



MARIA LUIZA DE CARVALHO ANDRADE

**PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICO-
MECÂNICAS E MODELOS DE CAPACIDADE
DE SUPORTE DE CARGA DO SOLO
SUBMETIDO A DIFERENTES SISTEMAS DE
MANEJOS**

**LAVRAS – MG
2019**

MARIA LUIZA DE CARVALHO ANDRADE

**PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICO-MECÂNICAS E MODELOS DE
CAPACIDADE DE SUPORTE DE CARGA DO SOLO SUBMETIDO A
DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJOS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Recursos Ambientais e Uso da Terra, para a obtenção do título de Doutor.

Prof. Dr. Moacir de Souza Dias Junior
Orientador

Prof. Dr. Wellington Willian Rocha
Coorientador

**LAVRAS – MG
2019**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Andrade, Maria Luiza de Carvalho.

Propriedades físico-hídrico-mecânicas e modelos de
capacidade de suporte de carga do solo submetido a diferentes
sistemas de manejos / Maria Luiza de Carvalho Andrade. – 2018.

94 p. : il.

Orientador: Moacir de Souza Dias Junior.

Coorientador: Wellington Willian Rocha

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2018.

Bibliografia.

1. Integração-lavoura-pecuária-floresta. 2. Compactação. 3.
Pastagem. I. Dias Junior, Moacir de Souza. II. Rocha, Wellington
Willian. III. Título.

MARIA LUIZA DE CARVALHO ANDRADE

**PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICO-MECÂNICAS E MODELOS DE
CAPACIDADE DE SUPORTE DE CARGA DO SOLO SUBMETIDO A
DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJOS**

**PHYSICAL, HYDROLOGICAL, AND MECHANICAL PROPERTIES
AND LOAD BEARING CAPACITY MODELS OF SOILS SUBMITTED
TO DIFFERENT MANAGEMENT SYSTEMS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Recursos Ambientais e Uso da Terra, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 13 de Agosto de 2018.

Dr. Ayodele Ebenezer Ajayi	FUTA/Nigéria
Dr. Bruno Montoani Silva	UFLA
Dr. Geraldo César Oliveira	UFLA
Dr. Luiz Fernando Coutinho de Oliveira	UFLA

Dr. Moacir de Souza Dias Junior
Orientador

Dr. Wellington Willian Rocha
Coorientador

**LAVRAS – MG
2019**

Ao meu pai Jaime por ser meu maior exemplo de vida.
DEDICO.

AGRADECIMENTOS

A Deus!

À Universidade Federal de Lavras, especialmente, ao Departamento de Ciência do Solo, a oportunidade de realização do doutorado.

Ao professor Dr. Moacir de Souza Dias Junior, a orientação, ensinamentos, confiança e amizade ao longo dos anos de trabalho.

Ao Professor Dr. Wellington Willian Rocha, a coorientação, a disponibilidade e sugestões que aprimoraram o trabalho.

Aos Professores Dr. Ayodele Ebenezer Ajayi, Dr. Bruno Montoani Silva, Dr. Geraldo César Oliveira e Dr. Luiz Fernando Coutinho de Oliveira, a participação na banca, as sugestões e correções.

À Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), a concessão da área de estudo.

Aos funcionários da Fazenda do Moura – UFVJM, todo o apoio fornecido durante a coleta de amostras.

Ao CNPq, FAPEMIG e à CAPES, o apoio financeiro.

Aos professores do DCS/UFLA, o aprendizado, bom convívio e todas as contribuições para a realização do doutorado.

Aos funcionários do Laboratório de Física do Solo, Dulce e Doroteo, a ajuda constante e, principalmente, a amizade ao longo dos anos de trabalho.

A todos os colegas da pós-graduação, o bom convívio, amizade e companheirismo.

Aos funcionários do DCS, em especial, à Dirce, o apoio, a dedicação e a amizade.

Aos colegas de equipe, Zélio e Carolline, a ajuda na coleta de amostras, as ideias e apoio trocados, o companheirismo e a amizade.

Ao colega Diego, que tanto me ajudou em todas as etapas deste trabalho, as contribuições, a ajuda, a disponibilidade, a paciência e a amizade.

Às alunas de iniciação científica, Olívia e Rafaela, a ajuda essencial, a dedicação, responsabilidade e a amizade.

Aos funcionários da ETA-DMA/UFLA, Adilson, Débora, Dyego, Elias, João e Reginaldo, por me apoiarem e me ajudarem a conciliar minhas atividades na ETA com o doutorado, a compreensão de vocês foi fundamental para a realização deste trabalho.

Ao meu pai Jaime, a meus irmãos Felipe e Moisés, o apoio, incentivo e amor.

Ao meu companheiro Alexandre, a ajuda na coleta de amostras, a paciência, o incentivo e todo o seu amor.

A todos que contribuíram para a realização deste sonho, minha GRATIDÃO!

RESUMO GERAL

Os objetivos deste trabalho foram avaliar os atributos físico-hídricos e físico-mecânicos de um Latossolo distrófico típico sob sistema de integração-lavoura-pecuária-floresta (ILPF), com 1 ano de implantação (ILPF 1 ano), ILPF com 6 anos de implantação (ILPF 6 anos), pastagem e cerrado nativo (CN), nos horizontes A, AB, BA topo, BA base e Bw e propor modelos de capacidade de suporte de carga (MCSC), para os horizontes A, AB, BA topo e BA base, identificando, por MCSC, qual manejo influencia mais na compactação do solo. Para a determinação das curvas de retenção de água no solo, porosidade total, microporosidade, macroporosidade e a densidade do solo, foram coletadas 60 amostras indeformadas. Determinaram-se ainda, a capacidade de campo, o ponto de murcha permanente e a capacidade de água disponível. Para a condutividade hidráulica do solo saturado (K_s), foram coletadas 36 amostras indeformadas no horizonte A, sendo a K_s obtida em ensaios com permeâmetro de carga constante. Para determinar a resistência do solo à penetração (RP) e à pressão de pré-consolidação (σ_p), foram coletadas 120 amostras indeformadas e, para os MCSC, foram coletadas 240 amostras indeformadas. Para os atributos físico-hídricos, verificou-se que o manejo, na área com pastagem, degradou a estrutura do solo no horizonte A e AB. Nos horizontes A e BA topo, observou-se que a degradação da estrutura do solo, nos diferentes tratamentos, seguiu a seguinte ordem decrescente: CN < ILPF 1 ano < ILPF 6 anos < pastagem. Os sistemas integrados exerceram menor impacto na estrutura do solo e apresentaram propriedades físico-hídricas do solo semelhantes ao CN a partir do horizonte AB. Todos os manejos reduziram a K_s no horizonte A. Para os atributos físico-mecânicos, a umidade do solo influenciou a RP e a σ_p . A σ_p foi influenciada, em todos os manejos e horizontes avaliados, e os horizontes A e AB do solo com pastagem foram os que mais sofreram degradação da estrutura. Nos MCSC, observou-se que a compactação do solo, causada pela pastagem e pelo ILPF 1 ano, foi maior nos horizontes A e AB. O CN possui uma menor capacidade de suporte de carga nos horizontes A e B. Não houve diferença significativa nos MCSC da pastagem, ILPF 1 ano e ILPF 6 anos nos horizontes superficiais e subsuperficiais.

Palavras-chave: Integração-lavoura-pecuária-floresta. Compactação. Pastagem.

GENERAL ABSTRACT

The objective of this work was to evaluate the physical-hydrological and physical-mechanical properties and a typical dystrophic latosol under a crop-livestock-forest integration system (CLFI) with one (CLFI 1 year) and six (CLFI 6 years) years of implantation, pasture, and native cerrado (NC) on soil horizons A, AB, BA top, BA base, and Bw. Another objective was to propose load-bearing capacity models (LBCM) for horizons A, AB, BA top, and BA base, and identify which management most affects soil compaction. Sixty undisturbed samples were collected to determine the curves of water-retention in the soil, total porosity, microporosity, macroporosity, and bulk density. The field capacity, permanent wilting point, and available water capacity were also determined. Thirty-six undisturbed samples were collected from horizon A to establish the saturated soil water conductivity (Ks), which was obtained through assays conducted with constant load permeameter. One hundred and twenty undisturbed samples were collected to determine the soil resistance to penetration (RP) and preconsolidation pressure (σ_p), and, 240 undisturbed samples were used for the LBCM. Regarding the physical-hydrological properties, the management in the pasture area degraded the soil structure in horizons A and AB. The horizons A and BA top showed the degradation of the soil structure in the distinct treatments in the following order: NC < CLFI 1 year, CLFI 6 years < pasture. The integrated systems exerted less impact on the soil structure and presented soil physical and hydrological properties similar to the NC in the horizon AB. All the types of management reduced the Ks in horizon A. For the physical-mechanical attributes, the soil moisture influenced the RP and σ_p . The σ_p was influenced in all types of management and horizons evaluated. The structures of horizons A and AB of the pasture were the most degraded. The LBCM showed that the soil compaction caused by pasture and 1-year CLFI was higher in horizons A and AB. The NC presented a lower load-bearing capacity in horizons A and B. There was no significant difference between the LBCM of the pasture, CLFI 1 year, and CLFI 6 years in the superficial and subsurface horizons.

Keywords: Crop-livestock-forest integration. Compaction. Pasture.

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE	11
1 INTRODUÇÃO GERAL	11
2 REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1 Sistemas de integração: uma abordagem geral no Brasil	15
2.2 Atributos do solo em áreas de integração-lavoura-pecuária-floresta ...	18
REFERÊNCIAS	25
SEGUNDA PARTE – ARTIGOS	33
ARTIGO 1 - ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DE UM LATOSSOLO SUBMETIDO A DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO NO CERRADO DA REGIÃO CENTRAL DE MINAS GERAIS – BRASIL	33
1 INTRODUÇÃO	37
2 MATERIAL E MÉTODOS	41
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4 CONCLUSÕES	57
REFERÊNCIAS	59
ARTIGO 2 - ATRIBUTOS FÍSICO-MECÂNICOS E CAPACIDADE DE SUPORTE DE CARGA DE UM LATOSSOLO SUBMETIDO A DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO NO CERRADO DA REGIÃO CENTRAL DE MINAS GERAIS – BRASIL	63
1 INTRODUÇÃO	67
2 MATERIAL E MÉTODOS	69
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	75
4 CONCLUSÕES	89
REFERÊNCIAS	91

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO GERAL

O Cerrado brasileiro abrange uma área total de 204,7 milhões de hectares, equivalente a 24% do território nacional. O relevo da região favorece a agricultura mecanizada e a irrigação, variando entre plano e suave ondulado (ALVARENGA et al., 2011). A área com pastagem plantada equivale a 60 milhões de ha, dos quais 51 milhões de ha são compostos por forragens de capim-braquiária (MACEDO, 2005). A região abriga mais de 40% do rebanho nacional e é responsável por 58% da produção nacional de carne bovina e 20% da produção nacional de leite (ALVARENGA et al., 2011). Logo a incorporação de terras da região do Cerrado ao processo produtivo contribuiu, consideravelmente, com o sucesso do agronegócio brasileiro, todavia a necessidade de reduzir o desmatamento conflita com o aumento no consumo mundial de produtos agropecuários e madeireiros (CODEIRO et al., 2015; FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO, 2009; VILELA; MARTHA JÚNIOR; MARCHÃO, 2012). Esse cenário exige soluções que permitam incentivar o desenvolvimento socioeconômico e não prejudiquem a sustentabilidade dos recursos naturais. Assim, a arborização de pastagens no Cerrado, associada à lavoura de grãos e ao manejo animal, em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), pode ser uma alternativa menos impactante ao meio ambiente e que não reduz a capacidade de produção (CODEIRO et al., 2015; SOUZA NETO et al., 2014). Os sistemas integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) são caracterizados pela associação de espécies florestais, cultura agrícola e pecuária numa mesma área, em cultivo consorciado, em sucessão ou rotação (BALBINO et al., 2011). Esses sistemas destacam-se pela grande diversidade, pois podem ser adotados de

diferentes formas, com inúmeras culturas e uma série de espécies animais, atendendo, assim, a várias regiões, condições climáticas, mercados e ao perfil do produtor, podendo ser adotada por pequenos, médios e grandes produtores (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA, 2016).

