

INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO NA AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE PASTEJO CONTÍNUO E ROTACIONADO⁽¹⁾

T. P. LEÃO⁽²⁾, A. P. SILVA⁽³⁾, M. C. M. MACEDO⁽⁴⁾,
S. IMHOFF⁽⁵⁾ & V. P. B. EUCLIDES⁽⁴⁾

RESUMO

A qualidade física do solo sob sistemas de pastejo contínuo e rotacionado foi avaliada pelo Intervalo Hídrico Ótimo (IHO). A amostragem foi realizada na área experimental da Embrapa Gado de Corte. Foi estudado um Latossolo Vermelho distrófico. Foram avaliados quatro piquetes, sendo dois no sistema de pastejo contínuo e dois no sistema de pastejo rotacionado. No sistema de pastejo contínuo, implementado com a espécie *Brachiaria decumbens* cv. Basilisk, foram retiradas 30 amostras por piquete, não tendo um dos piquetes recebido adubação de manutenção (Cs), enquanto o outro havia recebido adubação bianual de manutenção (Cc). No sistema de pastejo rotacionado, implementado com a espécie *Panicum maximum* cv. Tanzânia, foram retiradas 30 amostras por piquete; em um dos piquetes, o resíduo pós-pastejo era mantido entre 2,0 e 2,5 t ha⁻¹ de matéria seca total (MST) (R1), enquanto no outro era mantido entre 3,0 e 3,5 t ha⁻¹ MST (R2). As amostras foram submetidas a um gradiente de tensão de água e, posteriormente, utilizadas nas determinações da densidade do solo (*Ds*), resistência do solo à penetração (RP), umidade volumétrica (θ_v) e do IHO. O sistema de pastejo rotacionado apresentou piores condições físicas do solo para o crescimento vegetal, avaliadas pelo critério do IHO. Os maiores valores de *Ds* e menor IHO foram observados no R1, o que foi atribuído às taxas de lotação mais elevadas aplicadas neste piquete.

Termos de indexação: capim brachiaria, capim-tanzânia, retenção de água, resistência do solo à penetração, regressão não-linear.

⁽¹⁾ Extraído da Tese de Mestrado do primeiro autor, apresentada à Universidade de São Paulo – ESALQ/USP. Apresentado no XXIX Congresso Brasileiro de Ciência do Solo em Ribeirão Preto (SP), 2003. Recebido para publicação em julho de 2003 e aprovado em março 2004.

⁽²⁾ Engenheiro-Agrônomo, MSc. Rua Trabalho 615, Compl. 8, V. Independência, CEP 13418-220 Piracicaba (SP). E-mail: tpleao@esalq.usp.br

⁽³⁾ Professor do Departamento de Solos e Nutrição de Plantas, Universidade de São Paulo – ESALQ/USP. Av. Pádua Dias 11, CEP 13418-900 Piracicaba (SP). Bolsista do CNPq. E-mail: apsilva@esalq.usp.br

⁽⁴⁾ Pesquisador da Embrapa Gado de Corte. Rodovia BR 262, km 4, Caixa Postal 154, CEP 79002-970 Campo Grande (MS). E-mail: macedo@cnpgc.embrapa.br

⁽⁵⁾ Professora da Universidad Nacional del Litoral, Av. Kreder 2805, CP 3080-Esperanza (SF), Argentina. E-mail: simhoff@fca.unl.edu.ar

SUMMARY: *LEAST LIMITING WATER RANGE IN THE EVALUATION OF CONTINUOUS AND SHORT-DURATION GRAZING SYSTEMS*

Soil physical quality in continuous and short-duration rotational cattle grazing systems was evaluated using the Least Limiting Water Range (LLWR) approach. Soil samples were collected on an experimental site at the Embrapa - Beef Cattle Research Center (Campo Grande, MS, Brazil). The studied soil was a Typic Acrudox. Four sampling sites were selected: two under a short-duration continuous grazing system and two under intensive short-duration rotational grazing system. Thirty soil cores were collected in each site under the continuous grazing system, planted with Brachiaria decumbens cv. Basilisk grass. One of the continuous grazing sites had received biannual fertilization (Cc) while the other had not been fertilized (Cs). Thirty soil cores were also collected in each site under the intensive rotational grazing system, planted with Panicum maximum cv. Tanzania grass. In the intensive rotational grazing system the two sites differed in relation to the post-graze residue level left. In one site (R1) it varied from 2.0 to 2.5 t total dry matter (TDM) ha⁻¹ and in the other R2 it varied from 3.0 to 3.5 t TDM ha⁻¹. The cores were subjected to a soil water suction gradient, and then used for soil bulk density (D_b), soil resistance to penetration (SR), volumetric water content (θ_v), and LLWR determinations. The intensive short-duration rotational grazing system presented the worse physical soil conditions for plant growth, as evaluated by the LLWR. The highest D_b and the lowest LLWR were found in R1, which could be a consequence of the heavier stocking rates used on this site.

