



ARTIGO ORIGINAL

Gilmar Gonçalves de Oliveira¹
Geraldo César de Oliveira¹
Érika Andressa da Silva^{1*}
Carla Eloize Carducci²
Samara Martins Barbosa¹
Bruno Montoani Silva³

Indicadores de qualidade física para Argissolos sob pastagens nas regiões leste e sul de Minas Gerais

Physical quality indicators to Argissolo under pastures in the Eastern and Southern Minas Gerais

¹ Universidade Federal de Lavras – UFLA, Departamento de Ciência do Solo, Campus Universitário, 37200-000, Lavras, MG, Brasil
² Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Campus de Curitibanos, Rod. Ulysses Gaboardi km 3, Caixa Postal 101, 89520-000, Curitibanos, SC, Brasil
³ Universidade Federal de São João Del Rei – UFSJ, Campus Sete Lagoas, Rod. MG-424, km 48, Caixa Postal 56, 35701-970, Sete Lagoas, MG, Brasil

*Autor Correspondente:

E-mail: andressaerikasilva@gmail.com

PALAVRAS-CHAVE

Disponibilidade de água
Manejo das pastagens
Qualidade estrutural

KEYWORDS

Available water
Pasture management
Structural quality

RESUMO: A utilização de taxas de lotação animal inadequadas, com sobrecarga de peso, causa alterações na estrutura dos solos, sendo nas camadas superficiais que se evidenciam os maiores efeitos do pisoteio animal. O objetivo foi detectar alterações estruturais em solos manejados com diferentes sistemas de pastoreio nas regiões leste e sul de Minas Gerais, por meio de índices estimados da curva de retenção de água. Foi utilizado o delineamento experimental inteiramente casualizado, no qual foram avaliados quatro sistemas de manejo: 1- Pastagem Sul de Minas Gerais, 2- Pastagem Leste de Minas Gerais sob Regular Pressão de Pastejo, 3- Pastagem Leste de Minas Gerais sob Forte Pressão de Pastejo e 4- como testemunha, uma área sob Mata Nativa; todos sobre um Argissolo Vermelho-Amarelo. Amostras com estrutura preservada, em triplicata, foram coletadas na camada superficial do solo e submetidas à determinação das propriedades físicas e hídricas dos solos, como: a curva de retenção de água, a densidade global, porosidade total, macro e microporosidade, capacidade de água disponível, distribuição de poros por tamanho e o Índice *S*. O solo sob Mata apresentou a melhor qualidade estrutural em relação às áreas pastejadas. Na região leste de Minas, o uso do solo com pastagem sob Forte Pressão de Pastejo ocasionou degradação da estrutura do solo, confirmado pelos indicadores de qualidade física, o índice *S* e distribuição de poros por tamanho. Os valores do índice *S* foram superiores nas áreas sob Mata e Pastagem do Sul de Minas, indicando melhores condições estruturais do solo nesses ambientes.

ABSTRACT: *The use of unsuitable animal stocking rates, with weight overload cause changes in the soil structure, and it is in the superficial layers that the greatest effects of animal trampling show. This work aimed to detect structural changes in soils managed with different grazed systems in eastern and southern regions of Minas Gerais, by means of estimated index of the water retention curve. We used a completely randomized design, where four tillage systems were analyzed: 1- South Minas Gerais Pastures, 2- East Minas Gerais pastures under regular grazing pressure, 3- East Minas Gerais Pastures under strong grazing pressure and 4- an area under natural forest as control) all on an Argissolo Vermelho-Amarelo. Topsoil samples with preserved structure were collected in triplicate and submitted to the determination of the soil physical and hydraulic properties such as: water retention curve, bulk density, total porosity, macro and microporosity, available water capacity, distribution pore size and S index. The soil under native forest showed better structural quality than pasture soils. In the Eastern region of Minas Gerais, the land use with grassland under strong pressure of grazing caused degradation of soil structure, confirmed by the indicators of physical quality, S index and pore distribution size. The S index values were higher in managements Forest and South Minas Gerais Pastures, indicating better structural soil conditions in these environments.*

1 Introdução

A degradação das pastagens é um dos maiores problemas para a produção pecuária brasileira (Ferreira et al., 2010). No Estado de Minas Gerais, cerca de 75% das pastagens encontram-se em estágio moderado ou fortemente degradado, o que certamente comprometerá a sustentabilidade e competitividade da pecuária mineira em relação às demais regiões pecuaristas do Brasil (INAES, 2015).

O superpastejo e o manejo incorreto da fertilidade do solo são os fatores que mais contribuem para a redução da produtividade e longevidade das pastagens (INAES, 2015). A utilização de taxas de lotações inadequadas, com sobrecarga animal, causam alterações físicas no solo, sendo as camadas superficiais as mais afetadas pelo pisoteio dos animais (Greenwood & McKenzie, 2001).

Nas regiões leste e sul de Minas Gerais, o manejo das pastagens com baixo nível tecnológico associado ao pastejo excessivo e as condições de relevo fortemente acidentado têm resultado na degradação dos solos. As pressões exercidas sobre o solo através dos cascos dos animais iniciam o processo de compactação, tendo como consequências: a redução da porosidade e das taxas de infiltração de água no solo, além do aumento na densidade do solo e a intensificação dos processos erosivos (Moreira et al., 2014; Torres et al., 2014).

