualdade estatística entre a presença e ausência de pastejo para a densidade do solo (Tabela 2).

Em sistemas de integração lavoura-pecuária as alterações na densidade e na porosidade do solo geralmente não atingem níveis críticos ao crescimento das raízes das plantas cultivadas, pois a pressão aplicada pelas patas dos animais não é maior que a pressão de preconsoidação do solo, possibilitando o solo se recuperar de eventuais danos à sua estrutura (CONTE *et al.*, 2011).

Kunz *et al.* (2013) verificaram que o pastejo em sistema rotativo no sistema de integração lavoura-pecuária apresentou efeito pouco significativo na densidade e porosidade de um Latossolo argiloso.

Vários estudos (BAVER, 1949; VOMOCIL; FLOCKER, 1961) definiram como um limite mínimo de macroporosidade do valor de 0,10 m³ m⁻³ para um satisfatório crescimento e desenvolvimento de plantas. Com exceção da área com pastejo por 3 vezes, todos os demais tratamentos apresentaram valores inferiores a este. A área pastejada melhorou a macroporosidade a níveis de não comprometimento da aeração do solo e, possivelmente, outros atributos físico-hídricos do solo como a infiltração de água no solo, já que ela é intimamente associada aos

macroporos.

De forma semelhante, Conte *et al.* (2011) não verificaram alteração nos atributos físicos de um Latossolo Vermelho em função da altura de pastejo de inverno (0,10; 0,20; 0,30 e 0,40 cm).

O aumento da densidade do solo é correlacionado com a diminuição da porosidade do solo (Figura 1). Por estarem relacionadas com alterações no volume do solo, a densidade e a porosidade do solo são atributos associados à compactação do solo (REICHERT *et al.*, 2007). Segundo os autores, elas são inversamente proporcionais, ocorrendo a redução da porosidade, geralmente os macroporos, principais responsáveis pela infiltração de água e aeração do solo, sendo estes os primeiros a serem modificados no processo de compactação.

Os macroporos estão relacionados com processos vitais para as plantas, devendo ser preservados (SPERA *et al.*, 2006). Nesse sentido, para permitir as trocas gasosas e o crescimento de raízes da maioria das culturas, o volume de macroporos deve ser superior a 0,10 m³ m⁻³ (BAVER, 1949; VOMOCIL; FLOCKER, 1961). A macroporosidade apresentou-se como um atributo sensível às alterações no solo decorrente do sistema de manejo adotado, fato também observado por outros autores (TREIN *et al.*, 1991). O aporte de resíduos, o crescimento radicular e o controle da permanência dos animais na área podem ter contribuído para a melhor porosidade na área que recebeu 3 pastejos rotacionados, bem como a não ocorrência de compactação adicional no tratamento com 2 pastejos rotacionados.

