



Revista Brasileira de Ciência do Solo

ISSN: 0100-0683

revista@sbcs.org.br

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo
Brasil

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, vol. 28, núm. 6, 2004, pp. 945-951

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo

Viçosa, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180214041002>

- Como citar este artigo
- Número completo
- Mais artigos
- Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica

Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal

Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

COMPRESSIBILIDADE DE UM SOLO SOB SISTEMAS DE PASTEJO ROTACIONADO INTENSIVO IRRIGADO E NÃO IRRIGADO⁽¹⁾

C. L. R. LIMA⁽²⁾, A. P. SILVA⁽³⁾, S. IMHOFF⁽⁴⁾ & T. P. LEÃO⁽⁵⁾

RESUMO

O incremento da produtividade das pastagens tem sido associado ao comportamento à compressão dos solos. Os objetivos deste trabalho foram: quantificar as curvas de compressão e a pressão de preconsolidação em sistemas de pastejo intensivo rotacionado irrigado e não irrigado. Foram coletadas 96 amostras indeformadas de solo em quatro ciclos sucessivos de pastejo instalado com capim Tanzânia (*Panicum maximum* Jacq.) em um Argissolo Vermelho. Após saturadas com água e equilibradas no potencial (ψ): -10 kPa, as amostras foram pesadas e submetidas ao ensaio de compressão uniaxial com a aplicação sucessiva e contínua de pressões de 25, 50, 100, 200, 400, 600, 800, 1.000, 1.300 e 1.600 kPa. Os resultados comprovaram a hipótese de que houve diferença na compressibilidade do solo sob os sistemas de pastejo rotacionado intensivo irrigado e não irrigado. A maior compactação inicial verificada no sistema de pastejo rotacionado intensivo irrigado favoreceu o deslocamento das curvas de compressão uniaxial para valores superiores de densidade do solo. A pressão de preconsolidação foi significativamente superior no quarto ciclo de pastejo no sistema de pastejo rotacionado intensivo irrigado em relação ao sistema pastejo rotacionado intensivo não irrigado.

Termos de indexação: compactação do solo, curvas de compressão uniaxial, pressão de preconsolidação.

⁽¹⁾ Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor. Recebido para publicação em dezembro de 2003 e aprovado em outubro de 2004.

⁽²⁾ Pós-Doutoranda em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria – UFSM. Faixa de Camobi, Km 9, CEP 97105-900 Santa Maria (RS). E-mail: clrlima@mail.ufsm.br

⁽³⁾ Professor do Departamento de Solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ/USP. Av. Pádua Dias 11, Caixa Postal 9, CEP 13418-900 Piracicaba (SP). E-mail: apisilva@esalq.usp.br

⁽⁴⁾ Professora da Universidad Nacional Del Litoral, Avenida P. Kreder 2805, CEP 3080, Esperanza, Argentina. E-mail: simhoff@fca.unl.edu.ar

⁽⁵⁾ Doutorando em Solos e Nutrição de Plantas, ESALQ/USP. E-mail: tpleao@esalq.usp.br

SUMMARY: SOIL COMPRESSIBILITY UNDER NON-IRRIGATED AND IRRIGATED SHORT DURATION GRAZING SYSTEMS

*Increment in pasture productivity has been associated with the understanding of the soil behavior under compression. The objective of this research was to quantify (a) the compression curves and (b) the preconsolidation pressure of the soils under non-irrigated and irrigated short duration grazing systems. Ninety-six undisturbed soil samples were taken from the four successive pasture cycles of Tanzania grass (*Panicum maximum* Jacq.) in a Hapludalf. The samples were saturated in water and equilibrated at the matrix potential (ψ): -10 kPa and then were weighed and submitted to an uniaxial compression test, applying the following pressures: 25, 50, 100, 200, 400, 600, 800, 1,000, 1,300, and 1,600 kPa. Results support the hypothesis that there is a difference between the soil compressibility under non-irrigated and irrigated short-duration grazing systems. The higher initial compaction verified in irrigated short-duration grazing system favored the displacement of the uniaxial compression curves for higher bulk density values. The preconsolidation pressure was significantly higher in the fourth pasture cycle under irrigated than under the non-irrigated short duration grazing system.*

Index terms: soil compaction, uniaxial compression curves, preconsolidation pressure.