Ao considerar que o recurso solo é limitado e que alguns de seus componentes requerem período de tempo prolongado para que sejam restaurados, a previsão de perda da qualidade física do solo provocada pelo manejo inadequado nas atividades agropecuárias tornou-se essencial.

Técnicas que visem à avaliação da qualidade estrutural de um solo de forma simples e confiável ainda são objetos de investigações, sendo utilizados normalmente índices de qualidade do solo para monitorar as alterações em relação ao manejo do solo e à qualidade ambiental (Doran & Parkin, 1996; Stefanoski et al., 2013).

Um indicador físico da qualidade estrutural do solo que tem grande destaque é a curva de retenção de água (CRA), que é

utilizada para descrever diversos processos dinâmicos da água no solo como: a porosidade drenável, a capacidade de campo (CC), o ponto de murcha permanente (PMP) (van Genuchten, 1980; Dexter & Bird, 2001; Avanzi et al., 2011), a água disponível, o armazenamento no solo (Serafim et al., 2013), a condutividade hidráulica não saturada (Andrade & Stone, 2009a, 2009b) e o Índice S (Dexter, 2004a; Andrade et al., 2013) são alguns exemplos. Segundo Silva et al. (2008), estudos da qualidade estrutural do solo, com influência direta no desempenho das raízes das plantas, podem ser facilitados, por meio da interpretação matemática das curvas de retenção de água.

Diante do exposto, como há poucos estudos salientando os efeitos de diferentes estratégias de recuperação e renovação de pastagens sobre atributos físicos do solo, o objetivo foi detectar alterações estruturais na camada superficial de solos manejados com diferentes sistemas de pastoreio nas regiões leste e sul de Minas Gerais, por meio de índices estimados da curva de retenção de água.

2 Material e Métodos

A pesquisa foi realizada nos municípios de Nova Mógica e Bom Sucesso, Minas Gerais. Em Nova Mógica, leste de Minas, foram selecionadas duas propriedades rurais, localizadas no Córrego São Jorge, nas coordenadas geográficas 18° 33' 52,89" S - 41° 33' 32,56" O e 18° 33' 29,04" S - 41° 33' 04,95" O. Em Bom Sucesso, sul de Minas, foi selecionada uma terceira propriedade, localizada nas coordenadas 21° 2' 1" S - 44° 45' 9" O. Na região leste de Minas Gerais foram tomadas três áreas para estudo: Pastagem Leste Minas sob Regular Pressão de Pastejo (RPP); Pastagem Leste Minas sob Forte Pressão de Pastejo (FPP), e Mata Secundária (MATA) (Figuras 1a, b, c1 e c2).

As áreas sob pastagem, selecionadas na região leste de Minas, antes da implantação do sistema de pastejo, eram cobertas por mata nativa. Ao longo dos anos de ocupação pelas propriedades rurais, as matas foram substituídas por pastagens colônias (*Panicum maximum*) e capim gordura (*Melinis minutiflora*), implantadas em sistema convencional de manejo do solo.



Figura 1. Áreas estudadas no Leste de Minas Gerais: (a) Pastagem sob Regular Pressão de Pastejo (RPP); (b) Pastagem sob Forte Pressão de Pastejo (FPP); (c₁ e c₂) Mata Secundária (MATA).

Figure 1. Areas of studied in East of Minas Gerais: (a) Pasture Under Regular grazing pressure; (b) Pasture under strong grazing pressure; (c₁ and c₂) Secondary Forest (FOREST).

A pastagem Leste de Minas (RPP) está em processo de renovação de suas pastagens. Há seis anos, foi realizado o preparo primário com arado de disco, com posterior semeadura da forragem do gênero *Brachiaria* sp. (*Syn. Urochloa*), com o objetivo de se obter um bom desenvolvimento da forragem. A área permaneceu em pousio por um ano. Entretanto, foram mantidas constantemente, 20 novilhas entre 18 e 24 meses de idade, atingindo uma lotação animal de 1,4 UA ha⁻¹.

A renovação da pastagem Leste de Minas (FPP) foi realizada há aproximadamente oito anos (≈ 2008). O sistema convencional foi utilizado para o cultivo de *Brachiaria* sp. (*Syn. Urochloa*) que constitui a principal cobertura vegetal atualmente, sendo que o preparo primário foi realizado com o arado de disco. Nesta forragem, são mantidos, aproximadamente, 20 vacas (em lactação) e 15 bezerros, atingindo uma lotação média de 2,0 UA/ha. O pastejo dos bezerros nessa área é alternado, ou seja, permanecem no local somente parte do dia (manhã ou tarde). Sobre essas áreas há a maior movimentação do rebanho, em função das atividades diárias de manejo das vacas em lactação.

A área sob Mata Nativa secundária da região leste de Minas sofreu algumas interferências, pelo acesso do gado, entretanto, encontra-se em condições mais próximas ao estado natural de conservação natural há aproximadamente 20 anos (Figuras 1, c1 e c2).

A área identificada como Pastagem Sul de Minas, é roçada periodicamente, mantida sem pastejo há três anos. Esta área apresenta em seu histórico o uso de sistema convencional de produção de milho (preparo primário: uma aração e preparo secundário: uma gradagem). A ausência de práticas conservacionistas ocasionou perdas consideráveis do solo, sendo visível a presença de sulcos superficiais rasos e erosão laminar severa em alguns trechos.