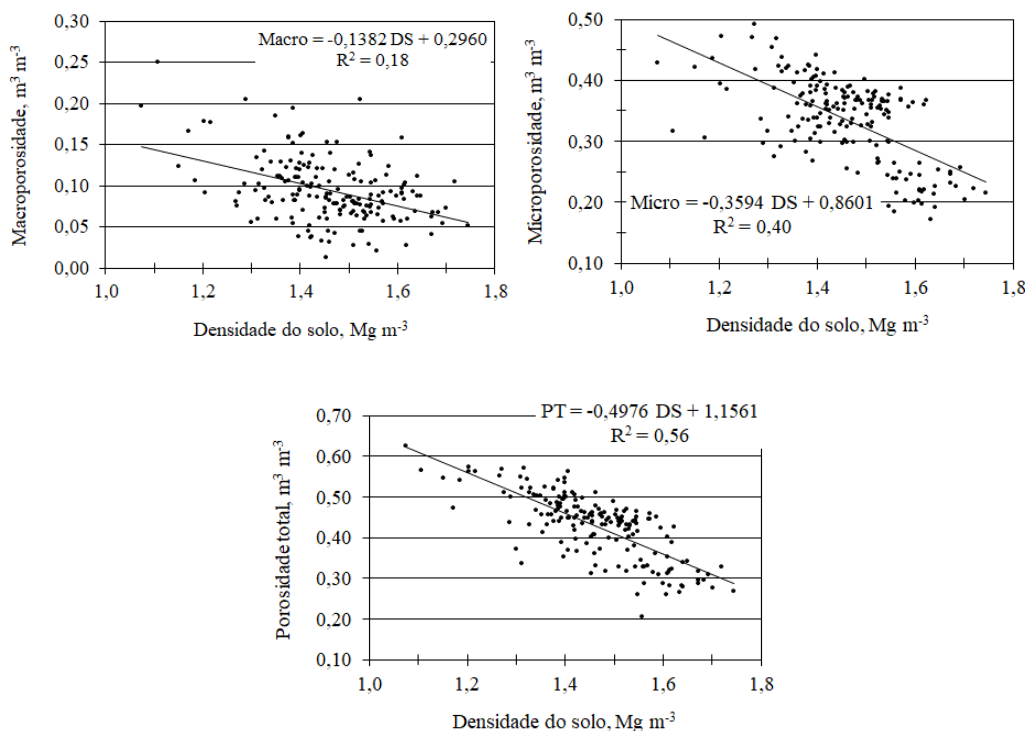


Figura 1 - Regressões lineares e coeficientes de determinação para as relações entre densidade do solo (DS) e macroporosidade (Macro), microporosidade (Micro) e porosidade total (PT) de um Cambissolo.

Considerando o limite mínimo de macroporosidade de 0,10 m³ m⁻³ para o desenvolvimento adequado das culturas (BAVER, 1949; VOMOCIL; FLOCKER, 1966), a densidade

correspondente a este valor, de acordo com a equação gerada pela análise de regressão (Figura 1), é de 1,42 Mg m⁻³, o que significa dizer que valor de densidade superior a este pode

comprometer a aeração do solo, fato observado em praticamente todos os tratamentos (Tabelas 2 e 3). No entanto, ressalta-se que no presente estudo essa afirmação é limitada pelo baixo valor de R^2 ($R^2 = 0,18$), relacionado à grande dispersão dos dados, indicado pelo coeficiente de variação muito alto da macroporosidade ($CV = 40,01\%$) (Tabela 1).

Como os microporos não sofreram efeito dos tratamentos, a água disponível, que está relacionada a este tamanho de poro, não apresentou diferença entre os tratamentos (Tabela 4). O volume de água disponível encontrado nestes tratamentos, entre $0,27$ e $0,30 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, é superior ao maior volume, $0,191 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para a classe argila siltosa, encontrado por Reichert *et al.* (2009) para solos do Rio Grande do Sul.

Tabela 4 - Valores médios observados de água disponível ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) do solo considerando o número de vezes, presença ou ausência de pastejo e camada de um Cambissolo.

Camada, m	Número de pastejo			Número de pastejo		
	2 vezes	3 vezes	Média	2 vezes	3 vezes	Média
	Com pastejo			Sem pastejo		
0,00-0,05	0,29	0,28	0,28	0,27	0,27	0,27
0,05-0,10	0,28	0,28	0,28	0,27	0,28	0,27
0,10-0,15	0,27	0,29	0,28	0,29	0,29	0,29
0,15-0,20	0,29	0,30	0,29	0,29	0,30	0,29
média	0,28	0,29		0,28	0,28	

O aumento da densidade do solo diminui o volume de água disponível, enquanto que o aumento da microporosidade aumenta este volume (Figura 2). A água disponível é aquela retida sobretudo nos microporos, entre as tensões de 10 e 1.500 kPa, fato que justifica os resultados obtidos e a relação inexistente entre a macroporosidade e água disponível, já que estes poros são responsáveis pela infiltração de água e aeração do solo.

Em relação à curva de retenção de água, apenas o número de pastejo (2 e 3 vezes) apresentou diferença significativa ($p < 0,01$) para o solo saturado e nas tensões de 1, 100 e 1.500 kPa, tendo pastejo por 3 vezes resultado em maior umidade nestas tensões quando comparado ao pastejo por 2 vezes, embora as diferenças sejam mínimas ($0,03 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para solo saturado e tensão de 1 kPa e $0,001 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para as tensões de 100 e 1.500 kPa) (Figura 3). Apesar das diferenças nas tensões, o volume de água disponível não foi afetado estatisticamente pelos tratamentos (Tabela 1).