INTRODUÇÃO

O Brasil abrange uma área total de pastagens na ordem de 180 milhões de hectares, o que corresponde a mais de 20 % do território brasileiro (Zimmer et al., 2002). Um dos grandes entraves na obtenção de elevadas produtividades tem sido a compactação do solo. A compressibilidade do solo, que indica a resistência do solo ao decréscimo de volume quando submetido a uma dada pressão (Horn & Lebert, 1994), é determinada não só pelas características do solo, como a textura e a umidade, mas também pela intensidade, frequência e tipo de sistema de pastejo adotado (Stephenson & Veigel, 1987; Defosse & Richard, 2002).

Na literatura, há indicações de que os animais podem exercer pressões no solo da ordem de 350 a 400 kPa (Proffitt et al., 1993; Betteridge et al., 1999). Nie et al. (2001) indicaram ainda que a pressão exercida pelos animais em movimento pode ser o dobro da exercida quando eles estão parados.

Diversas técnicas têm sido utilizadas no intuito de obter incremento da produção das pastagens, como as técnicas de adubação, a adoção de diferentes sistemas de pastejo e, ultimamente, a irrigação (Chanasyk & Naeth, 1995). No entanto, a irrigação em pastagens pode facilitar a compactação do solo, uma vez que os maiores efeitos do pisoteio de animais são evidenciados principalmente quando o solo encontra-se com umidade elevada (Tanner & Mamaril, 1959; Betteridge et al., 1999).

A densidade, a resistência do solo à penetração e a porosidade são alguns dos indicadores utilizados na avaliação da compactação do solo em áreas sob pastagens (Ferrero, 1991; Proffitt et al., 1993; Silva

et al., 2003). Esses indicadores caracterizam-se por avaliar o estado de compactação, mas não avaliam o processo de compressão do solo.

O comportamento compressivo do solo baseia-se na avaliação das curvas de compressão uniaxial. A pressão de preconsolidação do solo, propriedade obtida da curva de compressão, tem sido amplamente aceita como um indicativo de sua capacidade de suporte, uma vez que a aplicação de pressões maiores a este valor podem provocar a compactação adicional ao solo (Dias Júnior & Pierce, 1996; Kondo & Dias Júnior, 1999).

No Brasil, há carência de estudos que descrevam o comportamento compressivo de solos irrigados, cultivados com pastagens e submetidos à utilização intensiva. A hipótese testada neste estudo é de que há diferença na compressibilidade de solos sob os sistemas de pastejo rotacionado intensivo irrigado e não irrigado. O objetivo deste trabalho foi quantificar as curvas de compressão e a pressão de preconsolidação em sistemas de pastejo intensivo rotacionado irrigado e não irrigado.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em uma área experimental da ESALQ/USP localizada na Fazenda Areão, Piracicaba, SP (22° 42' 30" S; 47° 38' 30" W; 576 m). O clima é caracterizado como Cwa (mesotérmico úmido subtropical de inverno seco) de acordo com a classificação de Köppen. A precipitação pluvial média anual é de 1.253 mm, com as chuvas concentradas no período de novembro a fevereiro. A temperatura média anual é de 21 °C, com a média

do mês mais frio inferior a 18 °C e a média do mês mais quente superior a 22 °C. A área encontra-se cultivada com capim Tanzânia (*Panicum maximum* Jacq.), estabelecido em um Argissolo Vermelho (Embrapa, 1999).

A área total do experimento foi de 3,2 ha, dividida em oito blocos de 0,4 ha. Cada bloco dispunha de três piquetes de 0,133 ha, totalizando 24 piquetes. As áreas analisadas foram: uma irrigada com pivô central, e outra não irrigada, cada uma composta por quatro blocos e 12 piquetes.

O ciclo do pastejo, os períodos de descanso e de ocupação foram de 36, 33 e 3 dias, respectivamente. A lotação animal foi ajustada em todos os piquetes para deixar uma quantidade de resíduo remanescente de 2.500 kg MS ha⁻¹.