Muitos são os benefícios atribuídos aos sistemas ILPF como melhoria dos atributos físicos (ASSIS et al., 2015; CARVALHO et al., 2016), químicos (BONINI et al., 2016) e biológicos (CARVALHO et al., 2016) do solo em razão do aumento da matéria orgânica do solo (BONINI et al., 2016; SILVA; SALES; VELOSO, 2016); aumento de produtividade (COSTA et al., 2017; KICHEL et al., 2014); redução do desmatamento de novas áreas (ASSIS et al., 2015); redução da emissão de gases do efeito estufa (WANG et al., 2014) e estabilidade e diversificação da renda (SILVA et al., 2012; VILELA; MARTHA JÚNIOR; MARCHÃO, 2012).Entretanto, alguns prejuízos podem ser evidenciados, em áreas com sistemas integrados, como a queda da produção de forragem das pastagens cultivadas e da produtividade de grãos das culturas implantadas após o período de pastejo (ALBUQUERQUE; SANGOL; ENDER, 2001). Isso pode ocorrer pelo sombreamento excessivo promovido pelas espécies arbóreas ou, ainda, pela compactação do solo causada tanto pelo tráfego de máquinas e implementos agrícolas quanto pelo pisoteio animal. O pisoteio animal pode, em determinadas situações, ser o principal agente compactador do solo, tendo, inclusive, maior efeito do que o maquinário, utilizado nas operações agrícolas, em virtude do peso do animal ser distribuído em uma menor área atingida pelo seu casco (PIRES, 2007, 2012).

A compactação provocada pelo pisoteio animal pode ser influenciada pela textura do solo (CORREA; REICHARDT, 1995), intensidade e frequência do pastejo (MOREIRA et al., 2014), categoria e carga animal por hectare (MORAES; LUSTOSA, 1997), umidade do solo (DIAS JUNIOR; PIERCE,

1996), manejo da pastagem entre outros. Algumas propriedades do solo são alteradas pelo seu manejo e pelo processo de compactação num curto espaço de tempo, em apenas um ciclo de produção de uma determinada cultura ou um ciclo de pastoreio (TASSINARI et al., 2015), afetando, por exemplo, a densidade do solo, a condutividade hidráulica, a resistência do solo à penetração, à porosidade, à agregação e à capacidade de suporte de carga do solo.

A compactação influencia simultaneamente várias propriedades, as quais devem ser analisadas, de modo a obter a sustentabilidade do uso do solo, com integração espacial e temporal dos componentes do sistema produtivo. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar propriedades físico-hídrica-mecânicas do solo e gerar modelos de capacidade de suporte de carga, em áreas com sistema ILPF, pastagem e cerrado nativo, nos horizontes A, AB, BA topo, BA base e Bw de um Latossolo distrófico típico, na região do Cerrado.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Sistemas de integração: uma abordagem geral no Brasil

Nos últimos oito anos, a população brasileira passou de 190 para 207 milhões de habitantes (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2010, 2017). O aumento populacional reflete um crescimento do mercado consumidor agropecuário e uma demanda para a expansão de fronteiras agrícolas, para a agricultura e a pecuária, o que coloca em risco os ambientes naturais. Neste contexto, a intensificação do uso de terras, já antropizadas com incrementos de produtividade, aparece como uma alternativa sustentável que busca atender as demandas de mercado de modo a não degradar novas áreas. A região do Cerrado possui condições edafoclimáticas, topográficas e infraestrutura para aumentar a produtividade de suas áreas antropizadas (ALVAREGA et al., 2011).

Ressalta-se que a sustentabilidade dos sistemas agrícolas deve preconizar três pilares: i) econômico – economicamente viável; ii) social – socialmente aceito; iii) ambiental – ambientalmente adequado (BARCELLOS et al., 2011).

Os sistemas integrados de produção agrícola e pecuária têm como objetivo a maximização do uso da terra e, segundo Barcellos et al. (2011), os sistemas de integração podem ser classificados em quatro grupos:

- a) Integração Lavoura-Pecuária (ILP): sistema de produção que integra o componente agrícola e pecuário em rotação, consórcio ou sucessão, na mesma área e em um mesmo ano agrícola ou por vários anos.

- b) Integração Pecuária-Floresta (IPF): sistema de produção que integra o componente pecuário (pastagem e animal) e florestal, em consórcio.
- c) Integração Lavoura-Floresta (ILF): sistema de produção que integra o componente florestal e agrícola pela consorciação de espécies arbóreas com cultivos agrícolas anuais ou perenes.
- d) Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF): sistema de produção que integra os componentes agrícolas e pecuários em rotação, consórcio ou sucessão, incluindo também o componente florestal, na mesma área.

De acordo com Cordeiro et al. (2015), o cultivo consorciado é um sistema em que, concomitantemente, duas ou mais espécies vegetais são cultivadas numa mesma área. A sucessão é um sistema de produção, em que diferentes espécies vegetais são semeadas, uma após a colheita da outra, dentro do mesmo ano agrícola. Já o cultivo em rotação ocorre, quando, dentro de princípios técnicos, há alternância de espécies vegetais, ocupando o mesmo espaço físico e período do ano, pretendendo particularmente sanar problemas fitossanitários.

Vilela et al. (2011) e Vilela, Martha Júnior e Marchão (2012) destacam três modalidades de ILP, utilizadas no Cerrado brasileiro: i) propriedades de pecuária, nas quais culturas de grãos (arroz, soja, milho e sorgo) são introduzidas em áreas de pastagens com o propósito de recuperar a produtividade dos pastos; ii) propriedades especializadas em lavouras de grãos, que introduzem gramíneas forrageiras para favorecer a cobertura de solo em sistema plantio direto (SPD) e, na entressafra, para uso da forragem na alimentação do rebanho; e iii) propriedades que adotam, sistematicamente, a

rotação de pasto e lavoura para intensificar o uso da terra e se beneficiar do sinergismo entre as duas atividades.

Vilela, Martha Júnior e Marchão (2012) destacam, também, que as propriedades da região do Cerrado que adotam a rotação lavoura-pasto se beneficiam da melhor estabilidade de produção de forragem, para alimentar o rebanho, durante o ano todo. As pastagens se tornam mais produtivas, no período da chuva, em razão da melhoria da fertilidade do solo pelas lavouras. No período da seca, em que é comum a perda de peso do rebanho, além dos subprodutos de colheita e da palhada, os pastos recém-estabelecidos permanecem verdes e com qualidade e quantidade suficiente para proporcionar o ganho de peso.

Macedo (2009) ressalta que os sistemas de ILP são uma possibilidade, para a recuperação de pastagens degradadas e para a agricultura anual, que melhoram a produção de palha para o SPD e as propriedades do solo, além de propiciarem o uso racional de insumos, o aumento de emprego e renda no campo.

Recentemente, os sistemas ILPF têm recebido especial atenção por parte de pesquisadores, pela incorporação do componente arbóreo no sistema ILP, que proporciona a diversificação de renda para o produtor (SALTON et al., 2015), eleva o rendimento animal, em virtude do conforto térmico (BALBINO et al., 2012) e diminui o desmatamento (ASSIS et al., 2015; SALTON et al., 2015) em virtude do aumento do fornecimento de madeira para o comércio (CORDEIRO et al., 2015; SALTON et al., 2015).

Assis et al. (2015), estudando áreas de ILPF com 1 a 3 linhas de eucalipto e áreas de pastagem recuperada e degradada, observaram melhorias na qualidade física do solo, nos sistemas ILPF, quando comparados à pastagem degradada, além disso, observaram que a área com ILPF com uma linha favoreceu melhor recuperação da qualidade física do solo em relação à pastagem

degradada do que a ILPF com 3 linhas de eucalipto. Já Santos et al. (2016) estudaram a produção da pastagem com diferentes espaçamentos nas linhas eucalipto e constataram que o maior distanciamento estudado de 22 m é o que menos prejudica a produtividade das pastagens.

Balbino et al. (2011) destacam que, na região do Cerrado mineiro, as modalidades de ILPF são formadas por consórcios de eucalipto com culturas anuais, nos dois primeiros anos (arroz e soja ou sorgo e milho) com pastagem de capim braquiária, a partir do terceiro ano, de forma agregada com pecuária nos anos consecutivos.

O Brasil, atualmente, possui uma área de 11,5 milhões de ha com algum tipo de sistema ILPF (EMBRAPA, 2016). Balbino et al. (2011) enfatizam que, embora haja diversos exemplos da utilização da ILPF no Brasil, a discrepância de condições regionais do país reforça a necessidade de estudos regionalizados sobre a viabilidade da combinação de diferentes espécies.

2.2 Atributos do solo em áreas de integração-lavoura-pecuária-floresta

O solo é um recurso natural muito importante, já que a maior parte da demanda de alimentos, direta ou indiretamente, é suprida pelas áreas de cultivo e pastagem. O solo é um sistema heterogêneo e trifásico, compreendido por fases sólida, líquida e gasosa e, originalmente, encontra-se num estado de equilíbrio, cujas plantas extraem nutrientes da matéria orgânica e dos minerais do solo, para o seu desenvolvimento e a água e o ar movimentam-se sem maiores impedimentos.

Quando um sistema de cultivo é realizado, ocorrem alterações nas propriedades do solo, quando comparadas às de um solo nunca antes cultivado, como, por exemplo, um campo nativo. O preparo do solo atua diretamente na sua estrutura, modificando o seu comportamento físico, em decorrência do

tráfego de máquinas e implementos agrícolas, que são causadores da compactação, a qual altera a qualidade da estrutura do solo e provoca restrições ao crescimento radicular por ação da redução de água e ar às raízes das plantas (SILVA; SALES; VELOSO, 2016).

A densidade do solo refere-se à relação entre a massa de solo seco e o volume total e tem sido um parâmetro amplamente utilizado como indicador da qualidade física do solo. O aumento excessivo da densidade provoca diminuição do volume total de poros, acarretando queda na infiltração e na permeabilidade e de água. Reichert, Reinert e Braida (2003) propuseram valores de densidade do solo críticos, para algumas classes texturais: 1,30 a 1,40 Mg m^{-3} para solos argilosos, 1,40 a 1,50 Mg m^{-3} para os franco-argilosos e de 1,70 a 1,80 Mg m^{-3} para os franco-arenosos. Severiano et al. (2011) ajustaram modelos lineares, relacionando a densidade crítica do solo e o teor de argila para Latossolos do Cerrado e encontraram maiores valores de densidade crítica, para solos argilosos; para um teor de 35% de argila, por exemplo, a densidade crítica será de, aproximadamente, 1,60 Mg m^{-3} .

A porosidade do solo refere-se à porção do solo em volume, não ocupada por sólidos e pode ser distribuída por tamanho em macroporos (diâmetro $> 0,05$ mm) e microporos (diâmetro $\leq 0,05$ mm). Os macroporos são afetados pela pressão mecânica exercida sobre o solo, dado que seu volume é expressivamente diminuído com o aumento da densidade do solo. Assis et al. (2015), estudando alterações nos atributos no solo em áreas com ILPF com 1 e 3 linhas de eucalipto e áreas de pastagens, observaram maiores valores de porosidade total e macroporosidade e menores valores de densidade do solo, no sistema ILPF com 1 linha de eucalipto, quando comparada à pastagem degradada.