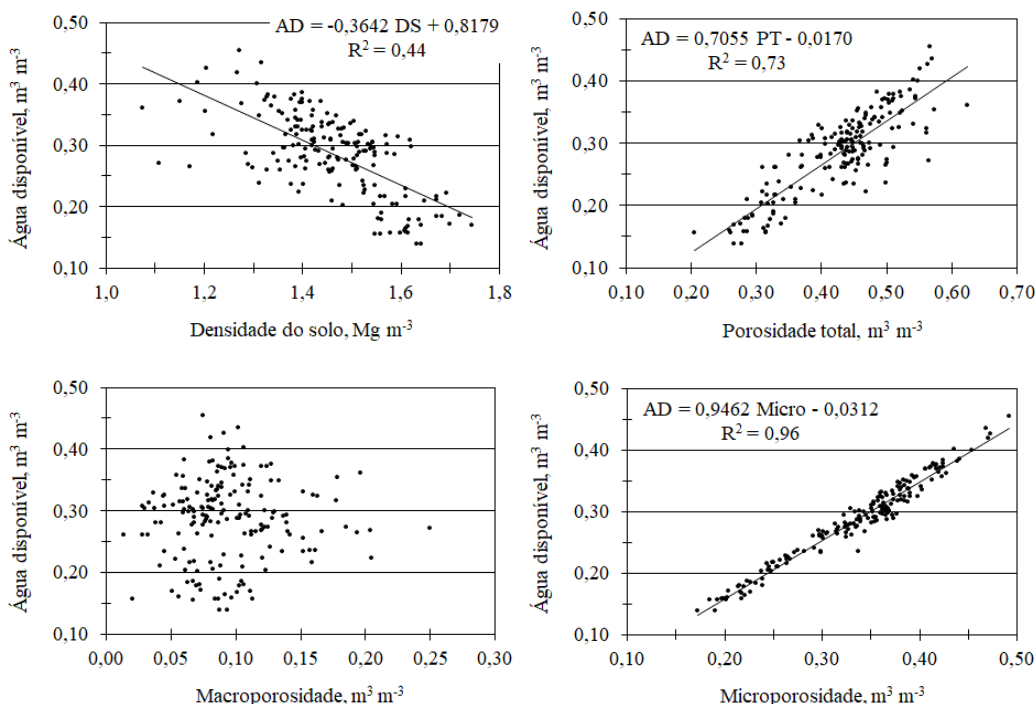


Figura 2 - Regressões lineares e coeficientes de determinação para as relações entre densidade do solo (DS), porosidade total (PT), macroporosidade (Macro), microporosidade (Micro) e água disponível (AD), de um Cambissolo.

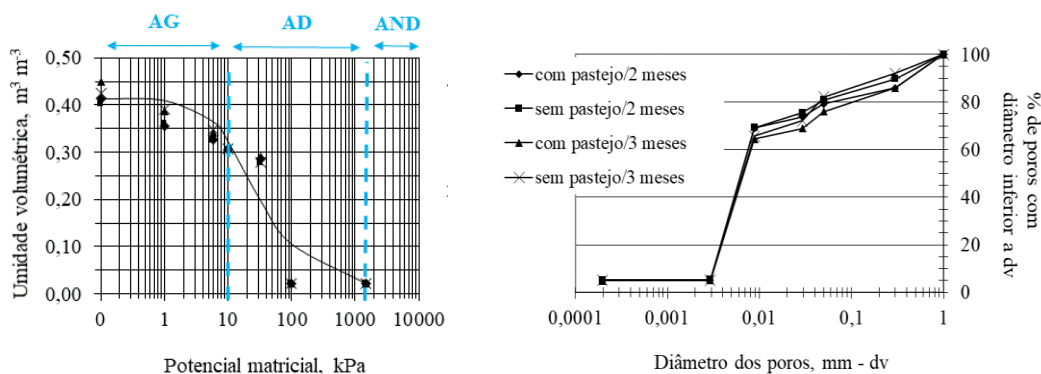


Figura 3 - Curvas de retenção de água com os valores de umidade volumétrica observados (símbolos) e estimados (linha cheia) pelo modelo de van Genuchten (1980) (esquerda) e distribuição do diâmetro dos poros (dv) (direita), em função do número de pastejo, de um Cambissolo. Nas figuras estão representadas as médias das camadas de solo de cada tratamento. AG: água gravitacional; AD: água disponível; AND: água não disponível, definidos por Reichardt (1987).

A camada de solo e a presença ou ausência de pastejo não apresentaram significância para as tensões da curva de retenção de água.

Os bioporos correspondem às cavidades do solo, originadas pela presença de minhocas, cupins e outros organismos do solo, e pelo desenvolvimento de raízes no interior do solo. Camadas superficiais do solo normalmente são dotadas de bioporos e resíduos de raízes. E, se presentes, estes poros de maior diâmetro são preenchidos com água na saturação, dominando completamente o transporte de água na amostra (DIRKSEN, 1991).