Index terms: Brachiaria grass, Tanzania grass, water retention, soil resistance to penetration, nonlinear regression.

INTRODUÇÃO

A degradação das pastagens cultivadas tem representado uma ameaça à sustentabilidade do sistema de produção de carne no Brasil. A maior parte dos estudos que abordam o problema relaciona o processo de degradação com as interações entre fatores zootécnicos (taxa de lotação animal), da planta (perda de vigor, alterações morfológicas) e do solo (propriedades químicas), enquanto o problema da degradação física do solo tem sido deixado em segundo plano.

O pisoteio animal em toda superfície e, às vezes, repetidamente no mesmo local, pode promover drásticas alterações nas condições físicas do solo para o crescimento do sistema radicular. A extensão e a natureza destes efeitos são determinadas pela taxa de pisoteio, pelo tipo de solo e, principalmente, pela umidade do solo na ocasião do pastejo. O pastejo realizado em condições de umidade elevada maximiza a degradação física do solo, prejudicando o crescimento de plantas (Betteridge et al., 1999).

A principal consequência do pisoteio animal excessivo é a compactação do solo, caracterizada pelo aumento da densidade do solo como resultado de cargas ou pressões aplicadas. Deste modo, a maioria dos estudos que avaliam os efeitos do pisoteio sobre a qualidade física do solo se baseiam na quantificação da densidade do solo (Mead & Chan, 1992; Harrison et al., 1994; Mapfumo et al., 2000) e outras propriedades físicas do solo afetadas pela compactação, tais como: a resistência à penetração (Williams & Kalmbacher, 1996; Imhoff et al.,

2000a,b), características de retenção de água (Hart et al., 1988; Bell et al., 1997) e infiltração (Francis et al., 1999).

Novas abordagens metodológicas têm sido propostas para avaliar a qualidade física do solo (Moraes et al., 2002), destacando-se o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO). O IHO representa a faixa de conteúdo de água no solo definida no limite superior pela umidade do solo na capacidade de campo, ou no conteúdo de água em que a aeração do solo se torna limitante, e no limite inferior pelo conteúdo de água no ponto de murcha permanente, ou no conteúdo de água em que a resistência do solo à penetração torna-se limitante (Kay et al., 1997).

O IHO integra num único parâmetro os efeitos da aeração, resistência à penetração e características de retenção de água do solo sobre o crescimento vegetal (Silva & Kay, 1996). Diversos estudos comprovaram a eficácia do IHO como indicador de alterações nas propriedades físicas do solo em diferentes culturas e sistemas de manejo (Silva et al., 1994; Tormena et al., 1998; Wu et al., 2003), no entanto, sua eficiência como indicador de alterações nas propriedades físicas do solo causadas pelo pisoteio animal em pastagens cultivadas ainda não foi avaliada.

A hipótese deste estudo é que o IHO seja influenciado pelo sistema de pastejo e manejo da pastagem. Assim, o objetivo deste trabalho foi determinar o IHO em um Latossolo Vermelho distrófico sob sistema de pastejo contínuo plantado com a espécie *Brachiaria decumbens* cv. Basilisk, com e sem adubação de manutenção, e sob sistema

de pastejo rotacionado plantado com a espécie *Panicum maximum* cv. Tanzânia em dois níveis de resíduo pós-pastejo.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido na Embrapa Gado de Corte, localizada em Campo Grande, Mato Grosso do Sul (20° 26' 48" S, 54° 43' 19" W). A área, segundo a classificação de Köppen, situa-se na faixa de transição entre os climas Cfa e Aw. A precipitação pluvial anual é em torno de 1.500 mm e a temperatura média anual oscila entre 19 e 25 °C (Embrapa, 1979).

O solo utilizado foi um Latossolo Vermelho distrófico (Embrapa, 1999) com teores médios de 399 g kg⁻¹ de argila, 66 g kg⁻¹ de silte e 535 g kg⁻¹ de areia (classe textural argilosa). As amostragens foram realizadas em dois experimentos da Embrapa Gado de Corte sendo um em sistema de pastejo contínuo e outro em sistema de pastejo rotacionado.

No experimento com pastejo rotacionado, foram amostrados dois piquetes com área total de 0,18 ha cada (56,25 x 33,33 m), estabelecidos com a espécie forrageira *Panicum maximum* cv. Tanzânia. Os piquetes são submetidos ao sistema de pastejo rotativo, com sete dias de pastejo e 35 dias de descanso, e fazem parte de um experimento implementado em 1999. O experimento foi conduzido de forma a manter uma saturação por bases, na faixa de 45-50 % na camada de 0-20 cm de profundidade; fósforo disponível (Mehlich-1), na faixa de 4-8 mg dm⁻³, e potássio (Mehlich-1), na faixa de 60-80 mg dm⁻³. A adubação nitrogenada foi de 100 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N, sendo metade da dose na forma de sulfato de amônio e metade na forma de uréia. O diferencial entre os piquetes foi no nível de resíduo pós-pastejo que, neste caso, foi função direta da lotação animal. Em um dos piquetes o resíduo foi de 2,0-2,5 t ha⁻¹ de matéria seca total (MST), piquete designado (R1) e no outro piquete o resíduo pós-pastejo foi de 3,0-3,5 t ha⁻¹ MST designado (R2).