Silva, Sales e Veloso (2016), em estudo de solos sob vegetação da Amazônia legal com tratamentos ILPF, monocultivo de eucalipto e mata nativa,

observaram que o monocultivo de eucalipto provocou impacto negativo à densidade do solo, na camada 10-20 e 20-30 cm, entretanto não apresentou perda de porosidade total do solo. Sousa Neto et al. (2014), em pesquisa realizada, no Mato Grosso do Sul com diversos sistemas de ILPF e ILP, variando a densidade de árvores e a altura do pastejo e mata nativa, observaram que todos os tratamentos com pastejo aumentaram a densidade do solo e diminuíram a porosidade total e a macroporosidade.

A curva de retenção de água no solo (CRA) tem sido utilizada como importante ferramenta na descrição do comportamento físico-hídrico dos solos não saturados. Por meio dela é possível estimar outros atributos do solo, como, por exemplo, a capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e a capacidade de água disponível (CAD). A CC pode ser estimada pelo ponto de inflexão da curva (MELLO et al., 2002; SILVA et al., 2014) ou pelo teor de água retida na sucção de 6kPa (ANDRADE; STONE, 2011); o PMP pode ser estimado pelo teor de água retida na sucção de, aproximadamente, 1500kPa (ROMANO; SANTINI, 2002), já a CAD é definida como o conteúdo de água entre a CC e o PMP. Tem-se que a $CAD \geq 0,20m^3m^{-3}$ é considerada “ideal” para o máximo crescimento e desenvolvimento das raízes (COCKROFT; OLSSON, 1997; REYNOLDS et al., 2009), sendo $0,15 \leq CAD \leq 0,20m^3m^{-3}$ considerada “boa”, $0,10 \leq CAD \leq 0,15m^3m^{-3}$ considerada “limitante” e $CAD \leq 0,10m^3m^{-3}$ considerada condição “seca” (REYNOLDS et al., 2009).

Assis et al. (2015) verificaram que, de maneira geral, a CAD no solo sob pastagem degradada foi menor que sob os ILPF, possivelmente, em razão de sua maior densidade do solo, porém, em camadas mais profundas, essa diferença não foi encontrada, os autores atribuem esse resultado à compactação do solo pelo pisoteio animal ocorrer na camada superficial.

A condutividade hidráulica saturada do solo é uma propriedade muito importante na determinação qualitativa e quantitativa do movimento de água no

solo. Gonçalves e Libardi (2013) ressaltam que a condutividade hidráulica do solo saturado descreve a funcionalidade de seu sistema poroso, abrangendo propriedades referentes à sua porosidade, como quantidade, tamanho, morfologia, continuidade e orientação dos poros. A macroporosidade é uma propriedade de extrema importância e sua redução provoca diminuição nos valores de condutividade hidráulica (SILVA; KATO, 1997). Santos et al. (2011) constataram que os sistemas de manejo afetam a condutividade hidráulica, nas camadas superficiais, possivelmente, pelo acúmulo de vegetação, que altera a continuidade de poros pela maior atividade biológica. Apesar de o manejo semelhante em áreas de ILP e ILPF, Silva et al. (2015) observaram que a condutividade hidráulica saturada variou entre os sistemas, provavelmente, pelo ILP apresentar maior teor de argila em relação ao ILPF, o que, talvez, refletiu na maior porcentagem de microporos e menor condutividade hidráulica.

A resistência do solo à penetração (RP) é uma propriedade que expressa o grau de compactação do solo que pode limitar o crescimento do sistema radicular e a produtividade das plantas. Segundo Tormena, Silva e Libardi (1999), o valor crítico da resistência à penetração, para o crescimento das plantas, em diferentes sistemas de manejo, é de 2 Mpa; Canarache (1990) sugere que valores acima de 2,5 MPa começam a restringir o pleno crescimento das raízes da maioria das plantas. Reichert, Suzuki e Reinert (2007) destacam que a RP depende dos atributos textura, umidade e densidade do solo, sendo necessários cuidados na interpretação dos resultados. Além dos atributos do solo, deve-se atentar para a agressividade do sistema radicular da planta. Dedecek e Gava (2005) consideram, por exemplo, RP acima de 3 Mpa como valor crítico para o sistema radicular do eucalipto.

Schiavo e Colodro (2012) avaliaram a RP, em áreas de pastagem, cerrado e ILP e observaram que o manejo integrado diminuiu os valores de RP em relação às áreas de pastagem. Marchão et al. (2007), estudando diversos

tipos de usos e sistemas de preparo, em áreas com ILP, salientaram que todos os usos e sistemas de preparo aumentaram a RP, quando comparados ao cerrado nativo e pontuaram, ainda, que, em sistemas em pastagem, os valores de RP foram superiores aos ressaltados nos demais sistemas e atribuíram esse resultado ao pisoteio animal, porém esses valores não foram restritivos ao crescimento das plantas. Alves et al. (2017), estudando pastejo rotacionado, pastagem contínua, ILP, ILPF e cerrado nativo, verificaram altos valores de RP, em todos os tratamentos que podem estar relacionados aos efeitos dos manejos e, também, às características pedogenéticas do solo.

A pressão de pré-consolidação do solo é uma propriedade eficaz para identificar a compactação do solo (DIAS JUNIOR; PIERCE, 1996). Alguns atributos do solo influenciam na pressão de pré-consolidação, como, por exemplo, a umidade, a textura e a matéria orgânica. Os solos argilosos têm maior pressão de pré-consolidação pela maior fricção e forças coesivas entre as partículas, podem, portanto suportar maior pressão aplicada pelas máquinas agrícolas, antes de sofrer deformação irreversível, quando comparados aos solos com menor teor de argila (IMHOFF, 2002). Dias Junior (1994) demonstrou que a pressão de pré-consolidação é inversamente proporcional à umidade do solo e, segundo Vasconcelos et al. (2012), a matéria orgânica, como proteção física na cobertura do solo, desempenha um papel importante no comportamento mecânico do solo e os resíduos florestais, por exemplo, atenuam o efeito do tráfego de máquinas na compactação do solo (ANDRADE et al., 2017; SILVA; DIAS JUNIOR; LEITE, 2007).

No modelo de capacidade de suporte de carga (DIAS JUNIOR, 1994), a pressão de pré-consolidação é expressa, em função de diferentes umidades, sendo assim capaz de indicar a máxima pressão que o solo pode suportar, em diferentes umidades, sem sofrer compactação adicional, ou seja, degradação da sua estrutura.

Ortigara et al. (2014), caracterizando o estado de compactação e a capacidade de suporte de carga, em pastejo rotacionado, mata nativa e preparo convencional, constataram que o uso do solo provocou alterações, nos valores de densidade do solo, pressão de pré-consolidação, resistência do solo à penetração e macroporosidade. Os autores detectaram que o pisoteio animal intensivo, em área de pastagem, causou alterações na estrutura do solo, gerando níveis de compactação restritivos às plantas e que as áreas de mata nativa e preparo convencional são as mais suscetíveis à compactação do solo, apresentando baixa pressão de pré-consolidação.

Neiva Junior et al. (2015), avaliando um Latossolo Vermelho-Amarelo sob plantio direto de milho, pastagem de ovinos e mata nativa, constataram que os modelos de capacidade de suporte de carga da mata e do plantio direto não foram estatisticamente diferentes, demonstrando que o plantio direto não degradou o solo. O solo sob pastagem de ovinos apresentou maiores valores de pressão de pré-consolidação e maiores valores de resistência do solo à penetração do que a mata, identificando que o pisoteio animal apresentou potencial à degradação.

Diante do exposto, o estudo de sistemas ILPF pode influenciar nas propriedades do solo pela complexidade das interações de culturas anuais, animais e espécies florestais, assim, mais estudos são necessários para compreender os benefícios ou prejuízos desse sistema e a partir de quanto tempo de implantação e/ou profundidade eles podem ser observados.

REFERÊNCIAS

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

ALVARENGA, R. C. et al. Potencial de utilização da iLPF nos biomas brasileiro. In: BALBINO, L. C.; BARCELLOS, A. O.; STONE, L. F. (Ed.). **Marco referencial: integração lavoura-pecuária-floresta**. Brasília, DF: EMBRAPA, 2011. p. 41-61.

ALVES, A. R. Indicadores físicos de um Latossolo Amarelo distrocoeso em sistemas de integração na região do cerrado. **Revista Espacios**, Caracas, v. 38, n. 16, 2017. Disponível em: <<http://www.revistaespacios.com/a17v38n16/a17v38n16p03.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2018.

ANDRADE, M. L. C. et al. Soil compaction caused by harvest and logging operations on eucalyptus Forest in coarse-textured soils from northeastern Brazil. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 41, n. 2, p. 191-200, mar./abr. 2017.

ANDRADE, R. S.; STONE, L. F. Estimativa da umidade na capacidade de campo em solos sob Cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 2, p. 111-116, 2011.

ASSIS, P. C. R. et al. Atributos físicos do solo em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, n. 4, p. 309-316, 2015.

BALBINO, L. C. et al. Agricultura sustentável por meio da Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF). **Informações Agronômicas IPNI**, Piracicaba, n. 138, p. 1-18, jun. 2012.

BALBINO, L. C. et al. Evolução tecnológica e arranjos produtivos de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 46, p. 1-11, 2011.

BARCELLOS, A. O. et al. Base conceitual, sistemas e benefícios da ILPF. In: BALBINO, L. C.; BARCELLOS, A. O.; STONE, L. F. (Ed.). **Marco referencial: integração lavoura-pecuária-floresta**. Brasília, DF: EMBRAPA, 2011. p. 41-61.

BONINI, C. S. B. et al. Produção de forragem e atributos químicos e físicos do solo em sistemas integrados de produção agropecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 51, n. 9, p. 1695-1698, set. 2016.

CANARACHE, A. Generalized semi-empirical model estimating soil resistance to penetration. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 16, p. 56-70, 1990.

CARVALHO, J. S. et al. Evolução de atributos físicos, químicos e biológicos em solo hidromórfico sob sistemas de integração lavoura-pecuária no bioma. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 51, n. 9, p. 1131-1139, set. 2016.

COCKROFT, B.; OLSSON, K. A. Case study of soil quality in southeastern Australia: management of structure for roots in duplex soils. In: GREGORICH, E. G.; CARTER, M. R. (Ed.). **Soil quality for crop production and ecosystem health**. New York: Elsevier, 1997. p. 339-350. (Developments in Soil Science, 25).

CORDEIRO, L. A. M. et al. Integração lavoura-pecuária e integração lavoura-pecuária-floresta: estratégias para intensificação sustentável do uso do solo. **Cadernos de Ciência e Tecnologia**, Brasília, DF, v. 32, n. 1/2, p. 15-53, jan./ago. 2015.

CORREA, J. C.; REICHARDT, K. Efeito do tempo de uso das pastagens sobre as propriedades de um latossolo amarelo da Amazônia Central. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 30, n. 1, p. 107-114, jan. 1995.

COSTA, P. M. et al. Performance of crossbred steers post-weaned in an integrated crop-livestock system and finished in a feedlot. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 52, n. 5, p. 355-365, maio 2017.

DEDECEK, R. A.; GAVA, J. L. Influência da compactação do solo na produtividade da rebrota de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 29, n. 3, p. 383-390, 2005.

DIAS JUNIOR, M. de S. **Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic**. 1994. 114 f. Thesis (Ph.D. in Crop and Soil Science)-Michigan State University, East Lansing, 1994.

DIAS JUNIOR, M. de S.; PIERCE, F. J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 20, n. 2, p. 175-182, maio/ago. 1996.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **ILPF em números**. Brasília, DF, 2016. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/web/rede-ilpf/ilpf-em-numeros>>. Acesso em: 2 nov. 2017.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **State of the World's Forests 2009: global demand for wood products**. Rome, 2009. Disponível em: <<http://ftp.fao.org/docrep/fao/011/i0350e/i0350e02a.pdf>>. Acesso em: 10 ago. 2012.