O volume de água não disponível (AND), representado por parte da água capilar (retida nos poros capilares) e pela água hidrocópica (adsorvida às partículas do solo) e água de constituição (retida na rede cristalina dos minerais) (Marengo & Lopes, 2005) foi mínimo ($0,02 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e semelhante entre os tratamentos (Tabela 5). Este volume de água está presente no solo mas, não disponível para as plantas.

O pastejo por 3 vezes apresentou maior volume de água gravitacional (AG) (Tabela 5), associado ao maior volume de macroporos em relação aos demais tratamentos (Tabela 3). A água gravitacional se movimenta pela influência da gravidade, sendo responsável pela recarga de aquíferos, e este movimento se dá principalmente nos macroporos do solo.

Observa-se pequenas diferenças nas curvas de distribuição do tamanho de poros, especialmente nos poros de maior diâmetro, associados à estrutura do solo e, conseqüentemente, ao efeito dos tratamentos (Figura 3).

É importante salientar que, em áreas pastejadas de forma intensiva, sem controle da altura de pastejo e número de animais na área, as trilhas formadas pelo trânsito de animais podem ser críticas para a estrutura do solo, o que não ocorreu nas áreas pastejadas dos piquetes, em função de planejamento e do manejo executado.

Tabela 5 - Água gravitacional (AG), água disponível (AD) e água não disponível (AND) ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) considerando o número de vezes e a presença ou ausência de pastejo em um Cambissolo. Os valores representam a média das camadas de solo de cada tratamento.

Camada, m	Número de pastejo		Tempo de pastejo	
	2 vezes	3 vezes	2 vezes	3 vezes
	Com pastejo		Sem pastejo	
AG	0,11	0,14	0,10	0,12
AD	0,28	0,29	0,28	0,28
AND	0,02	0,02	0,02	0,02

Silva *et al.* (2019) verificaram que nas trilhas dos bovinos a degradação das propriedades físicas e baixo teor de matéria orgânica são mais perceptíveis e visíveis, com indicativo de remoção do horizonte superficial do solo devido ao provável intenso pisoteio bovino. Por outro lado, os autores indicam que o manejo das áreas com estas trilhas, com pastagem rotacionada, renovação das pastagens e replantio das áreas sem cobertura de gramíneas, a atividade de pecuária poderia degradar menos o solo.

Em uma revisão sobre os impactos dos rebanhos bovinos sobre o solo em pastagens naturais e suas respectivas

conseqüências ao ambiente, Silva *et al.* (2014) indicaram que a compactação dos solos pelo pisoteio animal pode ser evitada desde que o manejo dos rebanhos, a taxa de lotação, a produção de forragem, a topografia do terreno e o clima sejam avaliados em conjunto e monitorados para determinar o tipo de manejo a ser adotado, com conseqüente controle e prevenção de perdas do solo por erosão.

Os resultados apresentados indicam efeito benéfico do manejo do gado leiteiro e da pastagem (pastejo rotacionado por área com intervalo entre pastejos de 29 dias - 2 ou 3 vezes por um período de, respectivamente, 2 ou 3

meses, subdivididos em presença e ausência de pastejo, com permanência dos animais nas parcelas durante 30 a 40 minutos dia⁻¹, por dois ou três dias, e a disponibilidade

mínima para entrada de 1.500 kg biomassa seca ha⁻¹ e para saída a altura residual de 7 a 10 cm), em evitar a compactação adicional de um Cambissolo.

CONCLUSÕES

O pastejo rotacionado por 3 vezes no período de 3 meses aumenta a macroporosidade e a porosidade total do solo, com consequente incremento no volume de água gravitacional.

Não ocorre compactação adicional do solo quando o pastejo rotacionado se dá por 2 ou 3 vezes, respectivamente no período de 2 e 3 meses, associado ao controle do tempo de permanência dos animais nas parcelas, altura de pastejo e quantidade de biomassa para entrada dos animais na área.

A macroporosidade é sensível em identificar diferenças nos tratamentos, enquanto que as demais variáveis (densidade do solo, microporosidade e volume de água disponível) não detectam diferenças significativas.

O aumento da densidade do solo diminui sua porosidade e o volume de água disponível, enquanto o aumento da microporosidade aumenta o volume de água disponível para as plantas.

BIBLIOGRAFIAS CONSULTADAS

ABREU, S. L.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 519- 531, 2004. DOI: 10.1590/S0100-06832004000300013

BAVER, L. D. Practical values from physical analyses of soils. **Soil Science**, v. 68, n. 1, p. 1-14, 1949.