No experimento com pastejo contínuo, foram amostrados dois piquetes com área total de 0,7 ha cada (50 x 140 m) estabelecidos com a espécie forrageira *Brachiaria decumbens* cv. Basilisk. O pastejo foi realizado com lotação contínua, sendo utilizados dois animais por piquete. Os animais entraram nos piquetes no mês de maio e foram retirados após um ano. Animais adicionais foram colocados ou retirados com o objetivo de manter a disponibilidade de forragem em 3,0 t ha⁻¹ MST. Os piquetes foram implementados a partir da recuperação de uma pastagem degradada em novembro de 1993, com calagem (2,5 t ha⁻¹) e adubação (350 kg ha⁻¹ da formulação comercial 0-20-20). Destes dois piquetes, um não recebeu adubação de manutenção designado

(Cs), enquanto o outro recebeu adubação bianual (400 kg ha⁻¹ da formulação comercial 0-20-20 aplicada a lanço), calagem superficial em 1998 (2 t ha⁻¹) e gessagem (500 kg ha⁻¹), designado (Cc).

A lotação animal média nos piquetes com pastejo contínuo foi de 1,68 UA ha⁻¹, no Cc, e de 1,53 UA ha⁻¹, no Cs. Nos piquetes com pastejo rotacionado, a lotação média de três ciclos foi de 4,8 e 4,12 UA ha⁻¹ nos tratamentos R1 e R2, respectivamente, para o período chuvoso, e de 2,26 UA ha⁻¹ (com suplementação), para os dois resíduos no período seco.

As amostragens foram realizadas na camada de 0-10 cm de onde foram retirados 30 anéis volumétricos de 5 cm de altura por 5 cm de diâmetro interno por piquete, obedecendo a uma malha de 10 x 10 m nos tratamentos Cs e Cc e de 5 x 10 m nos tratamentos R1 e R2. A diferença nas malhas de amostragem foi necessária por ser a maior área dos piquetes em sistema de pastejo contínuo em relação aos piquetes em sistema de pastejo rotacionado, em virtude da baixa lotação animal adotada no sistema de pastejo contínuo.

No laboratório, as amostras foram saturadas com água e, em seguida, a curva de retenção de água no solo foi determinada seguindo o procedimento descrito por Silva et al. (1994). As amostras foram divididas em dez grupos de nove, sendo três amostras de cada tratamento por grupo. Cada grupo de amostras foi submetido a uma das seguintes tensões: 0,002; 0,004; 0,006; 0,008 e 0,01 MPa, em mesas de tensão (Topp & Zebchuk, 1979), e 0,03; 0,05; 0,07; 0,1 e 1,5 MPa, em câmaras de pressão (Klute, 1986). Após o equilíbrio, as amostras foram armazenadas em temperaturas de ± 5 °C por aproximadamente um mês, para garantir a distribuição uniforme da umidade do solo no interior dos anéis, para realização das medidas de resistência do solo à penetração (RP).

A RP foi determinada em três pontos em cada uma das amostras indeformadas com um penetrômetro desenvolvido no Laboratório de Física do Solo da ESALQ/USP (Tormena et al., 1998). O penetrômetro apresenta cone com semi-ângulo de 30° e área da base de 0,1167 cm² e velocidade de penetração de 1,0 cm min⁻¹ (Bradford, 1980). Após os ensaios, as amostras foram pesadas e secas em estufa a 105 °C para determinação da umidade gravimétrica (θ_g) (Gardner, 1986) e D_s (Blake & Hartge, 1986), a partir das quais foi obtida a umidade volumétrica (θ_v).

As curvas de retenção de água no solo e de resistência do solo à penetração foram ajustadas (SAS, 1999) por meio das funções descritas por Silva et al. (1994) e Betz et al. (1998). Em uma primeira etapa, as curvas foram ajustadas individualmente para cada um dos tratamentos e, em seguida, os coeficientes obtidos nos ajustes foram comparados entre si por meio de teste *t*, utilizando os valores ajustados dos coeficientes e os erros-padrões da

estimativa de cada coeficiente (Glantz & Slinker, 1990).

$$t = (\text{Coeficiente}_i - \text{Coeficiente}_j) / \sqrt{(EP_i^2 + EP_j^2)} \quad (1)$$

em que: coeficiente_i = estimativa do coeficiente no tratamento i; coeficiente_j = estimativa do coeficiente no tratamento j; EP_i = Erro-padrão da estimativa do coeficiente no tratamento i, e EP_j = Erro-padrão da estimativa do coeficiente no tratamento j.