Ambas as áreas de estudo (Leste e Sul) estão sob um Argissolo Vermelho-Amarelo (EMBRAPA, 2013) e em relevo fortemente ondulado (≈ 45%) e foram submetidas ao mesmo tipo de exploração (pastagem). A granulometria foi determinada pelo método da pipeta (EMBRAPA, 2011), sendo os solos classificados como franco-argilo-arenosos (Tabela 1).

Para a caracterização do complexo sortivo do solo, amostras de solo compostas (40 pontos) foram coletadas em zigue-zague em cada área de estudo. A análise química está apresentada na Tabela 2.

Em cada área de estudo, foram coletadas, em triplicata, amostras de solo com estrutura preservada no terço superior da encosta, por meio do uso de anéis volumétricos (0,0640 m de diâmetro e 0,0250 m de altura) com o auxílio do amostrador de Uhland a 0-0,05 m de profundidade, pois, conforme referenciado na literatura, esta camada é a mais afetada pelo pisoteio do gado (Greenwood & McKenzie, 2001).

Para a determinação das curvas de retenção de água no solo (CRA), as amostras foram inicialmente saturadas por períodos superiores ou iguais a 48 horas e submetidas aos potenciais matriciais de -2, -4, -6, -8 e -10 kPa, utilizando as unidades de sucção (funis de Büchner). Posteriormente, submetidas a -33, -100, -500 e -1500 kPa no extrator de Richards (EMBRAPA, 2011). Depois de atingir o equilíbrio no último potencial, as amostras foram encaminhadas para estufa a 105-110 °C para determinação do conteúdo de água no solo, em base gravimétrica. Conforme recomendação de Maia (2011), as CRA foram construídas com dados em unidade de peso (g g⁻¹), o que não compromete as discussões a respeito da influência da estrutura na retenção de água nos solos estudados.

Tabela 1. Caracterização textural da camada superficial (0-0,05 m) do Argissolo em estudo.

Table 1. Textural characterization of the surface layer (0- 0.05 m) of Argissolo in study.

Manejo	Areia	Silte	Argila	Textura
	%			
Pastagem Leste Minas (RPP) e (FPP)	72	6	22	Franco-argilo-arenosa
Pastagem Sul de Minas (PS)	64	14	22	Franco-argilo-arenosa
Mata	69	11	20	Franco-argilo-arenosa

Tabela 2. Caracterização química da camada superficial (0,05 m) de Argissolo sob pastagens em diferentes sistemas de manejo.

Table 2. Chemical characterization of the surface layer (0.05 m) of Argissolo under pasture in different management systems.

Manejo	pH	K	P	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al
		mg dm ⁻³		cmol _c dm ⁻³			
Pastagem Leste Minas (RPP)	5,8	86	1,13	1,40	0,80	0,10	2,32
Pastagem Leste Minas (FPP)	6,0	152	4,16	3,20	1,10	0,00	2,08
Pastagem Sul de Minas (PS)	5,1	47	1,42	2,27	0,73	0,27	5,86
Mata	6,1	84	1,71	5,00	1,00	0,00	1,66

Manejo	SB	t	T	V	m	MO	P.Rem
	cmol _c dm ⁻³			%		dag kg ⁻¹	mg L ⁻¹
Pastagem Leste Minas (RPP)	2,42	2,52	4,74	51,07	3,97	1,75	38,28
Pastagem Leste Minas (FPP)	4,69	4,69	6,77	69,27	0,00	2,11	37,20
Pastagem Sul de Minas (PS)	3,12	3,39	8,98	34,76	7,89	3,32	24,54
Mata	6,22	6,22	7,88	78,88	0,00	3,00	39,39

SB: Soma de Bases; t: CTC efetiva; T: CTC potencial; V: Saturação por bases; m: Saturação por alumínio; MO: Matéria orgânica do solo; P.Rem: Fósforo remanescente.

Com os dados obtidos, foram ajustadas as CRA, plotando-se os valores de conteúdo de água gravimétrico em função do potencial matricial da água no solo (kPa), por meio do modelo proposto por van Genuchten (1980), conforme Equação 1. Os parâmetros empíricos foram obtidos mediante o *software* SWRC (Dourado Neto et al., 2001):

$$U = U_r + \frac{(U_s - U_r)}{\left[1 + (h)^n\right]^m} \quad (1)$$

onde: U é o conteúdo de água gravimétrico do solo (g g^{-1}); h é o módulo do potencial ou tensão de água no solo (kPa); U_s é o conteúdo de água gravimétrico na amostra saturada (g g^{-1}); U_r é o conteúdo de água gravimétrico (g g^{-1}) no potencial matricial -1500 kPa; m, n, α são os parâmetros empíricos de ajuste do modelo; foi utilizada a restrição de Mualem, $m = 1 - 1/n$ (Reynolds et al., 2009).

O índice S foi calculado de acordo com as recomendações de Dexter (2004a) e de acordo com a Equação 2 abaixo:

$$\left[S = -n(U_s - U_r) \left[1 + 1/m \right]^{-(1+m)} \right] \quad (2)$$

onde: S = valor da inclinação da curva de retenção de água no seu ponto de inflexão; U_s = conteúdo de água gravimétrico saturado (g g^{-1}); U_r = conteúdo de água gravimétrico residual (g g^{-1}); m, n = parâmetros de ajustes do modelo; os dados foram expressos em unidade de peso g g^{-1} (umidade gravimétrica).