GONÇALVES, A. D. M. A.; LIBARDI, P. L. Análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 37, n. 5, p. 1174-1184, 2013.

IMHOFF, S. **Indicadores de qualidade estrutural e trafegabilidade de Latossolos e Argissolos Vermelhos**. 2002. 94 p. Tese (Doutorado em Agronomia)-Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2002.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Estimativas de população**. Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html?=&t=o-que-e>>. Acesso em: 15 mar. 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Sinopse do censo demográfico**. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv49230.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2018.

KICHEL, A. N. et al. Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ilpf): experiências no Brasil. **Boletim de Indústria Animal**, Nova Odessa, v. 71, n. 1, p. 94-105, 2014.

MACEDO, M. C. M. Integração lavoura e pecuária: o estado da arte e inovações tecnológicas. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, MG, v. 38, p. 133-146, 2009.

MACEDO, M. C. M. Pastagens no ecossistema Cerrados: evolução das pesquisas para o desenvolvimento sustentável. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, 2005, Goiânia. **Anais...** Goiânia: Ed. UFG, 2005. p. 56-84.

MARCHÃO, R. L. et al. Qualidade física de um Latossolo Vermelho sob sistemas de integração lavoura-pecuária no Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 42, n. 6, p. 873-882, jun. 2007.

MELLO, C. R. et al. Estimativa da capacidade de campo baseada no ponto de inflexão da curva característica. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 26, n. 4, p. 836-841, jul./ago. 2002.

MORAES, A.; LUSTOSA, S. B. C. Efeito do animal sobre as características do solo e a produção da pastagem. In: SIMPÓSIO SOBRE AVALIAÇÃO DE PASTAGENS COM ANIMAIS, 1997, Maringá. **Anais...** Maringá: Ed. UEM, 1997. p. 129-149.

MOREIRA, W. H. et al. Influência da altura de pastejo de azevém e aveia em atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico, após sete anos sob integração lavoura-pecuária. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, MG, v. 38, n. 4, p. 1315-1326, 2014.

NEIVA JUNIOR, E. et al. Compressibility and penetrability of latossolo vermelho-amarelo distrófico (oxisol) under varied management systems and land uses. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 39, n. 1, p. 86-93, 2015.

ORTIGARA, C. et al. Uso do solo e propriedades físico-mecânicas de Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 38, n. 2, p. 619-626, 2014.

PIRES, B. S. **Capacidade suporte de carga e resistência ao cisalhamento de um Latossolo sob pastagens ao longo do tempo**. 2012. 113 p. Tese (Doutorado em Ciência do solo)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.

PIRES, B. S. **Resistência ao cisalhamento e compressibilidade de um Latossolo sob diferentes usos e manejos**. 2007. 86 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do solo)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2007.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência e Ambiente**, Santa Maria, v. 27, p. 29-47, 2003.

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

REYNOLDS, W. D. et al. Use of indicators and pore volume function characteristics to quantify soil physical quality. **Geoderma**, Amsterdam, v. 152, p. 252-263, 2009.

ROMANO, I.; SANTINI, A. Water retention and storage: field. In: DANE, J. H.; TOPP, C. (Ed.). **Methods of soil analysis: part 4, physical methods**. Madison: Soil Science Society of America, 2002. p. 721-738.

SALTON, J. C. et al. Benefícios da adoção da estratégia de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta. In: CORDEIRO, L. A. M. et al. (Ed.). **Integração Lavoura-Pecuária-Floresta: o produtor pergunta, a Embrapa responde**. Brasília, DF: EMBRAPA, 2015. p. 35-51. (Coleção 500 Perguntas, 500 Respostas).

SANTOS, D. C. et al. Forage dry mass accumulation and structural characteristics of Piatã grass in silvopastoral systems in the Brazilian savannah. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 233, p. 16-24, Oct. 2016.

SANTOS, G. G. et al. Qualidade física do solo sob sistemas de integração lavoura pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 46, n. 10, p. 1339-1348, out. 2011.

SCHIAVO, J. A.; COLODRO, G. Agregação e resistência à penetração de um Latossolo Vermelho sob sistema de integração lavoura-pecuária. **Bragantia**, Campinas, v. 71, n. 3, p. 406-412, 2012.

SEVERIANO, S. C. et al. Structural changes in latosols of the cerrado region: I, relationships between soil physical properties and least limiting water range. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 35, n. 3, p. 773-782, maio/jun. 2011.

SILVA, A. H. et al. Atributos físicos do solo e escoamento superficial como indicadores de serviços ambientais. In: PARRON, L. M. et al. (Ed.). **Serviços ambientais em sistemas agrícolas e florestais do Bioma Mata Atlântica**. Brasília, DF: EMBRAPA, 2015. p. 71-83.

SILVA, A. R.; DIAS JUNIOR, M. S.; LEITE, F. P. Camada de resíduos florestais e pressão de preconsoidação de dois Latossolos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 42, n. 1, p. 89-93, jan. 2007.

SILVA, A. R.; SALES, A.; VELOSO, C. A. C. Atributos físicos e disponibilidade de carbono do solo em sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF), Homogêneo e Santa Fé, no estado do Pará, Brasil. **Revista Agrotec**, Areia, v. 37, n. 1, p. 96-104, 2016.

SILVA, B. M. et al. Plant-available soil water capacity: estimation methods and implications. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 38, p. 464-475, 2014.

SILVA, C. L.; KATO, E. Efeito do selamento superficial na condutividade hidráulica saturada da superfície de um solo sob cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 32, n. 2, p. 213-220, fev. 1997.

SILVA, H. A. et al. Viabilidade econômica da produção de novilhas leiteiras a pasto em sistema de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 47, n. 6, p. 745-753, jun. 2012.

SOUSA NETO, E. L. et al. Physical quality of an Oxisol under an integrated crop-livestock-forest system in the Brazilian Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 38, n. 2, p. 608-618, 2014.

TASSINARI, D. et al. Short term changes on soil physical quality after different pasture renovation methods on a clayey oxidic Red Latosol. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 10, n. 4, p. 485-491, 2015.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 52, n. 3/4, p. 223-232, Oct. 1999.

VASCONCELOS, R. F. B. et al. Compactabilidade de um Latossolo amarelo distrocoeso dos tabuleiros costeiros de Alagoas sob diferentes sistemas de manejo da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 36, n. 2, p. 537-545, 2012.

VILELA, L. et al. Sistemas de integração lavoura-pecuária na região do Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 46, n. 10, p. 1127-1138, out. 2011.

VILELA, L.; MARTHA JÚNIOR, G. B.; MARCHÃO, R. L. Integração Lavoura-Pecuária- Floresta: alternativa para intensificação do uso. **Revista UFG**, Goiânia, ano 13, n. 13, p. 92-99, 2012.

WANG, C. et al. Sound management may sequester methane in grazed rangeland ecosystems. **Scientific Reports**, London, v. 4, 2014. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/srep04444>>. Acesso em: 10 out. 2018.

SEGUNDA PARTE – ARTIGOS

**ARTIGO 1 - ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DE UM LATOSSOLO
SUBMETIDO A DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO NO CERRADO
DA REGIÃO CENTRAL DE MINAS GERAIS – BRASIL**

**Artigo redigido conforme a NBR 6022 (ABNT, 2003) e formatado de acordo
com o Manual da UFLA de apresentação de teses e dissertações.**

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar atributos físico-hídricos de um Latossolo sob sistema de integração-lavoura-pecuária-floresta (ILPF) com 1 ano de implantação (ILPF 1 ano), ILPF com 6 anos de implantação (ILPF 6 anos), pastagem e cerrado nativo (CN), nos horizontes A, AB, BA topo, BA base e Bw. Para curvas de retenção de água no solo, foram coletadas 60 amostras indeformadas (1 amostra x 3 pontos x 4 tratamentos x 5 horizontes) e obtidas a porosidade total, a microporosidade, macroporosidade e a densidade do solo. Determinaram-se, ainda, a capacidade de campo, o ponto de murcha permanente e a capacidade de água disponível. Para condutividade hidráulica saturada (Ks), foram coletadas 36 amostras indeformadas no horizonte A (3 amostras x 3 pontos x 4 tratamentos x 1 horizonte). A Pastagem foi o manejo que mais degradou a estrutura do solo no horizonte A. No horizonte BA topo observou-se que a degradação da estrutura do solo, nos diferentes tratamentos, seguiu a ordem decrescente: CN < ILPF 1 ano < ILPF6 anos < pastagem. Os manejos ILPF 1 ano e ILPF 6 anos exerceram menor impacto, na estrutura do solo e apresentaram propriedades físico-hídricas do solo semelhantes ao CN a partir do horizonte AB. Todos os manejos alteraram a Ks no horizonte A.

Palavras-chave: Pastagem. Integração-Lavoura-Pecuária-Floresta. Estrutura do solo.

**ARTICLE 1 - PHYSICAL-HYDROLOGICAL ATTRIBUTES OF A
LATOSOL SUBMITTED TO DIFFERENT MANAGEMENT SYSTEMS
IN THE CERRADO OF THE CENTRAL REGION OF MINAS GERAIS,
BRAZIL**

ABSTRACT

The objective of this work was to evaluate the physical-hydrological attributes of horizons A, AB, BA top, BA base and Bw of a latosol under a crop-livestock-forest integration system (CLFI) with one (CLFI 1 year) and six (CLFI 6 years) years, pasture, and native cerrado (NC). Sixty undisturbed samples (1 sample x 3 points x 4 treatments x 5 horizons) were collected to determine the curves of water-retention in the soil, total porosity, microporosity, macroporosity, and bulk density. The field capacity, permanent wilting point, and available water capacity were also determined. Thirty-six undisturbed samples were collected from horizon A to establish the saturated soil water conductivity (Ks) (3 samples x 3 points x 4 treatments x 1 horizon). The pasture was the management which most degraded the soil structure of horizon A. The degradation of the soil structure of horizon BA top occurred in the following sequence: NC < CLFI 1 year, CLFI 6 years < pasture. Managements CLFI 1 year and CLFI 6 years exerted the least impact on the soil structure and the soil presented physical-hydrological properties similar to the NC from horizon AB. All managements changed the Ks of horizon A.

Keywords: Pasture. Crop-Livestock-Forest Integration. Soil structure.

1 INTRODUÇÃO

O consumo mundial de alimentos, fibras, energia e produtos é crescente. A previsão de uma população mundial de 9,1 bilhões, em 2050, aumentará a demanda por produção de alimentos em cerca de 70% (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO, 2017). O crescimento populacional, somado às exigências atuais de mercado, gera desafios para o setor agropecuário, como a intensificação sustentável de produção, que requer o aumento da produtividade e o aproveitamento conservacionista de recursos naturais.

Os sistemas integrados de produção agropecuária são reconhecidos como uma alternativa mais sustentável (BALBINO et al., 2011; REIS et al., 2016; RYSCHAWY et al., 2012) e resiliente (BALBINO et al., 2012; LEMAIRE et al., 2014; OLIVEIRA et al., 2016) ao cultivo convencional. Esses sistemas destacam-se pela eficiência, no uso dos recursos naturais (MARTINS et al., 2014), pela redução dos custos de produção (RYSCHAWY et al., 2012), pela maior ciclagem de nutrientes (ANGHINONI; CARVALHO; COSTA, 2013; ASSMANN et al., 2015), pela melhoria em alguns atributos do solo (ANGHINONI; CARVALHO; COSTA, 2013; ASSIS et al., 2015; SALTON et al., 2014), entre outros.

Dentre os sistemas integrados de produção agropecuária, o que apresenta maior destaque é a integração-lavoura-pecuária-floresta (ILPF), que acrescenta o componente arbóreo à integração-lavoura-pecuária (ILP) e, numa mesma área, incorpora atividades agrícolas, pecuárias e florestais, seja em cultivo consorciado, em sucessão ou rotação, otimizando o uso do solo (BALBINO et al., 2011; MORAES et al., 2014; REIS et al., 2016).