A estimativa da estatística *t* para as comparações foi então contrastada com o valor *t* tabelado para uma distribuição bilateral com *n* graus de liberdade, em que *n* = (número de observações – número de parâmetros estimados). Foi utilizado um limite crítico de significância de *p* = 0,05. Uma vez estimados e comparados entre os tratamentos, os parâmetros das curvas de resistência à penetração e retenção de água foram utilizados na quantificação do intervalo hídrico ótimo.

Além das estimativas dos coeficientes, foram também utilizados no cálculo do IHO: (a) a umidade do solo na capacidade de campo (θ_{cc} , na tensão de 0,01 MPa) (Haise et al., 1955), (b) a umidade do solo no ponto de murcha permanente (θ_{pmp} , na tensão de 1,5 MPa) (Richards & Weaver, 1944); (c) a umidade do solo em que a porosidade de aeração é $\leq 10\%$ (θ_{pa}) (Grable & Siemer, 1968), calculada como $[(1 - D_s D_p^{-1}) - 0,1]$, em que *D_p* corresponde à densidade de partículas, assumida como 2,65 g cm⁻³, e (d) a umidade do solo em que a RP é $\geq 3,0$ MPa (θ_{rp}) (Lipiec & Hakansson, 2000). Os itens (a) e (b) foram estimados a partir da curva de retenção de água no solo, enquanto o item (d) foi estimado a partir da curva de resistência do solo à penetração. São quatro as possibilidades no cálculo do IHO, dependendo dos valores dos quatro parâmetros (Wu et al., 2003):

(a) Se ($\theta_{pa} \geq \theta_{cc}$) e ($\theta_{rp} \leq \theta_{pmp}$):

$$\text{IHO} = \theta_{cc} - \theta_{pmp};$$

(b) Se ($\theta_{pa} \geq \theta_{cc}$) e ($\theta_{rp} \geq \theta_{pmp}$):

$$\text{IHO} = \theta_{cc} - \theta_{rp};$$

(c) Se ($\theta_{pa} \leq \theta_{cc}$) e ($\theta_{rp} \leq \theta_{pmp}$):

$$\text{IHO} = \theta_{pa} - \theta_{pmp};$$

(d) Se ($\theta_{pa} \leq \theta_{cc}$) e ($\theta_{rp} \geq \theta_{pmp}$):

$$\text{IHO} = \theta_{pa} - \theta_{rp}.$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O ajuste dos modelos de retenção de água e resistência à penetração para cada um dos tratamentos mostrou não haver diferenças significativas entre eles, quando comparados os seus coeficientes por meio do teste *t* (Glantz & Slinker, 1990). Deste modo, foi possível realizar o ajuste das

curvas de retenção da água e resistência do solo à penetração, utilizando a totalidade dos dados obtidos (*N* = 120),

$$\theta_v = 0,1806 D_s^{0,3426} \psi^{-0,1194} \quad R^2 = 0,85 \quad (2)$$

$$\text{RP} = 0,1162 \theta_v^{-1,4858} D_s^{4,77} \quad R^2 = 0,83 \quad (3)$$

nas quais:

θ_v = Conteúdo volumétrico de água no solo (cm³ cm⁻³);

ψ = Tensão de água no solo (MPa);

RP = Resistência do solo à penetração (MPa);

D_s = Densidade do solo (g cm⁻³).

O IHO é representado pela área hachurada na figura 1, tendo sido definido em seu limite superior pela θ_{cc} e em seu limite inferior pela θ_{pmp} ou θ_{rp} . A amplitude do IHO foi de 0 até 0,1482 cm³ cm⁻³. O IHO aumentou até a *D_s* de 1,16 g cm⁻³, quando a θ_{rp} substituiu a θ_{pmp} como limite inferior (Figura 1b). A θ_{pa} não representou limitação no solo estudado até a *D_s* de 1,44 g cm⁻³. A densidade crítica (*D_{sc}*) corresponde ao valor de *D_s* no qual o IHO é igual a zero, sendo definida pela interseção das equações que determinam os limites, superior e inferior, do IHO. Neste estudo, a *D_{sc}* correspondeu à interseção da θ_{cc} com a θ_{rp} , sendo igual a 1,43 g cm⁻³ (Figura 1a).

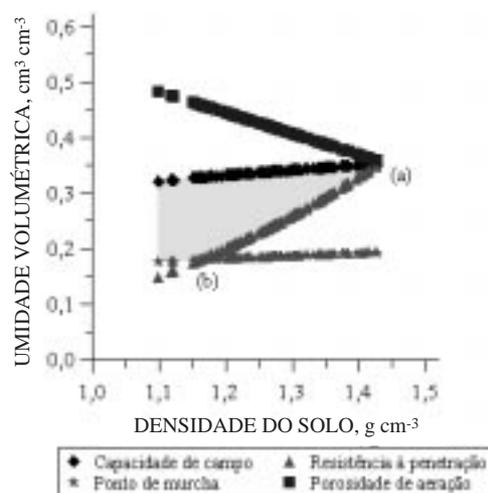


Figura 1. Variação do conteúdo de água com a densidade do solo nos níveis críticos da capacidade de campo ($\psi = 0,01$ MPa), ponto de murcha permanente ($\psi = 1,5$ MPa), porosidade de aeração de 10% e resistência à penetração de 3,0 MPa no Latossolo Vermelho distrófico estudado. A área hachurada representa o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO). A densidade crítica (*D_{sc}*), em que o IHO = 0, é demonstrada em (a), e a densidade em que a resistência à penetração substitui o ponto de murcha permanente como limite inferior do IHO em (b).