O preparo do solo consistiu de uma gradagem aradora e duas gradagens niveladoras. A semeadura foi realizada em linhas no mês de março de 1999. Para o estabelecimento das pastagens, foi efetuada a correção do solo por meio de calagem e adubação. O primeiro pastejo foi realizado no mês de agosto do ano de 2001.

Para o manejo da irrigação, foram instaladas cinco baterias de tensiômetros nas profundidades de 0,10; 0,30; 0,50; 0,70 e 0,90 m. A irrigação foi iniciada, quando os tensiômetros registravam um potencial de (Ψ): -30 a -40 kPa, e finalizada em um potencial de (Ψ): -10 kPa.

As amostragens foram feitas em quatro ciclos sucessivos correspondentes aos meses de novembro, dezembro, janeiro e fevereiro dos anos de 2001 e 2002, respectivamente. Em cada piquete, foi retirada, por ciclo, na camada superficial, uma amostra com estrutura indeformada, com anel volumétrico de 0,07 m de diâmetro e 0,025 m de altura, totalizando 96 amostras.

As amostras foram saturadas com água por 48 h e equilibradas no potencial (Ψ): -10 kPa em câmaras de Richards (Klute, 1986). Após o equilíbrio, cada amostra foi pesada e submetida ao ensaio de compressão uniaxial, que consistiu na aplicação sucessiva e contínua de pressões crescentes e preestabelecidas de 25, 50, 100, 200, 400, 800, 1.000, 1.300 e 1.600 kPa, por cinco minutos, período suficiente para atingir 99 % da deformação máxima (Silva et al., 2002). O deslocamento vertical ocorrido em cada pressão aplicada foi registrado por meio de um sensor ligado a um sistema de aquisição de dados automatizado MCT 2000 (MIRAE Engineering, Inc., Buscan, Korea). O ensaio permitiu obter a curva de compressão do solo. As amostras foram secas em estufa a 105 °C, por 24 h, e, a partir destes valores, foi determinada para cada amostra a densidade do solo (D_s) (Blake & Hartge, 1986). A partir das curvas de compressão uniaxial, foram obtidos os valores de pressão de preconsolidação (Casagrande, 1936), utilizando o software Mathcad (Mathsoft Inc., 2000), conforme Imhoff et al. (2004).

Os valores médios da pressão de preconsolidação, para os sistemas de pastejo intensivo rotacionado irrigado (PRI_I) e não irrigado (PRI_{NI}), foram comparados, utilizando o teste t de student a 5 % (SAS, 1991).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os momentos estatísticos das variáveis analisadas sob os sistemas de pastejo rotacionado intensivo irrigado (PRI_I) e não irrigado (PRI_{NI}) estão apresentados no quadro 1. A amplitude de variação da umidade com base gravimétrica esteve possivelmente relacionada com o intervalo de variação do teor argila em cada área de pastejo.

A pressão de preconsolidação, considerada um indicador da pressão máxima a que o solo foi submetido anteriormente, apresentou, nos dois sistemas, valores médios semelhantes aos obtidos por Kondo & Dias Júnior (1999) em solos sob pastagens. Por outro lado, foram superiores aos valores encontrados por Silva et al. (2002) em um solo sob as culturas de soja e de milho. Estas diferenças podem ser atribuídas ao fato de o gado aplicar elevadas pressões ao solo, podendo superar os valores de pressões exercidas por máquinas agrícolas convencionais (Mapfumo et al., 1999), bem como à ausência de revolvimento da camada superficial do solo cultivado com pastagens, operação que normalmente ocorre no cultivo de culturas anuais.

O intervalo de variação da pressão de preconsolidação nas duas áreas analisadas foi semelhante aos valores da pressão exercida por animais da raça bovina, indicados na literatura científica (Willatt & Pullar, 1983; Betteridge et al., 1999).