O estudo apresentado pela Rede de Fomento ILPF, na Conferência do Clima, em 2016 (COP22), estimou que o Brasil, atualmente, possui uma área de

11,5 milhões de hectares com algum tipo de sistema ILPF. A pesquisa apontou, ainda, um aumento de 10 milhões dessas áreas entre os anos de 2005 e 2015, no país (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA, 2016).

O crescimento de áreas de ILPF propicia um incremento positivo, na produção de alimentos, fibras, energia, produtos madeireiros e não madeireiros de origem vegetal e animal (BALBINO et al., 2011) e pode estar relacionado ao componente florestal do sistema ILPF que proporciona o aumento e diversificação de renda para o produtor (SALTON et al., 2015), eleva o rendimento animal em virtude do conforto térmico (BALBINO et al., 2012) e diminui o desmatamento (ASSIS et al., 2015; SALTON et al., 2015), uma vez que aumenta o fornecimento de madeira para o comércio (CORDEIRO et al., 2015; SALTON et al., 2015).

Contudo, se o componente florestal possuir sistema radicular superficial, a área com ILPF pode apresentar baixo armazenamento de água (SCHROTH et al., 2002) e o sombreamento, dependendo do espaçamento entre as árvores, pode resultar em queda na produtividade (MENDES et al., 2013; PACIULLO et al., 2011).

Neste contexto, o sistema ILPF pode influenciar de forma positiva ou negativa, nos atributos do solo, já que as interações de culturas anuais, animais e espécies florestais são complexas e dinâmicas, assim, mais estudos são necessários, para compreender os benefícios ou prejuízos desse sistema e a partir de quanto tempo de implantação e/ou profundidade os mesmos podem ser observados.

Este estudo baseia-se na hipótese de que as alterações na estrutura do solo são influenciadas não só pelo sistema de manejo e pisoteio animal, mas também pelo tempo de adoção do sistema e pela própria estratificação do perfil do solo. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar atributos físico-hídricos nos

horizontes A, AB, BA topo, BA base e Bw de um Latossolo sob sistema ILPF com 1 ano de implantação, ILPF com 6 anos de implantação, pastagem e cerrado nativo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo foi conduzido na Fazenda Experimental do Moura, pertencente à Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), localizada no município de Curvelo, MG, coordenadas 18°45'S e 45°25'W e altitude média de 633m. A temperatura média e a precipitação anual estão em torno de 23°C e 1.200mm, respectivamente (BRASIL, 1992).

Para a obtenção dos objetivos propostos, foram avaliados os usos do solo: integração-lavoura-pecuária floresta com 1 ano de implantação (ILPF 1 ano), integração-lavoura-pecuária floresta com 6 anos de implantação (ILPF 6 anos), pastagem e cerrado nativo (CN).

A área de ILPF 1 ano foi arada, gradeada e semeada, logo após o preparo do solo com um consórcio de milho e capim-marandu (*Urochloa brizantha* cv. Marandu). Já a área de ILPF 6 anos foi arada, gradeada e cultivada com sorgo e braquiária em sucessão. As linhas de ambas as áreas foram cultivadas com eucalipto com espaçamento 2 x 12 m. A área de pastagem cultivada com braquiária está em uso há mais de 10 anos. O preparo do solo consistiu de aração e gradagem, e a semeadura foi mecanizada a lanço.

A adubação e a correção do solo, para todos os tratamentos, foram estabelecidas de acordo com as especificações de Ribeiro, Guimarães e Alvarez (1999).

O solo da área de estudo foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico, com exceção da área de pastagem, em que o solo é Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico. A caracterização física e a matéria orgânica estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Caracterização física e teor de matéria orgânica do CN, Pastagem, ILPF 1 ano e ILPF 6 anos em diferentes horizontes.

Horizonte	D _p g cm ⁻³	M.O. dag kg ⁻¹	Argila -----	Silte g kg ⁻¹	Areia -----	Classe Textural ¹
CN						
A	2,74	2,24	700	240	60	Muito Argilosa
AB	2,71	1,37	710	230	60	Muito Argilosa
BA topo	2,70	1,16	680	260	50	Muito Argilosa
BA base	2,72	0,78	710	240	50	Muito Argilosa
Bw	2,73	0,57	700	250	50	Muito Argilosa
PASTAGEM						
A	2,65	2,23	500	370	130	Argilosa
AB	2,72	1,08	540	340	120	Argilosa
BA topo	2,76	0,58	550	340	110	Argilosa
BA base	2,71	0,46	570	330	100	Argilosa
Bw	2,73	0,39	560	330	110	Argilosa
ILPF 1 ANO						
A	2,64	2,77	550	340	110	Argilosa
AB	2,77	1,37	590	340	80	Argilosa
BA topo	2,69	1,00	610	320	70	Muito Argilosa
BA base	2,69	0,85	630	320	50	Muito Argilosa
Bw	2,72	0,49	670	280	50	Muito Argilosa
ILPF 6 ANOS						
A	2,64	2,37	620	340	40	Muito Argilosa
AB	2,71	1,73	670	290	40	Muito Argilosa
BA topo	2,71	1,25	680	280	40	Muito Argilosa
BA base	2,76	1,01	690	270	40	Muito Argilosa
Bw	2,73	0,80	710	250	40	Muito Argilosa

D_p: Densidade de partícula; M.O: matéria orgânica; ¹ de acordo com Santos et al. (2013).

A amostragem foi realizada, em três pontos distintos de cada tratamento, nos horizontes A, AB, BA topo, BA base e Bw. A amostragem orientada por horizontes buscou contemplar a possibilidade de redução da espessura do horizonte superficial, em decorrência tanto de erosão quanto de compactação, uma vez que os Latossolos muito argilosos do Cerrado são extremamente porosos e altamente suscetíveis à compactação na sua condição nativa (AJAYI

et al., 2009). O horizonte BA foi amostrado, em duas camadas, por sua maior espessura, enquanto o horizonte Bw foi amostrado apenas em sua porção superior. Nos horizontes A e AB, as amostras foram coletadas em posição intermediária.

Para as curvas de retenção de água no solo (CRAS), foram coletadas 60 amostras indeformadas (1 amostra x 3 pontos x 4 tratamentos x 5 horizontes), utilizando amostrador de Uhland com anéis volumétricos de 6,40cm de diâmetro interno e 2,54 cm de altura. Essas amostras foram saturadas e submetidas às sucções de 2, 4, 6 e 10 kPa, nas unidades de sucção e 33, 100, 500 e 1500 kPa, nas câmaras de Richards, posteriormente, as amostras foram secas em estufa, a 105-110 °C, por 48h, para a determinação do conteúdo de água nas respectivas tensões e cálculo da densidade do solo (Ds) (EMBRAPA, 2017).

Com os pontos experimentais das CRAS, foram ajustadas aos parâmetros do modelo de Genuchten (1980) com restrição de $m = 1 - 1/n$ (MUALEM, 1976). A porosidade total referente à umidade de saturação (θ_{sat}) e à microporosidade (valor referente à sucção de 6 kPa) foi obtida, experimentalmente, e por diferença entre esses atributos obteve-se a macroporosidade (EMBRAPA, 2017). Para a capacidade de campo (CC), utilizou-se o teor de água retida na sucção de 6kPa (ANDRADE; STONE, 2011), para o ponto de murcha permanente (PMP) utilizou-se o teor de água retida na sucção 1500 kPa (ROMANO; SANTINI, 2002) e a capacidade de água disponível (CAD) foi obtida pela diferença entre o conteúdo de água na CC e no PMP.

Para a determinação da condutividade hidráulica do solo saturado (Ks), foram coletadas 3 amostras indeformadas no horizonte A, utilizando amostrador de Uhland com anéis volumétricos de 6,95cm de diâmetro interno e 8,25cm de altura, totalizando 36 amostras (3 amostras x 3 pontos x 4 tratamentos x 1

horizonte). A Ks foi determinada em laboratório, empregando a metodologia do permeâmetro de carga constante (KLUTE, 1965).

Os dados foram submetidos à análise de variância e, quando pertinente, ao teste de média de Scott-Knott, 5% de probabilidade. Foi realizada a análise de componentes principais (PCA), para representar os atributos físico-hídricos nos diferentes tratamentos e horizontes. As análises foram realizadas no software RStudio (RSTUDIO TEAM, 2016), empregando o pacote “FactoMineR” (LE et al., 2008). Para a análise da associação entre variáveis e indivíduos, nos dois primeiros componentes principais, os resultados foram expressos graficamente, na forma de um biplot, empregando-se o pacote “Factoextra” (KASSAMBARA; MUNDT, 2017).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os parâmetros de ajuste do modelo de van Genuchten das CRAS experimentais, a umidade de saturação, a sucção do ponto de inflexão de todos os tratamentos e horizontes estão apresentados na Tabela 2. Nota-se que, para todos os horizontes, a umidade de saturação do solo foi maior no CN (TABELA 2), indicando a influência dos sistemas de manejo na porosidade do solo. O menor valor de umidade de saturação ($0,462 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) foi observado, no horizonte A da pastagem, indicando que a redução da porosidade, por pisoteio animal, ocorre, principalmente, na camada superficial.

Tabela 2 - Coeficientes de ajuste do modelo de van Genuchten das curvas de retenção de água (m , n , α); umidade de saturação (θ_{sat}); tensão no ponto de inflexão (ψ_i) e coeficiente de determinação das curvas ajustadas (R^2) do CN, Pastagem, ILPF 1 ano e ILPF 6 anos em diferentes horizontes.

(Continua)

Tratamento	m	n	α	θ_{sat} $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$	ψ_i kPa	R^2 %
Horizonte A						
CN	0,3270	1,4872	3,3581	0,618	0,63	99,5
PASTAGEM	0,3530	1,5476	0,7420	0,462	2,64	96,7
ILPF 1 ANO	0,3262	1,4907	1,2540	0,568	1,69	98,4
ILPF 6 ANOS	0,2733	1,3766	2,7617	0,571	0,93	98,8
Horizonte AB						
CN	0,3776	1,6102	1,377	0,609	1,33	99,8
PASTAGEM	0,3492	1,5406	1,4876	0,555	1,33	99,3
ILPF 1 ANO	0,3357	1,5056	1,8600	0,607	1,11	99,3
ILPF 6 ANOS	0,3349	1,5038	1,4121	0,593	1,47	99,6

Tabela 2 - Coeficientes de ajuste do modelo de van Genuchten das curvas de retenção de água (m , n , α); umidade de saturação (θ_{sat}); tensão no ponto de inflexão (ψ_i) e coeficiente de determinação das curvas ajustadas (R^2) do CN, Pastagem, ILPF 1 ano e ILPF 6 anos em diferentes horizontes.