A qualidade física do solo para o crescimento de plantas em cada um dos tratamentos foi analisada de acordo com a distribuição dos valores de D_s dentro da amplitude de variação do IHO, conforme pode ser observado na figura 2. As colunas verticais representam a média dos valores de $D_s \pm$ um desvio-padrão obtidos em cada um dos tratamentos analisados, estando relacionadas com o eixo x do gráfico.

Os piquetes no sistema de pastejo contínuo, com adubação de manutenção (Cc) e sem adubação de manutenção (Cs), apresentaram condições semelhantes, no que diz respeito aos valores de D_s e ao IHO (Figura 2a). A presença ou não de adubação de manutenção não exerceu efeito significativo sobre as propriedades físicas do solo no sistema de pastejo contínuo estudado. Esse comportamento pode ser atribuído aos valores similares das taxas de lotação animal empregadas, cujas médias de seis anos foram de 1,53 e 1,68 UA ha⁻¹, para Cc e Cs, respectivamente.

Como não houve diferenças significativas entre os tratamentos Cc e Cs e por haver um consenso de que os produtores que trabalham com pastejo contínuo em *Brachiaria decumbens* não realizam, em sua maioria, investimentos consideráveis no sistema (Macedo, 2001), as comparações entre os

sistemas de pastejo contínuo e rotacionado foram realizadas utilizando o tratamento Cs como referência.

Na figura 2b, pode-se observar a comparação entre Cs e o sistema de pastejo rotacionado com resíduo de 2,0-2,5 t ha⁻¹ MST (R1). O R1 apresentou condições físicas do solo para o crescimento de plantas muito inferiores ao Cs. Este resultado discorda daquele encontrado por Proffitt et al. (1995), em experimento comparando os sistemas de pastejo contínuo e controlado, implantados em um solo de textura média e pastejados por ovelhas. Ao fim do período experimental, os autores observaram que todos os atributos estruturais medidos (D_s , taxas de infiltração e resistência tênsil) indicaram que a qualidade física da camada superficial do solo sob sistema de pastejo controlado era superior à do sistema de pastejo contínuo, sendo similar à do tratamento não pastejado.

No sistema de pastejo controlado avaliado por Proffitt et al. (1995), os animais eram retirados da área quando o solo se aproximava do limite de plasticidade, sendo possivelmente esta a razão pela qual esse sistema obteve um melhor resultado quando comparado com o sistema de pastejo contínuo.

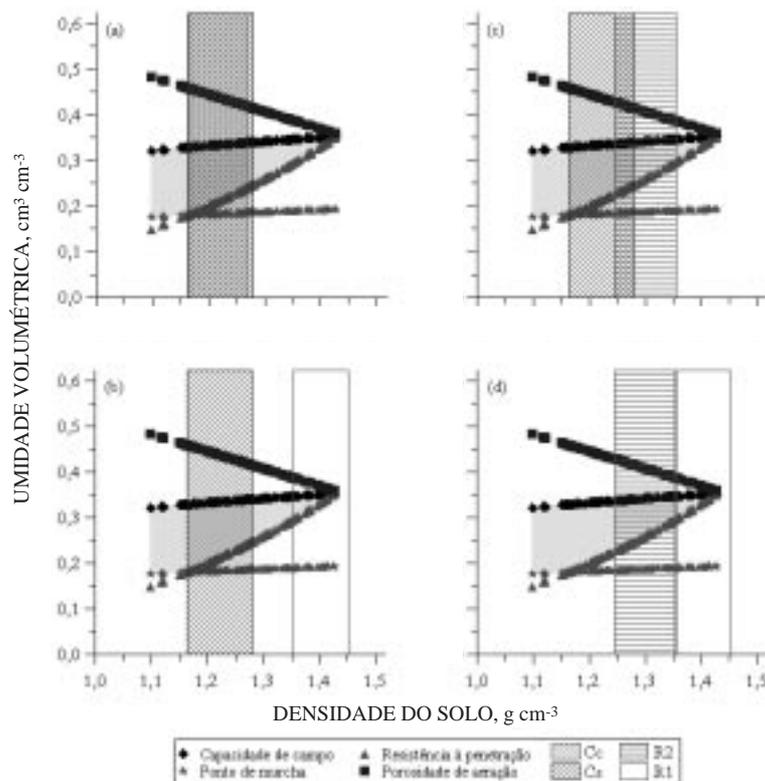


Figura 2. Comparação entre os tratamentos avaliados: (a) Cc e Cs; (b) Cs e R1; (c) Cs e R2; e (d) R1 e R2, através do critério do Intervalo Hídrico Ótimo (IHO). A área hachurada corresponde ao IHO e as colunas verticais correspondem à média dos valores de $D_s \pm$ um desvio-padrão.