Com base nas CRA ajustadas com os dados de conteúdo de água volumétrico, foi determinada a distribuição de poros por tamanho de acordo com a expressão matemática proposta por Bouma (1973): $D = 4 s \cos q/d$, sendo D o diâmetro do poro (mm); s a tensão superficial da água (73,43 kPa mm a 20 °C); q o ângulo de contato entre o menisco e a parede do tubo capilar (considerado como 0); e h o potencial matricial (kPa). Dessa forma, foi possível determinar o volume total de poros (VTP), somando os poros encontrados nas diferentes tensões, em cada sistema de manejo.

A microporosidade foi determinada na unidade de sucção, considerando-a equivalente ao conteúdo de água no potencial matricial -6 kPa (Oliveira, 1968) e o conteúdo de água retido nesse mesmo potencial foi considerado, também, como capacidade de campo (Mello et al., 2002). A macroporosidade (Macro) foi calculada pela diferença entre volume total de poros e a microporosidade.

O cálculo da capacidade de água disponível (CAD) foi realizado a partir da diferença entre os conteúdos de água

volumétrico equivalentes à capacidade de campo e ao ponto de murcha permanente. A determinação da densidade do solo (D_s) foi realizada pelo método do anel volumétrico (EMBRAPA, 2011).

O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado (DIC) com quatro pastoreios (Pastagem Leste de Minas (RPP), (FPP), Mata Secundária no Leste de Minas (MATA) e Pastagem no Sul de Minas (PS)) em triplicata. Os resultados foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$) com auxílio do programa computacional Sisvar (Ferreira, 2011). Os gráficos foram elaborados no Sigma Plot.

3 Resultados e Discussão

Os diferentes sistemas de manejo alteraram o formato das curvas de retenção de água (CRA) dos Argissolos em relação à área de referência, Mata Nativa (Figura 2). A CRA da pastagem Sul de Minas se destaca das demais devido a maior retenção em todos os potenciais matriciais, embora apresente similaridades no ponto de murcha permanente (PMP) à pastagem Leste de Minas (RPP). As CRA mais suavizadas foram as das regiões Leste de Minas (RPP e FPP), indicando os efeitos mais pronunciados da alteração estrutural, ou seja, conversão de alguns macroporos em microporos (menor inclinação).

Por meio da avaliação dos parâmetros (U_s , U_r , α , m e n) do modelo (Tabela 3), verificou-se que a área sob Mata Nativa apresentou o menor valor de conteúdo de água residual (U_r) ou PMP, quando comparada aos demais sistemas de manejo.

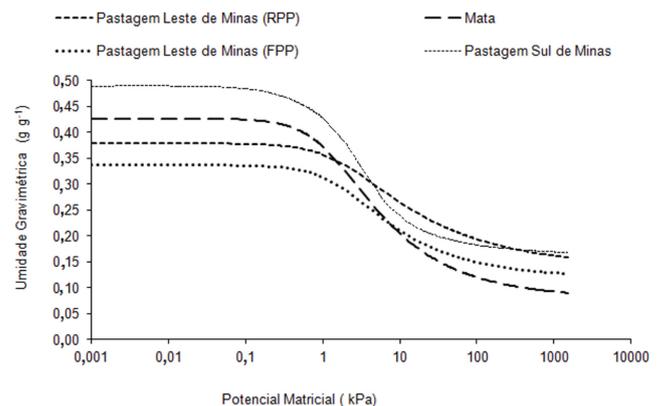


Figura 2. Curvas de retenção de água em Argissolo sob diferentes sistemas de manejo nas Regiões Leste e Sul de Minas Gerais.

Figure 2. Water retention curves in Argissolo under different management systems in the East and South regions of Minas Gerais.

Tabela 3. Parâmetros de ajuste da equação de van Genuchten.

Table 3. Setting parameters of van Genuchten equation.

Manejo	U_s	U_r **	α	m	n
g g ⁻¹				
Pastagem Leste Minas (RPP)	0,53a	0,19a	0,53a	0,27a	1,37a
Pastagem Leste Minas (FPP)	0,51a	0,18a	0,74a	0,48a	2,77a
Pastagem Sul de Minas (PS)	0,56a	0,20a	1,36a	0,39a	1,67a
Mata	0,55a	0,10b	0,77a	0,33a	1,49a

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$). U_s é o conteúdo de água gravimétrico na amostra saturada (g g^{-1}); U_r o conteúdo de água gravimétrico (g g^{-1}) no potencial matricial -1500 kPa; α , m e n são os parâmetros de ajuste do modelo. **($p < 0,01$).

Nesse sentido, para o PMP, observou-se o comportamento: sistemas de manejos sob pastagens > Mata (Tabelas 3 e 4). A retenção de água em potenciais matriciais mais negativos está diretamente relacionada às características intrínsecas do solo como textura e mineralogia (Carducci et al., 2013), no entanto, quando há o início de processos compressivos há a retenção de água em menores potenciais (mais negativos) devido à formação dos novos microporos (Tabela 4), além do aumento da densidade do solo (Oliveira et al., 2004), o que pode ser confirmado pelo deslocamento das curvas para cima da curva referência (Mata Nativa), nos três sistemas de manejo avaliados.

Observou-se que os sistemas de manejo sob pastagens empregados na região Leste de Minas proporcionaram aumento nos valores de densidade do solo (Ds) em relação à área de referência (Tabela 5). Assim, nestes manejos, foram observados que, em baixos potenciais matriciais (menos negativos) houve menor retenção de água. No entanto, em altos potenciais matriciais (mais negativos) ocorreu a maior retenção de água, se comparado ao ambiente preservado (Mata Nativa), indicando a redução dos macroporos. Desta forma, essas alterações na forma da curva de retenção de água promovidas pelo manejo afetam diretamente a água disponível para as plantas (CAD) (Figura 3).