BITENCOURT JUNIOR, D. **Produção e qualidade de milho-silagem na safra e safrinha, num sistema de integração lavoura-pecuária, em plantio direto**. 2010. 75 f. Tese (Doutorado em Zootecnia) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2010. Disponível em: http://guaiaca.ufpel.edu.br/bitstream/123456789/2630/1/Tese_Darcy_Bitencourt_Junior.pdf. Acesso em: 26 abr. 2021.

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods (part 1)**. 2nd. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. p. 363-375.

BONELLI, E. A.; BONFIM-SILVA, E. M.; CABRAL, C. E. A.; CAMPOS, J. J.; SCARAMUZZA, W. L. M. P.; POLIZEL, A. C. Compactação do solo: Efeitos nas características produtivas e morfológicas dos capins Piatã e Mombaça. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 3, p. 264–269, 2011. DOI: 10.1590/S1415-43662011000300007

COLARES, 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, n. 2, p. 246-250, 2011. DOI: 10.1590/S0103-84782011000200011

COLLARES, G. L. **Compactação em Latossolos e Argissolo e relação com parâmetros de solo e de plantas**. 2005. 149 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

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**, v. 46, n. 10, p. 1301-1309, 2011. DOI: 10.1590/S0100-204X2011001000026

DIRKSEN, C. H. Unsaturated hydraulic conductivity. In: SMITH, K. A.; MULLINS, C. E. (Eds.). **Soil analysis: Physical methods**. New York: M. Dekker, 1991. p. 209-269.

DOURADO-NETO, D.; NIELSEN, D. R.; HOPMANS, J. W.; REICHARDT, K.; BACCHI, O. O. S.; LOPES, P. P. **Soil water retention curve**. version 3. Piracicaba, 2001.

GURGEL, A. L. C.; SANTANA, J. C. S.; THEODORO, G. F.; DIFANTE, G. S.; ALMEIDA, E. M.; ARCANJO, A. H. M.; COSTA, C. M.; COSTA, A. B. G. da; FERNANDES, P. B. Compactação do solo: Efeitos na nutrição mineral e produtividade de plantas forrageiras. **Revista Científica Rural**, v. 22, n. 1, p. 13-29, 2020. DOI: 10.30945/rcr-v22i1.3154

KLUTE, A. Water retention: Laboratory methods. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. 2nd. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. p. 635-660.

KUNZ, M.; GONÇALVES, A. D. M. A.; REICHERT, J. M.; GUIRMARÃES, 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, n. 6, p. 1699-1708, 2013. DOI: 10.1590/S0100-06832013000600026

LANZANOVA, M. E.; NICOLOSO, R. S.; LOVATO, T.; ELTZ, F. L. F.; 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, n. 5, p. 1131-1140, 2007. DOI: 10.1590/S0100-06832007000500028

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, n. 6, p. 945-951, 2004. DOI: 10.1590/S0100-06832004000600002

LIMA, R. P.; LEÓN, M. J.; SILVA, A. R. Resistência mecânica à penetração sob diferentes sistemas de uso do solo. **Scientia Plena**, v. 9, n. 6, p. 1-7, 2013.

MAGALHÃES, E. N. de; OLIVEIRA, G. C. de; SEVERIANO, E. C.; COSTA, K. A. P.; CASTRO, M. B. de. Recuperação estrutural e produção de capim-tifton 85 em um Argissolo Vermelho-Amarelo compactado. **Ciência Animal Brasileira**, v. 10, n. 1, p. 68-76, 2009. DOI: 10.5216/cab.v10i1.2211

MARCHÃO, R. L.; VILELA, L.; PALUDO, A. L.; GUIMARÃES JÚNIOR, R. **Impacto do pisoteio animal na compactação do solo sob integração lavoura-pecuária no oeste baiano**. Planaltina:

Embrapa Cerrados, 2009. 6 p. (Embrapa Cerrados. Comunicado técnico, 163).

MARENCO, R. A.; LOPES, N. F. **Fisiologia Vegetal: Fotossíntese, respiração, relações hídricas e nutrição mineral**. Viçosa: Editora UFV, 2005. 451p.