As diferenças no hábito de crescimento das espécies presentes nos sistemas de pastejo contínuo e rotacionado podem ter influenciado os resultados. A espécie *Panicum maximum* cv. Tanzânia, presente no R1, apresenta hábito de crescimento cespitoso. Isso contribui para que o solo fique descoberto entre as touceiras e para que os animais somente transitem nessas áreas, intensificando a compactação causada pelo pisoteio (Imhoff et al., 2000a). Segundo Trimble & Mendel (1995), a força aplicada pelos cascos dos animais é normalmente subestimada por ser concebida como estática; no entanto, ao se movimentar, o animal transfere a massa do corpo para uma ou duas de suas patas, além do efeito agravante da aceleração desenvolvida no movimento.

Chanasyk & Naeth (1995), comparando sistemas de pastejo contínuo e rotacionado em um solo franco-argiloso, observaram que o sistema de pastejo contínuo causou maior degradação das propriedades físicas do solo em relação ao sistema de pastejo rotacionado, apresentando maiores valores de D_s e RP. No entanto, estes resultados podem ser atribuídos à equivalência entre as taxas de lotação nos dois sistemas, o que não ocorreu neste estudo, onde a lotação média para o sistema de pastejo contínuo foi muito inferior à do sistema de pastejo rotacionado.

O sistema de pastejo rotacionado com resíduo de 3,0-3,5 t ha⁻¹ MST (R2) também apresentou uma condição física do solo inferior à do tratamento Cs, o que pode ser atribuído aos mesmos fatores discutidos anteriormente (Figura 2c). No entanto, como pode ser verificado pela figura 2d, as menores taxas de lotação animal empregadas no R2 provocaram danos menos severos ao solo que no R1, onde parte da faixa de valores de D_s localizou-se acima de D_{sc} . A amplitude de variação da D_s correspondente ao R2 situou-se abaixo da D_{sc} ; no entanto, as restrições causadas pela RP são evidenciadas, uma vez que o limite inferior do IHO para este tratamento é representado pela θ_{rp} .

A menor lotação animal e, conseqüentemente, o menor pisoteio e a maior quantidade de resíduos vegetais deixados no tratamento R2 podem ter contribuído para minimizar a degradação das propriedades físicas do solo. A diferença de lotação animal durante o período chuvoso de 4,80 UA ha⁻¹ no R1 para 4,12 UA ha⁻¹ no R2 pode ter sido decisiva na degradação das propriedades físicas do solo estudado. Van Haveren (1983), Warren et al. (1986) e Chanasyk & Naeth (1995) também observaram uma deterioração das propriedades físicas do solo com o aumento da taxa de lotação animal. O aumento da taxa de lotação causou aumento da D_s e redução do IHO, principalmente pelo aumento da umidade do solo em que a RP atinge 3,0 MPa. A deterioração da qualidade física do solo para o crescimento de plantas provoca perdas na produção vegetal, tendo como conseqüências a perda da capacidade de suporte da pastagem e a redução da produtividade animal.

A distribuição espacial dos valores de densidade do solo é representada nas figuras 3 e 4. Os eixos horizontais das superfícies de D_s apresentam as dimensões de 20 x 90 m, nos tratamentos Cc e Cs, e de 20 x 45 m, nos tratamentos R1 e R2, em razão da diferença no espaçamento de amostragem, conseqüência da maior área dos piquetes no sistema de pastejo contínuo. Valores de D_s superiores a D_{sc} são representados pela tonalidade mais escura nas superfícies. Os tratamentos sob pastejo contínuo (Figura 3) não apresentaram valores de D_s superiores a D_{sc} , indicando que não existem áreas com condições físicas severamente restritivas ao crescimento das raízes. Entretanto, limitações ao crescimento podem ocorrer com valores de $D_s < D_{sc}$ quando o IHO é muito estreito.

À medida que o IHO se torna mais estreito, a probabilidade de que o conteúdo de água do solo atinja valores inadequados para o crescimento de plantas aumenta (Silva & Kay, 1997). Assim, para o monitoramento adequado da qualidade física do solo, é necessário o conhecimento mais detalhado do comportamento do IHO.

Neste trabalho, o valor de D_s de 1,16 g cm⁻³, no qual a θ_{rp} substitui a θ_{pmp} como limite inferior do IHO (Figura 1) e em que o IHO começa a decrescer, representa um valor de advertência a partir do qual devem ser tomadas maiores precauções no manejo do solo para evitar o agravamento do problema de compactação. Conforme demonstraram Silva & Kay (1997), o valor de D_s em que a θ_{pa} substitui a θ_{cc} como limite superior também deve ser levado em consideração na análise do IHO, o que não ocorreu neste estudo onde o limite superior foi representado pela θ_{cc} em todos os valores de D_s abaixo da D_{sc} (Figura 1).