Apesar de apresentarem valores semelhantes de Ds, a área referência ainda apresentou os maiores valores de CAD, quando comparada à Pastagem no Sul de Minas. Este fato pode ser atribuído aos elevados valores de matéria orgânica (Tabela 1) na área referência, ou seja, a menor intervenção antrópica contribuiu significativamente para o aumento do conteúdo de água e sua disponibilidade. A matéria orgânica no solo pode aumentar o tamanho do reservatório de água disponível, uma

vez que contribui com a retenção de água, e, associado a menor intensidade de revolvimento, melhoram a estruturação do solo e favorecem o desenvolvimento radicular (Araújo et al., 2004; Franchini et al., 2009; Santos & Pereira, 2013).

Como o comportamento físico-hídrico do solo está condicionado a melhor distribuição no diâmetro dos poros (Carducci et al., 2013), sendo os poros maiores responsáveis pela maior infiltração e permeabilidade da água, trocas gasosas e crescimento das raízes (Dexter, 2004a, b, c), foi verificado que houve maior volume de poros da classe de diâmetro maior

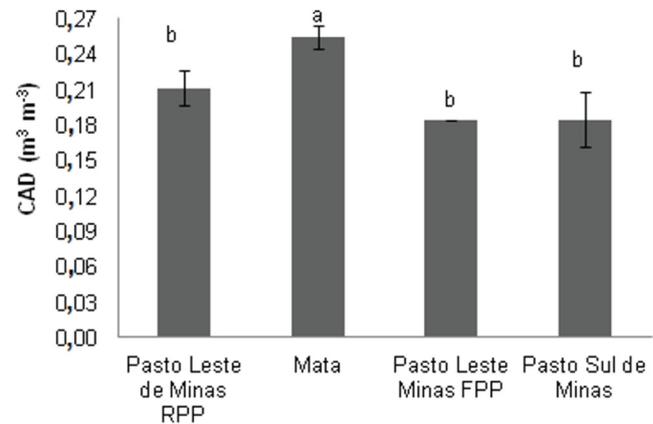


Figura 3. Capacidade de água disponível - CAD (m³ m⁻³) em Argissolo sob diferentes sistemas de manejo. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott (*p* < 0,05).

Figure 3. Available water capacity - AWC (m³ m⁻³) in Argissolo under different management systems. Means followed by same letter do not differ by the Scott-Knott test (*p* < 0.05).

Tabela 4. Distribuição de poros por tamanho em Argissolo sob diferentes manejos e regiões geográficas.

Table 4. Pore size distribution in Argissolo under different managements and geographical regions.

Manejo	µm							
	>73,43**	73,43-49	49-29*	29-9,0	9,0-2,9**	2,9-0,6**	0,6-0,2*	<0,2**
P L M (RPP)	0,10b	0,02a	0,03a	0,06a	0,03a	0,03a	0,04a	0,19a
P L M (FPP)	0,11b	0,03a	0,03a	0,05a	0,03a	0,02a	0,02b	0,18a
P S M (PS)	0,20a	0,03a	0,03a	0,04a	0,01b	0,01b	0,01b	0,20a
Mata	0,21a	0,04a	0,04a	0,07a	0,03a	0,02a	0,02b	0,10b

PLM: Pastagem Leste Minas; RPP: Regular pressão de pastejo; FPP: Forte pressão de pastejo; PSM: Pastagem Sul de Minas. Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott (*p* < 0,05). *(*p* < 0,05); **(*p* < 0,01).

Tabela 5. Valores médios para volume total de poros (VTP), macroporosidade (Macro), microporosidade (Micro), densidade (Ds), e índice S em Argissolo com pastagens sob diferentes manejos e sob Mata.

Table 5. Mean values for total porosity (TP), macroporosity (Macro), microporosity (Micro), bulk density (Bs) and the S index in Argissolo with pastures under different managements and under Forest.

Manejo	VTP*	Macro	Micro	Ds***	Índice S**
	m³ m ⁻³	m³ m ⁻³	m³ m ⁻³	Mg m ⁻³	---
Pastagem Leste Minas (RPP)	0,53a	0,12a	0,40a	1,40 b	0,04b
Pastagem Leste Minas (FPP)	0,49b	0,13a	0,36a	1,52 a	0,05b
Pastagem Sul de Minas (PS)	0,56a	0,17a	0,38a	1,23 c	0,07a
Mata	0,54a	0,19a	0,35a	1,28 c	0,08a
CV (%)	3,54	19,61	4,70	2,26	12,20

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si, teste de Scott-Knott. *(*p* < 0,05); **(*p* < 0,01); ***(*p* < 0,001).

que 73,43 μm , ou seja, os macroporos, no solo sob a Pastagem Sul de Minas, no entanto este resultado é semelhante à área referência e, esta, por sua vez, apresenta boas condições físicas do solo (Tabela 4).

Considerando o histórico apresentado para a área que descreve o uso intensivo do solo no passado (plantio convencional de milho), e inclusive evidências visuais de processo erosivo intenso, sugere-se que o Argissolo sob Pastagem Sul de Minas, ao permanecer três anos sem pastejo, recuperou parte da sua macroporosidade. Este fator tem grande importância ambiental por serem esses os poros responsáveis pela recarga dos aquíferos (Alvarenga et al., 2012).