O intervalo de variação da densidade do solo indicou ampla variabilidade espacial do estado de compactação, provavelmente ocasionada pelas condições diferenciadas de umidade nos dois sistemas (PRI_I e PRI_{NI}) (irrigação). O maior valor médio de densidade observado no sistema de PRI_I reflete o efeito da umidade, ou seja, da implementação da técnica da irrigação sobre a compactação do solo no momento do pisoteio do gado, corroborando os resultados apresentados por Ferrero (1991), Proffitt et al. (1993) e Jorajuria et al. (1997).

Os valores médios da σ_p em cada ciclo, nos sistemas de PRI_I e PRI_{NI} estão apresentados na figura 1. Os valores da σ_p foram maiores no sistema de PRI_I, indicando que o solo foi submetido a um maior estresse nesse sistema. A umidade do solo no momento do pisoteio, mais elevada nesse sistema (irrigação), pode ter contribuído para o aumento significativo da compactação inicial no sistema de PRI_I quando comparado ao do sistema de PRI_{NI}.

Quadro 1. Momentos estatísticos das variáveis analisadas sob os sistemas de pastejo rotacionado intensivo irrigado (PRI_I) e não irrigado (PRI_{NI})

Variável ⁽¹⁾	n	Média	Desvio-padrão	Mínimo	Máximo	C.V. (%)
PRI _I						
Argila, g kg ⁻¹	12	425,83	32,87	370,00	480,00	7,72
Areia, g kg ⁻¹	12	329,17	47,12	250,00	410,00	14,32
Silte, g kg ⁻¹	12	235,00	34,39	190,00	290,00	14,64
Ug, kg kg ⁻¹	48	0,18	0,01	0,15	0,20	6,77
σ_p , kPa	48	268,00	86,49	107,00	466,00	32,25
Ds, Mg m ⁻³	48	1,68	0,08	1,53	1,83	4,62
PRI _{NI}						
Argila, g kg ⁻¹	12	517,50	42,50	440,00	580,00	8,21
Areia, g kg ⁻¹	12	267,50	32,26	220,00	330,00	12,06
Silte, g kg ⁻¹	12	216,67	20,97	180,00	250,00	9,91
Ug, kg kg ⁻¹	48	0,22	0,02	0,15	0,25	11,20
σ_p , kPa	48	246,00	82,12	104,00	438,00	33,44
Ds, Mg m ⁻³	48	1,61	0,08	1,45	1,75	4,83

⁽¹⁾ Ug = umidade com base gravimétrica; σ_p = pressão de preconsolidação; Ds = Densidade do solo.

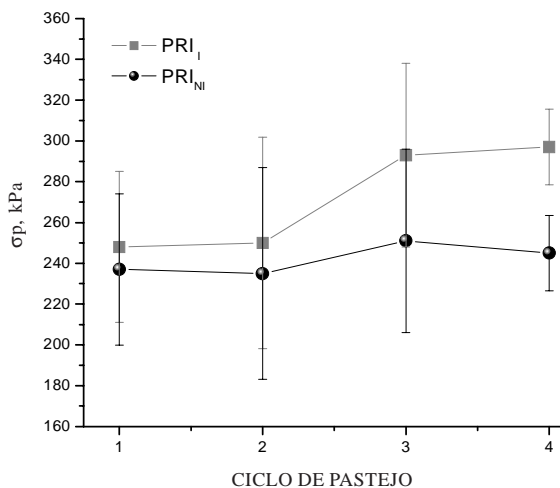


Figura 1. Valores médios da pressão de preconsolidação do solo (σ_p) em cada ciclo sob os sistemas de pastejo rotacionado intensivo irrigado (PRI_I) e não irrigado (PRI_{NI}). Barras verticais indicam a diferença mínima significativa a 5% entre os sistemas de PRI_I e PRI_{NI}.

Os animais aplicam elevadas pressões no solo porque o seu peso é distribuído numa área (o casco) muito pequena. Além disso, os animais não permanecem estáticos na área de pastejo. A pressão que os animais exercem sobre o solo também pode estar relacionada com a energia cinética que é transmitida ao solo, quando estes estão em movimento (Willatt & Pullar, 1983). Um animal em movimento é capaz de realizar um deslocamento ou uma deformação em outro corpo (solo). A força atribuída a este movimento é chamada de energia

cinética, a qual está diretamente relacionada com a massa (peso do animal) e com a velocidade de movimentação. Abaye et al. (1997) indicaram que a força dinâmica exercida por um animal sobre o solo é aproximadamente o dobro da força estática, o que corrobora as observações de Nie et al. (2001).