NUNES, M. R.; PAULETTO, E. A.; DENARDIN, J. E.; SUZUKI, L. E. A. S.; van ES, H. M. Dynamic changes in compressive properties and crop response after chisel tillage in a highly weathered soil. **Soil & Tillage Research**, v. 186, p.183-190, 2019. DOI: 10.1016/j.still.2018.10.017

PANDOLFO, C.; BRAGA, H. J.; SILVA JR, V. P. da; MASSIGNAM, A. M., PEREIRA, E. S.; THOMÉ, V. M. R.; VALCI, F.V. **Atlas climatológico do Estado de Santa Catarina**. Florianópolis: Epagri, 2002. CD-Rom

PARENTE, H. N.; MAIA, M. O. Impacto do pastejo sobre a compactação dos solos com ênfase no Semiárido. **Revista Trópica – Ciências Agrárias e Biológicas**, v. 5, n. 3, p. 3-15, 2011. DOI: 10.0000/rtcab.v5i3.272

PIGNATARO NETTO, I. T.; KATO, E.; GOEDERT, W. J. Atributos físicos e químicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob pastagens com diferentes históricos de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 5, p. 1441-1448, 2009. DOI: 10.1590/S0100-06832009000500034

PIMENTEL-GOMES, F.; GARCIA, C. H. **Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais: Exposição com exemplos e orientações para uso de aplicativos**. Piracicaba: FEALQ, 2002. 309 p.

REICHARDT, K. A **água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1987. 188p.

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

REICHERT, J.M.; ALBUQUERQUE, J.A.; KAISER, D.R.; REINERT, D.J.; URACH, F.L.; CARLESSO, R. Estimation of water retention and availability in soils of Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 6, p. 1547-1560, 2009. DOI: 10.1590/S0100-06832009000600004

RIBEIRO, K. D.; MENEZES, S. M.; MESQUITA, M. G. B.F.; SAMPAIO, F.M.T. Propriedades físicas do solo, influenciadas pela distribuição de poros, de seis classes de solos da região de Lavras-MG. **Ciência e Agrovietecologia**, v. 31, n. 4, p. 1167-1175, 2007. DOI: 10.1590/S1413-70542007000400033

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H.; OLIVEIRA, V. A.; OLIVEIRA, J. B.; COELHO, M. R.; LUMBRERAS, J. F.; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro-RJ: Embrapa Solos, 2006. 306 p.

SILVA, A. S. da; COSTA, G. C. P. da; TÁVORA, G. S. G.; SELIGER, R. Influência do pisoteio do gado na alteração das propriedades físicas de horizontes superficiais em Santo Antônio de Pádua. **Geo UERJ**, n. 35, e46650, 2019. DOI: 10.12957/geouerj.2019.46650

SILVA, G. L. S.; CARNEIRO, M. S. S.; CÂNDIDO, M. J. D.; FURTADO, F. M. V.; SANTOS, F. J. S.; SILVA, M. S. da; COSTA, N. L.; MAGALHÃES, J. A.; RODRIGUES, B. H. N. Uma análise sobre os impactos dos rebanhos sobre o solo nas pastagens naturais. **PUBVET**, v. 8, n. 11, ed. 260, 2014. 18 p.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Densidade do solo, atributos químicos e sistema radicular do milho afetados pelo pastejo e manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 1, p. 191-199, 2000. DOI: 10.1590/S0100-06832000000100021

SPERA, S.T.; SANTOS, H. P. dos; FONTANELI, R. S.; TOMM, G. O. Efeito de pastagens de inverno e de verão em características físicas de solo sob plantio direto. **Ciência Rural**, v. 36, n. 4, p. 1193-1200, 2006. DOI: 10.1590/S0103-84782006000400023

TORRES, J. L. R.; RODRIGUES JUNIOR, D. J.; SENE, G. A.; JAIME, D. G.; VIEIRA, D. M. S. Resistência à penetração em área de pastagem de capim tifton, influenciada pelo pisoteio e irrigação. **Bioscience Journal**, v. 28, Supplement 1, p. 232-239, 2012.

TREIN, C. R.; COGO, N. P.; LEVIEN, R. Métodos de preparo do solo na cultura do milho e ressemeadura do trevo, na rotação aveia + trevo/milho, após pastejo intensivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 15, p. 105-111, 1991.

van GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980. DOI: 10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x

VOMOCIL, J. A., FLOCKER, W. J. Effect of soil compaction on storage and movement of soil, air and water. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v. 4, n. 2, p. 242-246, 1961. DOI: 10.13031/2013.41066

WILLIAMS, S. M.; WEIL, R. R. Crop cover root channels may alleviate soil compaction effects on soybean crop. **Soil Science Society of America Journal**, v. 68, p. 1403-1409, 2004. DOI: 10.2136/sssaj2004.1403