(Conclusão)

Tratamento	m	n	α	θ_{sat} $m^3 m^{-3}$	ψ_i kPa	R^2 %
Horizonte BAtope						
CN	0,3805	1,6235	1,4299	0,629	1,27	99,5
PASTAGEM	0,3570	1,5608	0,8341	0,564	2,32	99,5
ILPF 1 ANO	0,4399	1,7941	0,8244	0,601	1,92	99,5
ILPF 6 ANOS	0,4144	1,7174	0,8875	0,637	1,88	99,7
Horizonte BAbase						
CN	0,4464	1,8079	0,5916	0,640	2,64	99,5
PASTAGEM	0,4052	1,6841	0,7021	0,589	2,44	99,8
ILPF 1 ANO	0,3811	1,6161	0,7392	0,605	2,46	99,7
ILPF 6 ANOS	0,4347	1,7750	0,6135	0,605	2,61	99,1
Horizonte Bw						
CN	0,4496	1,8210	0,5768	0,628	2,69	99,7
PASTAGEM	0,4403	1,7866	0,6450	0,612	2,45	99,3
ILPF 1 ANO	0,4308	1,7660	0,5935	0,602	2,71	99,5
ILPF 6 ANOS	0,4192	1,7240	0,5914	0,612	2,80	99,7

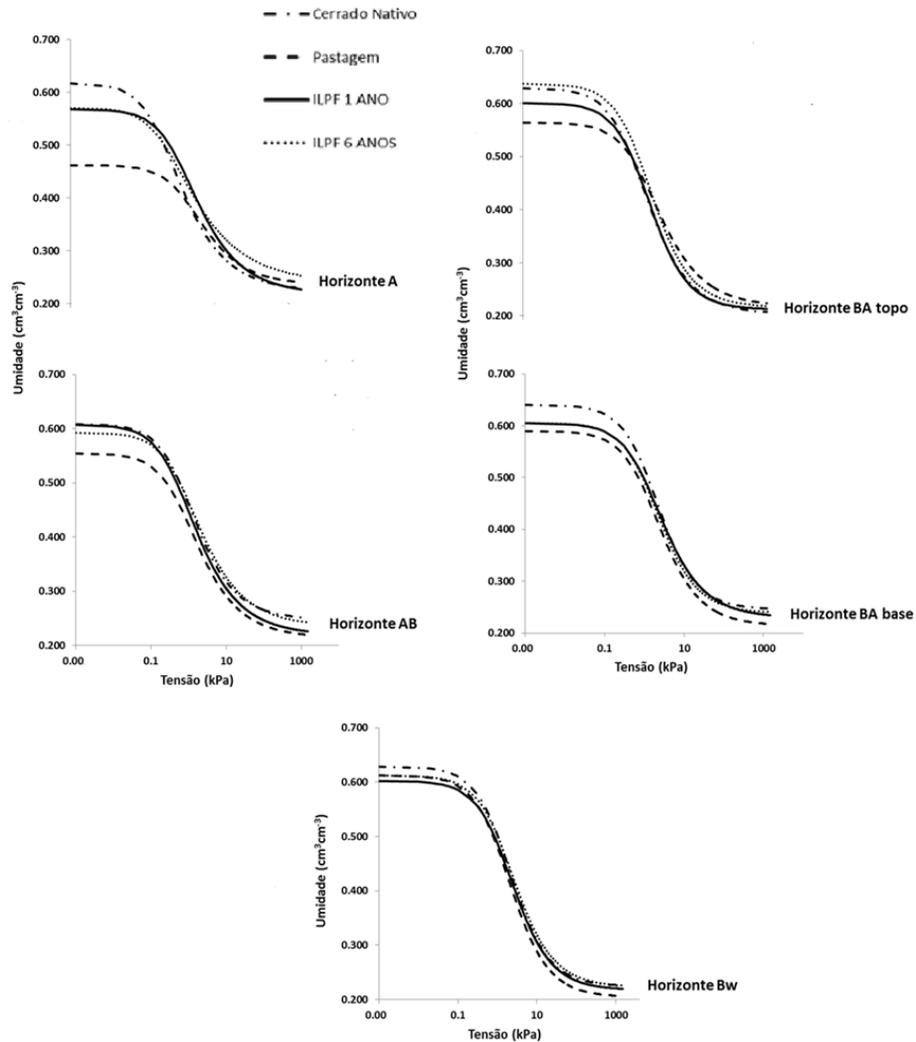
Fonte: Da autora (2018).

Os valores de sucção, no ponto de inflexão, variaram de 0,63 a 2,80 kPa. Esses valores são inferiores ao amplamente utilizado, para representar a CC em Latossolos argilosos e muito argilosos de Cerrado, que é de 6 kPa (ANDRADE; STONE, 2011). Observa-se, a partir das CRAS (FIGURA 1), o efeito do manejo do solo sob pastagem, em todos os horizontes, quando comparada ao CN, porém, no horizonte A, o impacto nos macroporos foi maior, o que pode influenciar nas trocas gasosas entre o solo e a atmosfera, comprometendo a demanda respiratória dos organismos do solo.

A menor diferença entre as CRAS estão no horizonte Bw, indicando que esse horizonte sofreu menor impacto do manejo e do pisoteio animal. O tratamento que mais se aproximou do CN nas CRAS foi o ILPF 6 anos, principalmente, nos horizontes BA topo e BA base (FIGURA 1).

Não houve diferença entre os manejos para a CC, PMP e CAD, assim, a pastagem, o ILPF 1 ano e ILPF 6 anos, de maneira geral, foram semelhantes ao CN, não sendo possível identificar, por essas propriedades, impactos dos manejos e do pisoteio animal em todos os horizontes do Latossolo. Assis et al. (2015) verificaram que, em geral, a CAD no solo sob pastagem degradada foi menor que sob os ILPF, possivelmente, em razão da sua maior densidade do solo, porém, em camadas mais profundas, essa diferença não foi encontrada, os autores atribuíram esse resultado à compactação do solo por pisoteio animal ocorrer na camada superficial.

Figura 1 - Curvas de retenção de água em diferentes horizontes para o CN, pastagem, ILPF1 ano e IFPF 6 anos.



Fonte: Da autora (2018).

De acordo com a classificação de Reynolds et al. (2009), todos os manejos possuem uma CAD “limitante” para o máximo crescimento e desenvolvimento das raízes.

Tabela 3 - Capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e capacidade de água disponível (CAD) do CN, Pastagem, ILPF 1 ano e ILPF 6 anos em diferentes horizontes.

Tratamento	Horizonte				
	A	AB	BAtopo	BAbase	Bw
	CC (m³m⁻³)^{*ns}				
CN	0,320	0,350	0,340	0,380	0,360
PASTAGEM	0,350	0,340	0,360	0,370	0,370
ILPF 1 ANO	0,360	0,340	0,340	0,380	0,360
ILPF 6 ANOS	0,360	0,360	0,360	0,370	0,380
	PMP (m³m⁻³)^{*ns}				
CN	0,223	0,247	0,203	0,245	0,224
PASTAGEM	0,235	0,214	0,217	0,214	0,204
ILPF 1 ANO	0,218	0,219	0,211	0,229	0,217
ILPF 6 ANOS	0,238	0,235	0,216	0,238	0,222
	CAD (m³m⁻³)^{*ns}				
CN	0,097	0,103	0,137	0,135	0,136
PASTAGEM	0,115	0,126	0,143	0,156	0,166
ILPF 1 ANO	0,142	0,121	0,129	0,151	0,143
ILPF 6 ANOS	0,122	0,125	0,151	0,132	0,158

Fonte: Da autora (2018).

^{*ns}: não significativo na análise de variância. Média de três repetições.

Observou-se que, para todos os manejos avaliados, houve uma redução na porosidade total e um aumento na densidade do solo no horizonte A quando comparados ao CN (TABELA 4). Portanto o horizonte A foi o que mais sofreu alterações em suas propriedades físico-hídricas em função das ações mecânicas e do pisoteio do gado.

Quanto aos macroporos, verificou-se que houve uma redução significativa nos horizontes A e BA topo da pastagem (TABELA 4). Comparando-se todos os horizontes da pastagem, observa-se que o horizonte A apresentou menor porosidade total e macroporosidade e maior densidade do solo, seguidos do AB e BA topo, já os horizontes BA base e Bw não foram afetados. Esses resultados concordam com os resultados encontrados por Assis et al. (2015) que, estudando alterações nos atributos no solo em áreas com ILPF com 1 e 3 linhas de eucalipto e áreas de pastagens recuperada e degradada,

observaram maiores valores de porosidade total e macroporosidade e menores valores de densidade do solo, nos sistemas ILPF, quando comparados à pastagem degradada.

Kato et al. (2010), avaliando as propriedades físicas de um Latossolo sob diferentes coberturas vegetais e Silva, Sales e Veloso (2016), em estudo de solos sob vegetação da Amazônia legal com tratamentos ILPF, monocultivo de eucalipto e mata nativa, observaram que o aumento da Ds refletiu em redução de macroporos, concordando com os resultados deste trabalho.

Considerando que a macroporosidade de 10 % de ar, segundo Taylor e Ashcroft (1972), é suficiente para garantir uma aeração adequada ao solo, observa-se que o horizonte A da pastagem está muito próximo desse limite (11%), inferindo degradação do solo quando comparado aos demais manejos.

Com relação à microporosidade, não houve diferença significativa entre os diferentes tratamentos e horizontes. Cabe ressaltar que a microporosidade é um propriedade física do solo que não é influenciada pelas variações causadas pelo processo de compactação, contudo é altamente influenciada pela textura do solo (REICHERT; SUZUKY; REINERT, 2007).

Tabela 4 - Porosidade total (PT), macroporosidade (Macro), microporosidade (Micro) e densidade do solo (Ds) do CN, Pastagem, ILPF 1 ano e ILPF 6 anos em diferentes horizontes.

Tratamento	Horizonte				
	A	AB	BAtopo	BAbase	Bw
	PT (m³m⁻³)				
CN	0,62 Aa	0,61 Aa	0,63 Aa	0,64 Aa	0,63 Aa
PASTAGEM	0,46 Cc	0,55 Bb	0,56 Bb	0,59 Aa	0,61 Aa
ILPF 1 ANO	0,57 Ba	0,61 Aa	0,60 Ba	0,61 Aa	0,60 Aa
ILPF 6 ANOS	0,57Ba	0,59 Aa	0,64 Aa	0,61 Aa	0,61 Aa
	Macro (m³m⁻³)				
CN	0,30 Aa	0,26 Aa	0,29 Aa	0,26 Aa	0,27 Aa
PASTAGEM	0,11 Bb	0,21 Aa	0,20 Ba	0,22 Aa	0,24 Aa
ILPF 1 ANO	0,21 Aa	0,27 Aa	0,26 Aa	0,23 Aa	0,24 Aa
ILPF 6 ANOS	0,21 Aa	0,26 Aa	0,28 Aa	0,24 Aa	0,23 Aa
	Micro(m³m⁻³)^{ns}				
CN	0,32	0,35	0,34	0,38	0,36
PASTAGEM	0,35	0,34	0,36	0,37	0,37
ILPF 1 ANO	0,36	0,34	0,34	0,38	0,36
ILPF 6 ANOS	0,36	0,36	0,36	0,37	0,38
	Ds (g cm⁻³)				
CN	0,98 Aa	1,05 Ab	0,95 Aa	1,00 Ab	0,94 Aa
PASTAGEM	1,37 Cd	1,17 Bc	1,07 Bb	1,05 Ab	0,98 Aa
ILPF 1 ANO	1,08 Bb	1,10 Ab	1,00 Aa	0,99 Aa	0,94 Aa
ILPF 6 ANOS	1,13 Bb	1,08 Ab	1,02 Aa	1,02 Aa	0,98 Aa

Fonte: Da autora (2018).

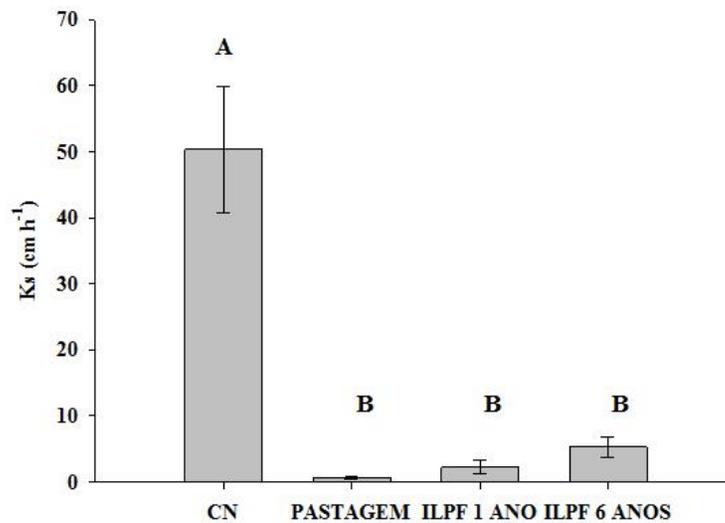
Letras iguais não diferem significativamente pelo teste de Scott Knott ($p < 0,05$). Letras maiúsculas comparam os tratamentos dentro do mesmo horizonte. Letras minúsculas comparam os horizontes dentro do mesmo tratamento. ^{ns}: não significativo na análise de variância. Média de três repetições.