Entretanto, a Pastagem do Sul de Minas apresentou os menores percentuais de poros entre 9 e 0,6 μm (poros intermediários) (Tabela 4). Este resultado evidenciou que o manejo anterior de fato degradou a estrutura do solo, e este ainda se encontra em fase de reorganização dos agregados, no entanto ainda apresenta baixa disponibilidade de água para as plantas, haja vista que esses poros intermediários são importantes para a CAD (Figura 3), conforme observado por Barbosa et al. (2014).

Com a distribuição de poros, foi possível observar que as pastagens Leste de Minas (RPP; FPP) tiveram as maiores alterações nos poros com diâmetros > 73,43 μm , o que explica o avançado processo erosivo em grande parte das áreas de pastagens nessa região, confirmado no momento da coleta do solo.

Nos manejos em estudo, os valores médios da macroporosidade (Tabela 5) foram superiores ao valor considerado crítico (0,10 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) para o desenvolvimento das plantas (Andrade & Stone, 2009a). Entretanto, vale ressaltar que o decréscimo no volume de macroporos, ocasionado pela compactação e desagregação na superfície do solo, constitui a alteração física que ocorre de forma mais rápida e tem como consequência direta a redução na infiltração de água no solo (Bertol et al., 2006).

É importante salientar que a macroporosidade encontrada nos solos sob os diferentes sistemas de manejo pode estar relacionada a um maior volume das raízes fasciculadas, característica das gramíneas. Além disso, aos possíveis canais (bioporos) resultantes da decomposição e renovação dessas raízes (Lima et al., 2012), somados à intensa atividade biológica da mesofauna e aos teores de carbono orgânico, devido ao acúmulo de materiais orgânicos, resultando em boas condições para a agregação apresentadas por esse ambiente (Matias et al., 2009; Wendling et al., 2012).

Os Argissolos sob a Mata Nativa e Pastagem Sul de Minas apresentaram maiores valores do índice *S* em relação às áreas sob pastagens Leste de Minas (RPP e FPP), indicando melhor qualidade física daqueles solos (Tabela 5). Os valores de índice *S* nos manejos com pastagens do Leste de Minas ficaram bem próximos de 0,045, que é o valor mínimo preconizado por Andrade & Stone (2009a) como limite crítico para a boa qualidade de solos, salientando, entretanto, que esses autores sugeriram aquele valor para solos tropicais, especificamente da região do Bioma Cerrado.

O índice *S* apresentou correlação positiva e significativa com a macroporosidade ($r = 0,87, p < 0,001$) e negativa com a micro ($r = -0,45, p < 0,05$), corroborando com Silva et al. (2012), o que é válido, pois a macroporosidade representa a

estrutura mais aberta do solo, em que predominam os processos que envolvem a troca de gases do solo e movimento da água.

O índice *S*, por sua vez, está relacionado com a distribuição no diâmetro dos poros do solo de maior frequência (bimodalidade), bem como está associado a menor restrição física para o crescimento das raízes das plantas, quer seja por aeração, restrição mecânica ou pelos fatores que atuam na retenção de água (Dexter, 2004a). Assim, é provável que, no solo, sob a Mata Nativa (área referência), as plantas possam ter influenciado favoravelmente esse índice ao criarem macroporos para a aeração e infiltração de água no solo.

Observou-se, ainda, a correlação positiva do índice *S* com poros da classe de diâmetro > 73,43 μm ($r = 0,62, p < 0,05$) e poros da classe de diâmetro entre 73,43-49 μm ($r = 0,86, p < 0,05$). Conforme trabalho de Silva et al. (2012), maiores valores de índice *S* equivalem a maior inclinação da CRA (Dexter, 2004a) e indicam melhor distribuição de poros e maior quantidade de poros com maior diâmetro, a exemplo deste trabalho.

O solo sob Mata Nativa, devido à não ação antrópica, e o solo sob Pastagem Sul de Minas, por se encontrar em recuperação (sem pastejo), apresentaram as menores *Ds* em relação aos solos sob Pastagem do Leste de Minas (RPP e FPP) (Tabela 3). De acordo com Bertol et al. (2006), as alterações nas densidades do solo ocasionadas pela pressão de pastejo associada à ação das chuvas em geral são menos perceptíveis. No entanto, para que tal alteração seja significativa, seriam necessárias mudanças em todo o sistema poroso do solo, o que não foi observado neste trabalho.

Assim, salienta-se que a *Ds*, nas condições deste estudo, foi o parâmetro mais sensível às alterações, destacando ainda que, o Argissolo sob pastagem FPP foi o mais alterado, seguido pelo solo com pastagem RPP.

Confirmando os resultados apresentados, verificou-se que a *Ds* apresentou correlação negativa com a macroporosidade ($r = -0,62, p < 0,001$) e com o índice *S* ($r = -0,56, p < 0,05$), indicativo da redução na qualidade estrutural do solo, causada pela compactação promovida pelo pisoteio dos animais no pastejo.

Em estudos de Andrade & Stone (2009a), que fizeram correlações por grupos texturais, foi encontrada correlação negativa entre índice *S* e *Ds*. Matias et al. (2009), ao avaliarem a qualidade física de um Latossolo Vermelho eutrófico sob pastagem, milho e mata nativa, identificaram alterações estruturais significativas decorrentes do uso e manejo do solo quando utilizaram a *Ds* e macroporosidade como ferramentas de diagnóstico.