A ausência de diferença significativa até o terceiro ciclo de pastejo pode estar relacionada com a variação dos dados. A diminuição da variação da σ_p , no decorrer do tempo, avaliada por meio do coeficiente de variação, justificou a obtenção de diferenças significativas desta propriedade entre os dois sistemas analisados no último ciclo de pastejo (Figura 2).

As diferenças da σ_p podem estar associadas ao efeito do pisoteio dos animais e ao tempo de avaliação do experimento. Considerando o fato de os animais não permanecerem estáticos na área, é comum observar em sistemas de pastejo pontos mais compactados (correspondentes às marcas dos cascos) distribuídos desuniformemente no solo.

Por outro lado, é de se esperar que, com os sucessivos ciclos de pastejo, os animais pisoteiem toda a área pastejada, levando à maior compactação e uniformidade do estado físico do solo, contribuindo, assim, para a redução da variação e obtenção de diferenças significativas das variáveis analisadas. Segundo os resultados, após seis meses de instalação do sistema de pastejo, ocorreu uma diminuição da variação, bem como tendência de homogeneização do estado de compactação da área. Similar tendência dos valores de capacidade de suporte no decorrer de um experimento foi apresentada por Horn (2003).

Grande variação também foi verificada nos valores de densidade do solo em cada ciclo de pastejo (Figura 3). Vários estudos indicam que a σ_p é

influenciada pela densidade do solo (Silva et al., 2000; Canarache et al., 2000; Silva et al., 2002; Imhoff et al., 2004). A redução da variação dos dados de D_s condicionou a obtenção de diferenças significativas no terceiro ciclo de pastejo. Foi possível perceber uma homogeneização nos valores deste indicador com o decorrer do tempo do experimento, corroborando os dados de Bell et al. (1997) e de Twerdoff et al. (1999) em sistemas pastoris.

O modelo não-linear, proposto por McNabb & Boersma (1993), foi o que melhor ajustou os dados das curvas de compressão nos sistemas avaliados, conforme resultados da análise (Quadro 2).

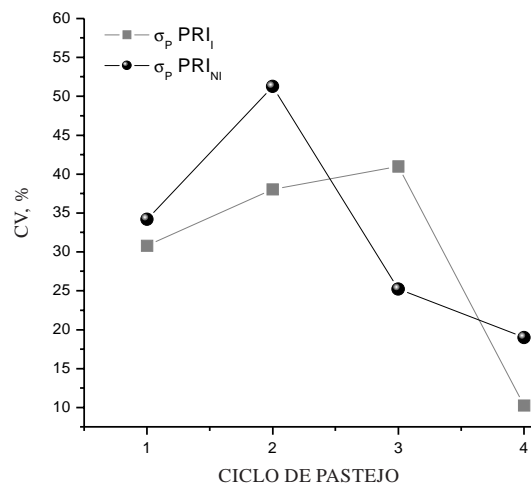


Figura 2. Coeficiente de variação da pressão de reconsolidação do solo (σ_p) em cada ciclo sob os sistemas de pastejo rotacionado intensivo irrigado (PRI_i) e não irrigado (PRI_{NI}).

O modelo explicou 88 e 94 % da variação dos dados de densidade do solo nos sistemas de PRI_i e PRI_{NI}, respectivamente. Todos os parâmetros foram significativos ($P < 0,0001$), visto que o intervalo de confiança do modelo (limite superior e inferior) não incluiu o valor zero (Quadro 2).

A partir do modelo, foram construídas as curvas de compressão uniaxial estimadas para os sistemas de PRI_i e PRI_{NI} (Figura 4).