A Ks foi influenciada pelos sistemas de manejo (FIGURA 2), indicando que as alterações na porosidade total e na macroporosidade promovem grandes alterações na intensidade de deslocamento da água no solo (FIGURA 2, TABELA 4). Segundo Mesquita e Moraes (2004), qualquer fator que exerça influência sobre o tamanho e a configuração dos poros do solo exercerá também influência sobre a condutividade hidráulica, sendo os macroporos responsáveis pela maior parte da movimentação da água no solo.

O impacto na K_s , nos diferentes manejos, retrata a compactação do solo no horizonte A, uma vez que reduz o espaço poroso e a infiltração de água no solo que, por sua vez, pode impactar negativamente na produtividade (REICHERT; SUZUKY; REINERT, 2007).

Observa-se que uma redução mínima de macroporos dos diferentes tratamentos, em relação ao CN de 30% no horizonte A (TABELA 4), refletiu em uma redução mínima de K_s em 89% (FIGURA 2). Esses valores ressaltam que alterações na macroporosidade podem comprometer demasiadamente a infiltração de água no solo.

Figura 2 - Condutividade hidráulica (K_s) no horizonte A do CN, pastagem, ILPF 1 ano e IFPF 6 anos.



Fonte: Da autora (2018).

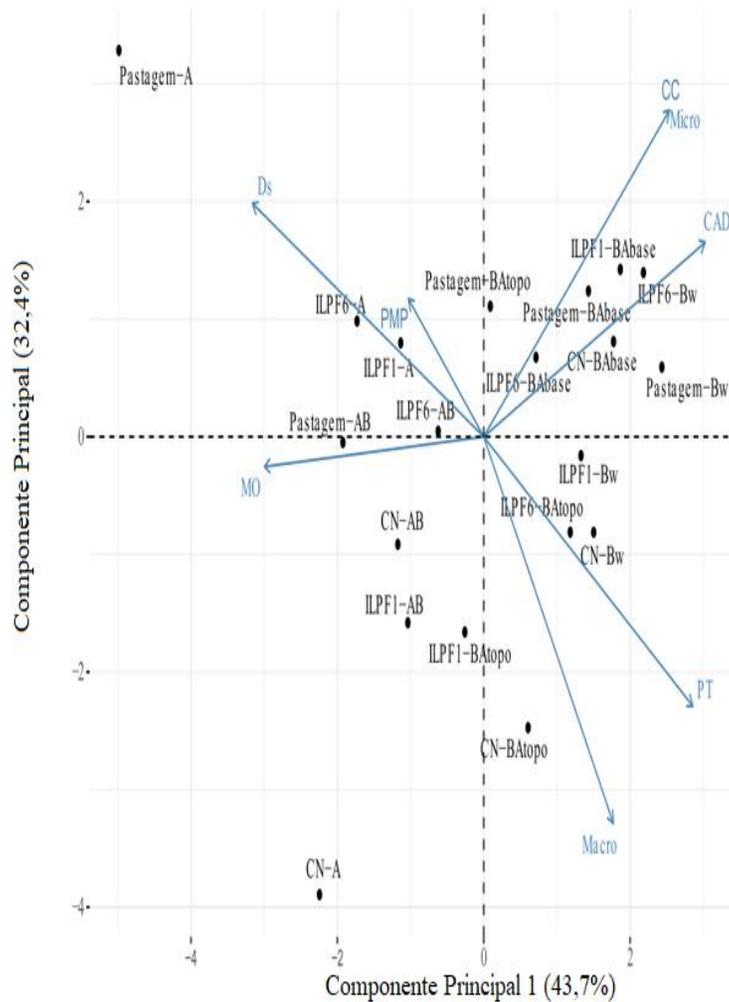
Na análise de componentes principais (PCA), o atributo do solo que mais contribuiu com o componente principal 1 foi a matéria orgânica (MO), a qual evidencia a diferença entre os horizontes. A pastagem situou-se à esquerda

dos pontos de CN e ILPF nesse componente nos horizontes A e AB. Nos quadrantes II e III (coordenadas negativas no eixo do componente principal 1), encontram-se todos os pontos de horizonte A e AB, associados a maiores valores de MO. A influencia da MO, nos horizontes superficiais e o seu papel fundamental, na retenção de água no solo, possivelmente, contribuíram nos resultados de CRAS (FIGURA 1).

As propriedades físico-hídricas do solo que mais contribuíram para o componente principal 2 foram a Macroporosidade e a Ds, apresentando maior colaboração de parâmetros ligados à estrutura e ao arranjo poroso do solo. Assim, ao longo do eixo definido pelo segundo componente, nota-se uma tendência do aumento da compactação do solo; essa análise fica bastante evidente pela posição extrema da pastagem no horizonte A, no eixo do segundo componente, em decorrência dos valores mais elevados de Ds ($1,37 \text{ g cm}^{-3}$) e mais baixos de Macro (11%).

Nos quadrantes III e IV (coordenadas negativas no eixo do componente principal 2) encontram-se todos os horizontes do CN e nenhum horizonte da pastagem. O ponto mais extremo abaixo foi o horizonte A do CN, indicando estrutura menos densa e mais porosa.

Figura 3 - Gráfico Biplot da análise de componentes principais.



Fonte: Da autora (2018).

O solo sob pastagem evidencia degradação até horizontes mais profundos. Detecta-se, analisando os manejos por horizontes, que a degradação físico-hídrica está bem caracterizada até o horizonte BAtopo, enquanto os teores de MO seguem mais baixos que os demais até o horizonte Bw. Ressalta-se que a degradação, na pastagem pelo pisoteio animal, ocorre nas camadas superficiais.

O efeito até o horizonte BAtopo, no manejo da pastagem, encontrado neste trabalho, pode estar associado ao histórico de tensão da área anterior à implantação da pastagem, bem como à tendência de formação de estrutura em blocos na área que pode promover altos valores de D_s , em horizontes subsuperficiais, uma vez que houve diferença significativa nos valores D_s até o horizonte BAtopo (TABELA 4).

Nos horizontes A e BA topo, observou-se uma sequência na degradação da estrutura do solo, nos diferentes tratamentos, ou seja: CN < ILPF 1 anos < ILPF 6 anos < pastagem. Esses resultados evidenciam que o tempo de implantação dos sistemas integrados e a profundidade são informações importantes a serem consideradas na avaliação dos impactos sofridos pela estrutura dos solos. Assim, o maior tempo de implantação no sistema ILPF, também, deixou-o mais suscetível ao impacto de máquinas e pisoteio animal, enquanto, em 1 ano de implantação, o sistema ILPF foi mais semelhante ao CN.

A PCA e as CRAS (FIGURA 1 e FIGURA 3) aclaram o efeito do manejo do solo sob pastagem, em todos os horizontes, quando comparado ao CN, porém, no horizonte A, o impacto foi maior. Em ambas as análises, pode-se notar o efeito do pisoteio animal, principalmente, nos macroporos, o que pode acarretar prejuízos nas trocas gasosas entre o solo e a atmosfera.

4 CONCLUSÕES

O manejo na área com pastagem degradou a estrutura do solo nos horizontes A e AB.

Nos horizontes A e BA topo, observou-se que a degradação da estrutura do solo, nos diferentes tratamentos, seguiu a ordem decrescente: CN < ILPF 1 ano < ILPF6 anos < pastagem.

Os sistemas integrados exerceram menor impacto na estrutura do solo e apresentaram propriedades físico-hídricas do solo semelhantes ao CN a partir do horizonte AB.

Todos os manejos reduziram a Ks no horizonte A.

AGRADECIMENTOS: Os autores agradecem ao CNPq, à FAPEMIG e à CAPES o apoio financeiro concedido.

REFERÊNCIAS

AJAYI, A. E. et al. Relation of strength and mineralogical attributes in Brazilian Latosols. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 102, p. 14-18, 2009.

ANDRADE, R. S.; STONE, L. F. Estimativa da umidade na capacidade de campo em solos sob Cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 2, p. 111-116, 2011.

ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. F.; COSTA, S. E. V. G. A. Abordagem sistêmica do solo em sistemas integrados de produção agrícola e pecuária no subtropical brasileiro. **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 8, p. 221-278, 2013.

ASSIS, P. C. R. et al. Atributos físicos do solo em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, n. 4, p. 309-316, 2015.

ASSMANN, J. M. et al. Carbon and nitrogen cycling in an integrated soybean-beef cattle production system under different grazing intensities. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 50, p. 967-978, 2015.

BALBINO, L. C. et al. Agricultura sustentável por meio da Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF). **Informações Agronômicas IPNI**, Piracicaba, n. 138, p. 1-18, jun. 2012.

BALBINO, L. C. et al. Evolução tecnológica e arranjos produtivos de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 46, p. 1-11, 2011.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. **Normais climatológicas de 1961 - 1990**. Brasília, DF: Secretaria Nacional de Irrigação, Departamento Nacional de Meteorologia, 1992. 84 p.

CORDEIRO, L. A. M. et al. Integração lavoura-pecuária e integração lavoura-pecuária-floresta: estratégias para intensificação sustentável do uso do solo. **Cadernos de Ciência e Tecnologia**, Brasília, DF, v. 32, n. 1/2, p. 15-53, jan./ago. 2015.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **ILPF em números**. Brasília, DF, 2016. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/web/rede-ilpf/ilpf-em-numeros>>. Acesso em: 2 nov. 2017.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual e métodos de análise de solos**. 3. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2017. 573 p.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **How to feed the world in 2050**. Rome, 2017. Disponível em: <http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/expert_paper/How_to_Feed_the_World_in_2050.pdf>. Acesso em: 2 nov. 2017.

GENUCHTEN, M. T. van. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Fayetteville, v. 44, p. 892-898, 1980.

KASSAMBARA, A.; MUNDT, F. **factoextra**: extract and visualize the results of multivariate data analyses. R Package Version 1.0.5. Montpellier: STHDA, 2017.

KATO, E. et al. Propriedades físicas e teor de carbono orgânico de um latossolo vermelho-amarelo do cerrado, sob diferentes coberturas vegetais. **Biosciencie Journal**, Uberlândia, v. 26, n. 5, p. 732-738, set./out. 2010.

KLUTE, A. Laboratory measurement of hydraulic conductivity of saturated soil. In: BLACK, C. A. (Ed.). **Methods of soil analysis: physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. pt. 1, p. 253-261.

LE, S. et al. Factominer: an R package for multivariate analysis. **Journal of Statistical Software**, Los Angeles, v. 25, n. 1, p. 118, 2008.

LEMAIRE, G. et al. Integrated crop-livestock systems: strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 190, p. 4-8, 2014.

MARTINS, A. P. et al. Soil acidification and basic cation use efficiency in an integrated no-till crop-livestock system under different grazing intensities. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 195, p. 18-28, 2014.

MENDES, M. M. S. et al. Desenvolvimento do milho sob influência de árvores de pau-branco em sistema agrossilvipastoril. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 48, n. 10, p. 1342-1350, out. 2013.

MESQUITA, M. G. B. F.; MORAES, S. O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 3, p. 963-969, 2004.

MORAES, A. et al. Research on integrated crop-livestock systems in Brazil. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 45, p. 1024-1031, 2014.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research**, Washington, v. 12, p. 513-522, 1976.

OLIVEIRA, W. R. D. et al. Dynamics of soil microbiological attributes under integrated production systems, continuous pasture, and native cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 51, n. 9, p. 1501-1510, set. 2016.