Dessa forma, é importante ressaltar que, com o aumento da *Ds*, a curva de retenção sofre mudanças na sua forma devido à redução na macroporosidade e índice *S*, com consequente suavização na inclinação da CRA (Dexter, 2004a; Carducci et al., 2011). É importante salientar que um aumento de densidade do solo nem sempre representa uma redução do valor de índice *S* (Dexter, 2004a), o que reforça a necessidade de mais pesquisas relacionadas a este parâmetro, a fim de comprovar sua eficiência como indicador de qualidade física do solo, conforme proposto por alguns autores (Maia, 2011; Jong van Lier, 2014).

4 Conclusões

Os sistemas de manejo de pastagens avaliados alteraram as propriedades físicas e hídricas do solo, devido à compactação superficial em diferentes intensidades, sendo possível confirmar que a maior pressão de pastejo causou maiores níveis de compactação do solo, a exemplo da pastagem da região Leste de Minas Gerais (FPP).

A pastagem na região Sul de Minas, que foi intensamente cultivada com o milho e posteriormente mantida por um período sem pastejo, apresentou melhorias nas condições físicas e hídricas quando comparada àquelas sob pastejo intensivo (Leste de Minas), demonstrando que essa prática de manejo, nas condições estudadas, mostrou-se eficiente no processo de recuperação estrutural do solo.

Como consideração, salienta-se a importância da qualidade do manejo empregado na condução de pastagens, tendo em vista que esses sistemas podem ser muito vulneráveis à compactação e erosão, o respeito aos critérios técnicos adequados de pressão de pastejo, como aqui avaliado, são fundamentais a manutenção da produção econômica aliada à conservação dos recursos naturais.

Referências

- ALVARENGA, C. C.; MELLO, C. R.; MELLO, J. M.; SILVA, A. M.; CURTI, N. Soil quality index associated to the groundwater recharge (SQIGR) in the upper Rio Grande Basin, Minas Gerais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 36, n. 5, p. 1608-1619, 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832012000500025>.
- ANDRADE, R. S.; STONE, L. F. Índice S como indicador da qualidade física de solos do Cerrado brasileiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 13, n. 2, p. 382-388, 2009a. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662009000400003>.
- ANDRADE, R. S.; STONE, L. F. Uso do índice S na determinação da condutividade hidráulica não-saturada de solos do cerrado Brasileiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 13, n. 4, p. 376-381, 2009b. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662009000400002>.
- ANDRADE, R. S.; STONE, L. F.; GODOY, S. G. Estimativa da resistência do solo à penetração baseada no índice S e no estresse efetivo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 17, n. 9, p. 932-937, 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662013000900004>.
- ARAÚJO, M. A.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 28, n. 2, p. 337-345, 2004. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832004000200012>.
- AVANZI, J. C.; NORTON, L. D.; SILVA, M. L. N.; CURTI, N.; OLIVEIRA, A. H.; SILVA, M. A. Aggregate stability in soils cultivated with eucalyptus. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 46, n. 1, p. 89-96, 2011. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2011000100012>.
- BARBOSA, S. M.; OLIVEIRA, G. C.; CARDUCCI, C. E.; SILVA, B. M. Potencialidade de uso de Zeólitas na atenuação do déficit hídrico em Latossolo do cerrado. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 35, n. 4, p. 2357-2368, 2014.
- BERTOL, I.; AMARAL, A. J.; VÁZQUEZ, E. V.; GONZÁLEZ, A. P.; BARBOSA, F. T.; BRIGNONI, L. F. Relações da rugosidade superficial do solo com o volume de chuva e com a estabilidade de agregados em água. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 30, n. 3, p. 543-553, 2006. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832006000300014>.
- BOUMA, J. *Guide to the study of water movement in soilpedons above the water table*. Madison: University of Wisconsin, 1973. 194 p.
- CARDUCCI, C. E.; OLIVEIRA, G. C.; SEVERIANO, E. C.; ZEVIANI, W. M. Modelagem da curva de retenção de água de Latossolos utilizando a equação duplo van Genuchten. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 35, n. 1, p. 77-86, 2011.
- CARDUCCI, C. E.; OLIVEIRA, G. C.; ZEVIANI, W. M.; LIMA, V. M. P.; SERAFIM, M. E. Bimodal pore distribution on soils under conservationist management system for coffee crop. *Revista Engenharia Agrícola*, v. 33, n. 2, p. 291-302, 2013.
- DEXTER, A. R. Soil physical quality: part I, theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, v. 120, n. 3-4, p. 201-214, 2004a. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.09.004>.
- DEXTER, A. R. Soil physical quality: part II, friability, tillage, fil-thing and hard-setting. *Geoderma*, v. 120, n. 3-4, p. 215-225, 2004b. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.09.005>.
- DEXTER, A. R. Soil physical quality: part III, unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-theory. *Geoderma*, v. 120, n. 3-4, p. 227-239, 2004c. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.09.006>.
- DEXTER, A. R.; BIRD, N. R. A. Methods for predicting the optimum and the range of soil water contents for tillage based on the water retention curve. *Soil & Tillage Research*, v. 57, n. 4, p. 203-212, 2001. [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987\(00\)00154-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987(00)00154-9).
- DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. In: DORAN, J. W.; JONES, A. J. (Eds.). *Methods for assessing soil quality*. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p. 25-37.
- DOURADO NETO, D.; NIELSEN, D. R.; HOPMANS, J. W.; REICHARDT, K.; BACCHI, O. O. S.; LOPES, P. P. *Soil Water Retention Curve: SWRC, version 3.00*. Piracicaba: USP, 2001.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Manual de métodos de análise de solo*. 2. ed. revista. Rio de Janeiro, 2011. 225 p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Rio de Janeiro, 2013. 353 p.
- FERREIRA, D. F. SISVAR 5.0: a computer statistic al analysis system. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.
- FERREIRA, R. R. M.; TAVARES FILHO, J.; FERREIRA, V. M. Efeitos de sistemas de manejo de pastagens nas propriedades físicas do solo. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 31, n. 4, p. 913-932, 2010.
- FRANCHINI, J. C.; DEBIAS, H.; SACOMAN, A.; NEPOMUCENO, A. L.; FARIAS, J. R. B. *Manejo do solo para redução das perdas de produtividade pela seca*. Londrina: Embrapa Soja, 2009. 39 p. (Documentos).
- GREENWOOD, K. L.; MCKENZIE, B. M. Grazing effects on soil physical properties and the consequences for pastures: a review.