As curvas de compressão uniaxial do solo refletem as diferenças no processo de compactação dos solos

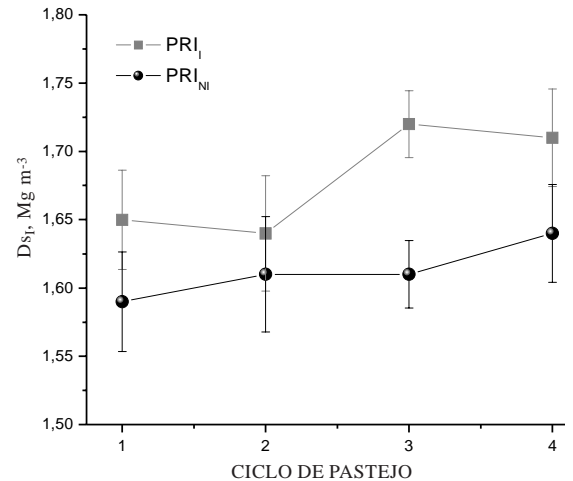


Figura 3. Valores médios de densidade do solo (D_s) em cada ciclo sob os sistemas de pastejo rotacionado intensivo irrigado (PRI_i) e não irrigado (PRI_{NI}). Barras verticais indicam a diferença mínima significativa a 5% entre os sistemas de PRI_i e PRI_{NI}.

Quadro 2. Resultados da regressão não-linear para o modelo: $\ln D_s = \ln (D_{so} \cdot \delta_i) - (a + b \cdot \sigma + c \cdot \delta_c) \cdot (1 - e^{-d \cdot \sigma})$ sob os sistemas de pastejo rotacionado intensivo irrigado (PRI_i) e não irrigado (PRI_{NI})

Parâmetro	Valor estimado	Erro-padrão	Intervalo de confiança	
			Limite inferior	Limite superior
PRI _I ⁽¹⁾				
D _{so}	1,683	0,004	1,675	1,692
a	-0,072	0,006	-0,0843	-0,059
b	-0,045	0,005	-0,056	-0,034
c	5,547	0,961	3,658	7,436
d	0,229	0,021	0,189	0,271
PRI _{NI} ⁽²⁾				
D _{so}	1,618	0,003	1,612	1,624
a	-0,076	0,005	-0,086	-0,066
b	-0,049	0,004	-0,058	-0,041
c	5,134	0,659	3,838	6,430
d	0,204	0,014	0,176	0,232

D_s = densidade do solo (Mg m^{-3}); D_{so} = densidade inicial estimada pelo modelo (Mg m^{-3}); δ_i = densidade inicial/densidade média; δ_c = $(\delta_i - 1) \times (\text{densidade a } 0 \text{ MPa, } \text{Mg m}^{-3})$; σ = pressão aplicada, kPa; a, b, c, d = parâmetros empíricos do modelo.

⁽¹⁾ $F = 62581,1$; $P < 0,0001$; $R^2 = 0,88$ (n = 440). ⁽²⁾ $F = 103147$; $P < 0,0001$; $R^2 = 0,94$ (n = 440).

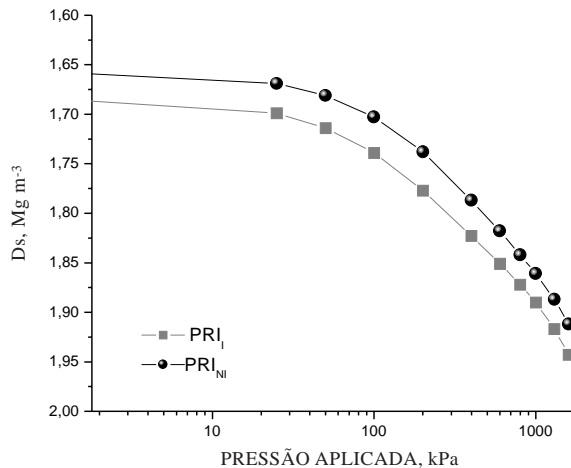


Figura 4. Curvas médias de compressão uniaxial estimadas sob os sistemas de pastejo rotacionado intensivo irrigado (PRI_I) e não irrigado (PRI_{NI}).

em cada área de pastejo. Esta diferença é observada no deslocamento da curva de compressão uniaxial para valores superiores de densidade do solo no sistema de PRI_I.