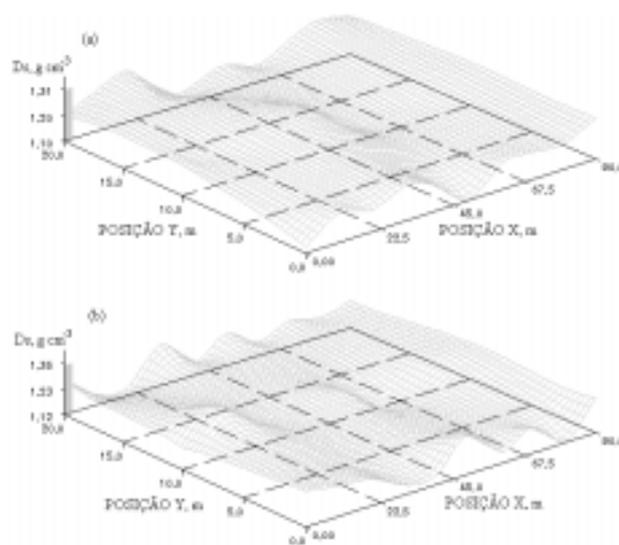


Figura 3. Superfícies de densidade do solo (D_s) para os piquetes em sistema de pastejo contínuo: (a) com adubação de manutenção (Cc) e (b) sem adubação de manutenção (Cs).

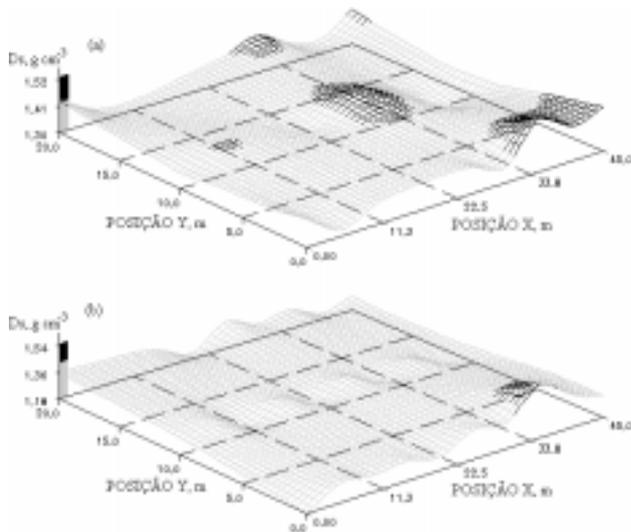


Figura 4. Superfícies de densidade do solo (D_s) para os piquetes em sistema de pastejo rotacionado: (a) resíduo de 2,0 a 2,5 t ha⁻¹ MST (R1) e (b) resíduo de 3,0 a 3,5 t ha⁻¹ MST (R2).

Na figura 4, são apresentadas as superfícies de D_s correspondentes aos tratamentos sob pastejo rotacionado. Pode-se observar que as limitações causadas por uma D_s superior à D_{sc} são mínimas no R2. No R1, as restrições por valores de D_s superiores à D_{sc} são observadas com maior frequência, indicando que parte da área apresenta valores restritivos ao crescimento de plantas. Este efeito pode ser atribuído às maiores taxas de lotação animal empregadas, às quais devem ter sido a causa primária da compactação do solo, conforme discutido anteriormente.

CONCLUSÕES

1. A condição física do solo, avaliada pelo intervalo hídrico ótimo, mostrou-se mais restritiva ao crescimento das plantas no sistema de pastejo rotacionado que no pastejo contínuo, influenciada pela maior taxa de lotação animal.

2. A adubação de manutenção em pastejo contínuo com *Brachiaria decumbens* cv. Basilisk não influenciou as condições físicas do solo.

3. Maior quantidade de resíduo pós-pastejo em pastejo rotacionado de *Panicum maximum* cv. Tanzânia proporcionou menor prejuízo às propriedades físicas do solo.

LITERATURA CITADA

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.

BETZ, C.L.; ALLMARAS, R.R.; COPELAND, S.M. & RANDALL, G.W. Least limiting water range: traffic and long-term tillage influences in a Webster soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 62:1384-1393, 1998.

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.

BRADFORD, J.M. The penetration resistance in a soil with well-defined structural units. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:601-606, 1980.

CHANASYK, D.S. & NAETH, M.A. Grazing impacts on bulk density as soil strength in the foothills fescue grasslands of Alberta, Canada. *Can. J. Soil Sci.*, 75:551-557, 1995.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Levantamento de reconhecimento-detalhado e aptidão agrícola dos solos da área do Centro Nacional de Pesquisa de Gado de Corte, Mato Grosso do Sul. Rio de Janeiro, 1979. 255p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília, 1999. 412p.

FRANCIS, G.S.; TABLEY, F.J. & WHITE, K.M. Restorative crops for the amelioration of degraded soil conditions in New Zealand. *Aust. J. Soil Res.*, 37:1017-1034, 1999.