- Australian Journal of Experimental Agriculture*, v. 41, n. 8, p. 1231-1250, 2001. <http://dx.doi.org/10.1071/EA00102>.
- INSTITUTO ANTONIO ERNESTO DE SALVO – INAES. *Estado da Arte das pastagens em Minas Gerais*. Belo Horizonte, 2015. 207 p.
- JONG VAN LIER, Q. Revisiting the S-index for soil physical quality and its use in Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 38, n. 1, p. 1-10, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832014000100001>.
- LIMA, V. M. P.; OLIVEIRA, G. C.; SERAFIM, M. E.; CURTI, N.; EVANGELISTA, A. R. Intervalo Hídrico Ótimo como indicador de melhoria da qualidade estrutural de Latossolo degradado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 36, n. 1, p. 71-78, 2012.
- MAIA, C. E. Índice S para avaliação da qualidade física de solos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 35, n. 6, p. 1959-1965, 2011. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832011000600012>.
- MATIAS, S. S. R.; BORBA, J. A.; TICELLI, M.; PANOSSO, A. R.; CAMARA, F. T. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes usos. *Revista Ciência Agronômica*, v. 40, n. 3, p. 331-338, 2009.
- MELLO, C. R.; OLIVEIRA, G. C.; RESCK, D. V. S.; LIMA, J. M.; DIAS JÚNIOR, M. S. Estimativa da capacidade de campo baseada no ponto de inflexão da curva característica. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 26, n. 4, p. 836-841, 2002.
- MOREIRA, W. H.; TORMENA, C. A.; BETIOLI JUNIOR, E.; PETEAN, L. P.; ALVES, S. J. Influência da altura de pastejo de azevém e aveia, em atributos físicos de um latossolo vermelho distroférrico, após sete anos sob integração lavoura-pecuária. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 38, n. 4, p. 1315-1326, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832014000400027>.
- OLIVEIRA, G. C.; DIAS JUNIOR, M. S.; RESCK, D. V. S.; CURTI, N. Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após vinte anos de Manejo e cultivo do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 28, n. 2, p. 327-336, 2004. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832004000200011>.
- OLIVEIRA, L. B. Determinação da macro e microporosidade pela “mesa de tensão” em amostra de solo com estrutura indeformada. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 3, p. 197-200, 1968.
- REYNOLDS, W. D.; DRURY, C. F.; TAN, C. S.; FOX, C. A.; YANG, X. M. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma*, v. 152, n. 3-4, p. 252-263, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.06.009>.
- SANTOS, J. N.; PEREIRA, E. D. Carta de susceptibilidade a infiltração da água no solo na sub-bacia do rio Maracanã-MA. *Cadernos de Pesquisa*, v. 20, 2013. Edição especial.
- SERAFIM, M. E.; OLIVEIRA, G. C.; LIMA, J. M.; SILVA, B. M.; ZEVIANI, W. M.; LIMA, V. M. P. Disponibilidade hídrica e distinção de ambientes para cultivo de cafeeiros. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 17, n. 4, p. 362-370, 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662013000400002>.
- SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; IMHOFF, S. Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, n. 1, p. 1-10, 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000100001>.
- SILVA, B. M.; OLIVEIRA, G. C.; SILVA, É. A.; OLIVEIRA, L. M.; SERAFIM, M. E. Índice S no diagnóstico da qualidade estrutural de Latossolo muito argiloso sob manejo intensivo. *Bioscience Journal*, v. 28, n. 3, p. 338-345, 2012.
- STEFANOSKI, D. C.; SANTOS, G. G.; MARCHÃO, R. L.; PETTER, F. A.; PACHECO, L. P. Soil use and management and its impact on physical quality. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 17, n. 12, p. 1301-1309, 2013.
- TORRES, L. C.; BARROS, K. R. M.; LIMA, H. V. Alterações na qualidade física de um latossolo amarelo sob pastagem. *Acta Amazonica*, v. 44, n. 4, p. 419-426, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/S0044-59672014000400003>.
- 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. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>.
- WENDLING, B.; VINHAL-FREITAS, I. C.; OLIVEIRA, R. C.; BABATA, M. M.; BORGES, E. N. Densidade, agregação e porosidade do solo em áreas de conversão do cerrado em floresta de pinus, pastagem e plantio direto. *Bioscience Journal*, v. 28, p. 256-265, 2012.