O deslocamento no sistema de PRI_I pode ter sido condicionado pela maior umidade do solo no momento do pisoteio do gado, ou seja, pela implementação da técnica da irrigação do solo neste sistema. De acordo com Larson et al. (1980), à medida que a umidade aumenta, as curvas de compressão são geralmente deslocadas para a região de maior densidade do solo. A umidade do solo é o fator que determina a magnitude de deformação que pode ocorrer no solo, quando determinado estresse é aplicado (McNabb & Boersma, 1996; Sánchez-Girón et al., 1998; Mosaddeghi et al., 2000).

CONCLUSÕES

1. Os resultados comprovaram a hipótese de que houve diferença na compressibilidade do solo sob os sistemas de pastejo rotacionado intensivo irrigado e não irrigado.

2. A maior compactação inicial verificada no sistema de pastejo rotacionado intensivo irrigado favoreceu o deslocamento das curvas de compressão uniaxial para valores superiores de densidade do solo.

3. A pressão de preconsolidação foi significativamente superior no quarto ciclo de pastejo no sistema de pastejo rotacionado intensivo irrigado em relação ao sistema pastejo rotacionado intensivo não irrigado.

LITERATURA CITADA

- ABAYE, A.O.; ALLEN, V.G. & FONTENOT, J.P. Grazing sheep and cattle together or separately: Effect on soils and plants. *Agron. J.*, 89:380-386, 1997.
- BLAKE, G.R. & HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods*. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, 1986. p.363-375.
- BELL, M.J.; BRIDGE, B.J.; HARCH, G.R. & ORANGE, D.N. Physical rehabilitation of degraded Krasnozems using ley pastures. *Aust. J. Soil Res.*, 35:1093-1113, 1997.
- BETTERIDGE, K.; MACKAY, A.D.; SHEPHERD, T.G.; BARKER, D.J.; BUDDING, P.J.; DEVANTIER, B.P. & COSTALL, D.A. Effect of cattle and sheep treading on surface configuration of a sedimentary hill soil. *Aust. J. Soil Res.*, 37:743-760, 1999.
- CANARACHE, A.; HORN, R. & COLIBAS, I. Compressibility of soils in a long term field experiment with intensive deep ripping in Romania. *Soil Till. Res.*, 56:185-196, 2000.
- CASAGRANDE, A. The determination of the pre-consolidation load and its practical significance. In: *Conference on soil mechanics and foundation engineering*, Cambridge, 1936. *Proceedings*, Cambridge, ICSMFE, 1936. p.60-64.
- CHANASYK, D.S. & NAETH, M.A. Grazing impacts on bulk density and soil strength in the foothills fescue grasslands of Alberta, Canada. *Can. J. Soil Sci.*, 75:551-557, 1995.
- DEFOSSEZ, P. & RICHARD, G. Models of soil compaction due to traffic and their evaluation. *Soil Till. Res.*, 67:41-64, 2002.
- DIAS JÚNIOR, M.S. & PIERCE, F.J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. *R. Bras. Ci. Solo*, 20:175-182, 1996.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, Brasília, Produção de Informação, Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 1999. 412p.
- FERRERO, A.F. Effect of compaction simulating cattle trampling on soil physical characteristics in woodland. *Soil Till. Res.*, 19:319-329, 1991.
- HORN, R. Stress-strain effects in structured unsaturated soils on coupled mechanical and hydraulic processes. *Geoderma*, 116:77-88, 2003.
- HORN, R. & LEBERT, M. Soil compactability and compressibility. In: SOANE, B.D. & van OUWERKERK, C., eds. *Soil compaction in crop production*. Amsterdam, Elsevier, 1994. p.45-69.
- IMHOFF, S.; SILVA, A.P. & FALLOW, D. Susceptibility to compaction, load support capacity and soil compressibility of Hapludox. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68:17-24, 2004.
- JORAJURIA, D.; DRAGHI, L. & ARAGON, A. The effect of vehicle weight on the distribution of compaction with depth and the yield of Lolium / Trifolium grassland. *Soil Till. Res.*, 41:1-12, 1997.

- KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods*. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, 1986. p.635-660.
- KONDO, M.K. & DIAS JÚNIOR, M.S. Compressibilidade de três Latossolos em função da umidade e uso. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:211-218, 1999.
- LARSON, W.E.; GUPTA, S.C. & USECHE, R.A. Compression of agricultural soils from eight soil orders. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:450-457, 1980.
- MACNABB, D.H. & BOERSMA, L. Evaluation of the relationship between compressibility and shear strength of Andisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57:923-929, 1993.
- MACNABB, D.H. & BOERSMA, L. Nonlinear model for compressibility of partly saturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60:333-341, 1996.
- MATHSOFT, Inc. *Mathcad professional reference manual*. Cambridge, Mathsoft Inc, 2000. 180p.
- MAPFUMO, E.; CHANASYK, D.S.; NAETH, M.A. & BARON, V.S. Soil compaction under grazing of annual and perennial forages. *Can. J. Soil Sci.*, 79:191-199, 1999.
- MOSADDEGHI, M.R.; HAJABBASI, M.A.; HEMMAT, A. & AFYUNI, M. Soil compactibility as affected by soil moisture content and farmyard manure in central Iran. *Soil Till. Res.*, 55:87-97, 2000.
- NIE, Z.N.; WARD, G.N. & MICHAEL, A.T. Impact of pugging by dairy cows on pastures and indicators of pugging damage to pasture soil on south – Western Victoria. *Aust. J. Agric. Soil Res.*, 52:37-43, 2001.
- PROFFITT, A.P.B.; BENDOTTI, S.; HOWELL, M.R. & EASTHAM, J. The effect of sheep trampling and grazing on soil physical properties and pasture growth for a Red - Brown earth. *Aust. J. Agric. Soil Res.*, 44:317-331, 1993.
- SÁNCHEZ-GIRÓN, V.; ANDREU, E. & HERNANZ, J.L. Response of five types of soil to simulated compaction in the form of confined uniaxial compression test. *Soil Till. Res.*, 48:37-50, 1998.
- SILVA, V.R.; REINERT, D.J. & REICHERT, J.M. Susceptibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. *R. Bras. Ci. Solo*, 24:239-249, 2000.
- SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. & SOARES, J.M. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho Amarelo distrófico arênico e de um Latossolo Vermelho distrófico típico. I - Estado inicial de compactação. *R. Bras. Ci. Solo*, 26:1-8, 2002.
- SILVA, A.P.; IMHOFF, S. & CORSI, M. Evaluation of soil compaction in an irrigated short-duration grazing system. *Soil Till. Res.*, 70:83-90, 2003.
- SAS INSTITUTE - STATISTICAL Analysis System Institute. *Procedure guide for personal computers*. 5.ed. Cary, 1991.
- STEPHENSON, G.R. & VEIGEL, A. Recovery of compacted soil on pastures used for winter cattle feeding. *J. Manag.*, 40:46-48, 1987.
- TANNER, C.B. & MAMARIL, C.P. Pasture soil compaction by animal traffic. *Agron. J.*, 51:329-331, 1959.
- TWERDOFF, D.A.; CHANASYK, D.S.; MAPFUMO, E.; NAETH, M.A. & BARON, V.S. Impacts of forage grazing and cultivation on near-surface relative compaction. *Can. J. Soil Sci.*, 79:465-471, 1999.
- WILLATT, S.T. & PULLAR, D.M. Changes in soil physical properties under grazes pastures. *Aust. J. Soil Res.*, 22:343-348, 1983.
- ZIMMER, A.; SILVA, M.P. & MAURO, R. Sustentabilidade e impactos ambientais da produção animal em pastagens. In: PEIXOTO, A.M.; MOURA, J.C.; PEDREIRA, C.G.S. & FARIA, V.P., eds. *Inovações tecnológicas no manejo de pastagens*. Piracicaba, FEALQ, 2002. p.31-58.