GARDNER, W.H. Water content. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods*. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, 1986. p.493-544.

GLANTZ, S.A. & SLINKER, B.K. *Primer of applied regression and analysis of variance*. New York, McGraw-Hill, 1990. 770p.

GRABLE, A.R. & SIEMER, E.G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 32:180-186, 1968.

HAISE, H.R.; HAAS, H.J. & JENSEN, L.R. Soil moisture studies of some great plains soils. II. Field capacity as related to 1/3-atmosphere percentage, and minimum point as related to 15- and 26-atmosphere percentage. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 34:20-25, 1955.

HARRISON, D.F.; CAMERON, K.C. & McLAREN, R.G. Effects of subsoil loosening on soil physical properties, plant root growth, and pasture yield. *N. Z. J. Agric. Res.*, 37:559-567, 1994.

HART, P.B.S.; AUGUST, J.A. & ROSS, C.W. Some biochemical and physical properties of Tokomaru silt loam under pasture and after 10 years of cereal cropping. *N. Z. J. Agric. Res.*, 31:77-86, 1988.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P. & TORMENA, C.A. Spatial heterogeneity of soil properties in areas under elephant-grass short-duration grazing system. *Plant Soil*, 219:161-168, 2000a.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P. & TORMENA, C.A. Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. *Pesq. Agropec. Bras.*, 35:1493-1500, 2000b.

- KAY, B.D.; SILVA, A.P. & BALDOCK, J.A. Sensivity of soil structure to changes in organic carbon content: predictions using pedotransfer functions. *Can. J. Soil Sci.*, 77:655-667, 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.
- LIPIEC, J. & HAKANSSON, I. Influences of degree of compactness and matric water tension on some important plant growth factors. *Soil Till. Res.*, 53:87-94, 2000.
- MACEDO, M.C.M. Integração lavoura e pecuária: alternativa para sustentabilidade da produção animal. In: MOURA, J.C.; SILVA, S.C. & FÁRIA, V.P., eds. *PLANEJAMENTO DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO EM PASTAGENS*, Piracicaba, 2001. Anais. Piracicaba, Fundação de Estudos Agrários "Luiz de Queiroz", 2001. p.257-283.
- MAPFUMO, E.; CHANASYK, D.S.; BARON, V.S. & NAETH, M.A. Grazing impacts on selected soil parameters under short-term forage sequences. *J. Rang. Manag.*, 53:466-470, 2000.
- MEAD, J.A. & CHAN, K.Y. Cultivation techniques and grazing affect surface structure of an Australian hardsetting soil. *Soil Till. Res.*, 25:217-230, 1992.
- MORAES, M.H.; MÜLLER, M.M.L. & FOLONI, J.S.S. Qualidade física do solo: métodos de estudo – sistemas de preparo e manejo do solo. Jaboticabal, FUNEP, 2002. 225p.
- PROFFITT, A.P.B.; BENDOTTI, S. & RIETHMULLER, G.P. A comparison between continuous and controlled grazing on a red duplex soil. I. Effects on soil physical characteristics. *Soil Till. Res.*, 35:199-210, 1995.
- RICHARDS, L.A. & WEAVER, L.R. Fifteen atmosphere percentage as related to the permanent wilting point. *Soil Sci.*, 56:331-339, 1944.
- SAS INSTITUTE. SAS/STAT. User's guide, Version 8. Cary, NC, 1999. p.25-50.
- SILVA, A.P. & KAY, B.D. The sensitivity of shoot growth of corn to the least limiting water range of soils. *Plant Soil*, 184:323-329, 1996.
- SILVA, A.P. & KAY, B.D. Estimating the least limiting water range of soils from properties and management. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61:877-883, 1997.
- SILVA, A.P.; KAY, B.D. & PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range of soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58:1775-1781, 1994.
- TOPP, G.C. & ZEBCHUK, W. The determination of soil water desorption curves for soil cores. *Can. J. Soil Sci.*, 59:19-26, 1979.
- TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. & LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 22:573-581, 1998.
- TRIMBLE, S.W. & MENDEL, A.C. The cow as a geomorphic agent – A critical review. *Geomorphology*, 13:233-253, 1995.
- VAN HAVEREN, B.P. Soil bulk density as influenced by grazing intensity and soil type on a shortgrass prairie site. *J. Rang. Manag.*, 35:586-588, 1983.
- WARREN, S.D.; NEVILL, M.B.; BLACKBURN, W.H. & GARZA, N.E. Soil response to trampling under intensive rotation grazing. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50:1336-1341, 1986.
- WILLIAMS, M.J. & KALMBACHER, R.S. Renovation effects on bahiagrass productivity. *Agron. J.*, 88:191-198, 1996.
- WU, L.; FENG, G.; LETEY, J.; FERGUSON, L.; MITCHELL, J.; McCULLOUGH-SANDEN, B. & MARKEGARD, G. Soil management effects on the nonlimiting water range. *Geoderma*, 114:401-414, 2003.