PACIULLO, D. S. et al. Características produtivas e nutricionais do pasto em sistema agrossilvipastoril, conforme a distância das árvores. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 46, n. 10, p. 1176-1183, out. 2011.

REICHERT, J. M.; SUZUKY, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: Identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 49-134.

REIS, J. et al. Integração Lavoura-Pecuária-Floresta no Brasil: uma estratégia de agricultura sustentável baseada nos conceitos da Green Economy Initiative. **Sustentabilidade em Debate**, Brasília, DF, v. 7, n. 1, p. 58-73, 2016.

REYNOLDS, W. D. et al. Use of indicators and pore volume function characteristics to quantify soil physical quality. **Geoderma**, Amsterdam, 152, p. 252-263, 2009.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H. (Ed.). **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, MG: CFSEMG, 1999. p. 25-32.

ROMANO, I.; SANTINI, A. Water retention and storage: field. In: DANE, J. H.; TOPP, C. (Ed.). **Methods of soil analysis: part 4, physical methods**. Madison: Soil Science Society of America, 2002. p. 721-738.

RSTUDIO TEAM. **RStudio: integrated development for R**. Boston, 2016. Disponível em: <<http://www.rstudio.com/>>. Acesso em: 15 mar. 2018.

RYSCHAWY, J. et al. Mixed crop-livestock systems: an economic and environmental-friendly way of farming? **Animal**, Cambridge, v. 6, p. 1722-1730, 2012.

SALTON, J. C. et al. Benefícios da adoção da estratégia de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta. In: CORDEIRO, L. A. M. et al. (Ed.). **Integração Lavoura-Pecuária-Floresta: o produtor pergunta, a Embrapa responde**. Brasília, DF: EMBRAPA, 2015. p. 35-51. (Coleção 500 Perguntas, 500 Respostas).

SALTON, J. C. et al. Integrated crop-livestock system in tropical Brazil: toward a sustainable production system. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 190, p. 70-79, 2014.

SANTOS, R. D. et al. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013. 100 p.

SCHROTH, G. et al. Conversion of secondary forest into agroforestry and monoculture plantations in Amazonia: consequences for biomass, litter and soil carbon stocks after 7 years. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 163, p. 131-150, 2002.

SILVA, A. R.; SALES, A.; VELOSO, C. A. C. Atributos físicos e disponibilidade de carbono do solo em sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF), Homogêneo e Santa Fé, no estado do Pará, Brasil. **Revista Agrotec**, Areia, v. 37, n. 1, p. 96-104, 2016.

TAYLOR, S. A.; ASHCROFT, G. L. **Physical edaphology: the physics of irrigated on nonirrigated soils**. San Francisco: W. H. Freeman, 1972. 532 p.

**ARTIGO 2 - ATRIBUTOS FÍSICO-MECÂNICOS E CAPACIDADE DE
SUPORTE DE CARGA DE UM LATOSSOLO SUBMETIDO A
DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO NO CERRADO DA REGIÃO
CENTRAL DE MINAS GERAIS – BRASIL**

**Artigo redigido conforme a NBR 6022 (ABNT, 2003) e formatado de acordo
com o Manual da UFLA de apresentação de teses e dissertações.**

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar atributos físico-mecânicos e gerar modelos de capacidade de suporte de carga (MCSC) para um Latossolo sob sistema Integração-Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) com 1 ano de implantação (ILPF 1 ano), ILPF com 6 anos de implantação (ILPF 6 anos), pastagem e cerrado nativo (CN), nos horizontes A, AB, BA topo, BA base e Bw. Para determinar a resistência do solo à penetração e à pressão de pré-consolidação, foram coletadas 120 amostras indeformadas (1 amostra x 3 pontos x 4 tratamentos x 5 horizontes x 2 tensões). Para os MCSC, foram coletadas 5 amostras indeformadas totalizando 240 amostras (5 amostras x 3 pontos x 4 tratamentos x 4 horizontes). A umidade do solo influenciou a RP e a σ_p e a σ_p demonstrou influência dos manejos em todos os horizontes. Os horizontes A e AB da pastagem foram os que mais sofreram degradação da estrutura, porém os sistemas integrados ILPF 1 e ILPF 6 anos sofreram menor impacto nas propriedades físico-mecânicas do solo quando comparados à pastagem. Nos MCSC, observou-se que a compactação do solo, causada pela pastagem e pelo ILPF 1 ano, foi maior nos horizontes A e AB. O CN possui uma menor capacidade de suporte de carga nos horizontes superficiais e subsuperficiais.

Palavras-chave: Compactação. Pressão de pré-consolidação. Resistência do solo à penetração.

ARTICLE 2 - PHYSICAL-MECHANICAL ATTRIBUTES AND LOAD BEARING CAPACITY OF A LATOSOL SUBMITTED TO DIFFERENT MANAGEMENT SYSTEMS IN THE CERRADO OF THE CENTRAL REGION OF MINAS GERAIS, BRAZIL

ABSTRACT

The objective of this work was to evaluate the physical mechanical attributes and generate load-bearing capacity models (LBCM) for horizons A, AB, BA top, BA base, and Bw of a latosol under the Crop-Livestock-Forest Integration System (CLFI) with one (CLFI 1 year) and six (CLFI 6 years) years of implantation, pasture, and native cerrado (NC). One hundred and twenty undisturbed samples were collected to determine the soil resistance to penetration (RP) and preconsolidation pressure (σ_p) (1 sample x 3 points x 4 treatments x 5 horizons x 2 tensions). For the LBCM, 240 undisturbed samples were used (5 samples x 3 points x 4 treatments x 4 horizons). Soil moisture influenced the RP and σ_p , with the σ_p influencing the types of management of all horizons. The horizons A and AB of the pasture area underwent the most structural degradation. However, the physical-mechanical properties of the CLFI 1 and CLFI 6 soil were little affected when compared to the pasture. For the LBMC, the soil compaction caused by the pasture and CLFI 1 was more significant for horizons A and AB. The NC presented a lower load-bearing capacity in the superficial and subsurface horizons.

Keywords: Compaction. Preconsolidation pressure. Soil resistance to penetration.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil tem uma população de, aproximadamente, 207,7 milhões de habitantes, representando uma taxa de crescimento populacional de 0,77% entre os anos de 2016 e 2017 (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2017). O aumento populacional e suas demandas exigem a intensificação do uso do solo e o aumento da produtividade.

As propriedades físico-mecânicas do solo são componentes importantes para alcançar incrementos na produtividade, uma vez que as plantas carecem de boa retenção de água e bom arejamento, o que demanda solos bem estruturados. Desse modo, o manejo adequado do solo é essencial e deve buscar harmonizar a produção de alimentos com a preservação e/ou melhoria de suas propriedades, diminuindo, assim também os impactos ao meio ambiente.

A capacidade de suporte de carga do solo é influenciada por vários fatores, tais como estrutura, teor de matéria orgânica e teor de água no solo (DIAS JUNIOR, 1994; GILL; VAN DEN BERG, 1967; HORN et al., 1988; STONE; EKWUE, 1995). Os modelos de capacidade de suporte de carga (MCSC) $\sigma_p = 10^{(a+b \theta)}$ (DIAS JUNIOR, 1994) são capazes de prever a máxima pressão que o solo pode suportar em diferentes umidades sem sofrer compactação adicional.

O preparo excessivo do solo e a degradação de pastagens estão causando problemas ambientais na região do Cerrado, comprometendo a qualidade e a sustentabilidade dos sistemas agrícolas (MACEDO, 2009; SOUSA NETO et al., 2014). Estima-se que 80% das pastagens cultivadas, no Brasil Central, responsáveis por mais de 55% da produção nacional de carne, encontram-se em algum estágio de degradação (CORDEIRO et al., 2015; PERON; EVANGELISTA, 2004).

Os sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) intensificam e diversificam o uso da terra, podendo recuperar áreas degradadas, aumentar a produção e permitir a exploração econômica da área durante todo o ano (ASSIS et al., 2015; BALBINO et al., 2012; DIEL et al., 2014; MACEDO, 2009). Seu impacto na qualidade do solo, porém, necessita de mais estudos, uma vez que o tráfego intenso de máquinas e implementos agrícolas e o pisoteio animal em condições inadequadas de umidade podem compactar o solo severamente (ANDRADE et al., 2017; NEIVA JUNIOR et al., 2015; ORTIGARA et al., 2014).

Apesar dos sistemas ILPF possuírem potencial, para a diminuição da compactação do solo (ANGHINONI; CARVALHO; COSTA, 2013; BALBINO et al., 2011; MACEDO et al., 2009), o pisoteio animal promove a degradação da estrutura do solo, podendo ser observada, em alguns atributos físico-mecânicos do solo (NEIVA JUNIOR et al., 2015; SOUSA NETO et al., 2014) e nos MCSC, tornando-se imprescindível estabelecer indicadores adequados com relação ao tempo de implantação dos sistemas ILPF, bem como em quais horizontes podem ser observados.

Neste contexto, este estudo baseia-se na hipótese de que a degradação da estrutura do solo é influenciada não só pelo sistema de manejo e pelo pisoteio animal, mas também pelo tempo de adoção do sistema e pela própria estratificação do perfil do solo. Assim, os objetivos deste trabalho foram avaliar atributos físico-mecânicos de um Latossolo sob sistema ILPF com 1 ano de implantação, ILPF com 6 anos de implantação, pastagem e cerrado nativo, nos horizontes A, AB, BA topo, BA base e Bw e propor modelos de capacidade de suporte de carga em diferentes horizontes e identificar, por meio desses modelos, qual manejo degrada e preserva a estrutura do solo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado na Fazenda Experimental da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), localizada na região central de Minas Gerais, no município de Curvelo (coordenadas geográficas 18°45'S, 45°25'W e altitude média de 633m).

As áreas de estudo se encontravam submetidas aos manejos: integração-lavoura-pecuária floresta com 1 ano de implantação (ILPF 1 ano), com consórcio de milho e capim marandu e, nas linhas eucalipto, com espaçamento 12 x 2m; integração-lavoura-pecuária floresta com 6 anos de implantação (ILPF 6 anos), cultivada com sorgo e braquiária em sucessão e, nas linhas eucalipto, com espaçamento 12 x 2m; pastagem com braquiária e cerrado nativo (CN).

O solo da área de estudo foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico, exceto da área de pastagem, que possui coloração Vermelho-Amarelo. A caracterização física e a matéria orgânica do solo estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Caracterização física e matéria orgânica do CN, Pastagem, ILPF 1 ano e ILPF 6 anos em diferentes horizontes.

Horizonte	D _p g cm ⁻³	M.O. dag kg ⁻¹	Argila -----	Silte g kg ⁻¹	Areia -----	Classe Textural ¹
CN						
A	2,74	2,24	700	240	60	Muito Argilosa
AB	2,71	1,37	710	230	60	Muito Argilosa
BA topo	2,70	1,16	680	260	50	Muito Argilosa
BA base	2,72	0,78	710	240	50	Muito Argilosa
Bw	2,73	0,57	700	250	50	Muito Argilosa
PASTAGEM						
A	2,65	2,23	500	370	130	Argilosa
AB	2,72	1,08	540	340	120	Argilosa
BA topo	2,76	0,58	550	340	110	Argilosa
BA base	2,71	0,46	570	330	100	Argilosa
Bw	2,73	0,39	560	330	110	Argilosa
ILPF 1 ANO						
A	2,64	2,77	550	340	110	Argilosa
AB	2,77	1,37	590	340	80	Argilosa
BA topo	2,69	1,00	610	320	70	Muito Argilosa
BA base	2,69	0,85	630	320	50	Muito Argilosa
Bw	2,72	0,49	670	280	50	Muito Argilosa
ILPF 6 ANOS						
A	2,64	2,37	620	340	40	Muito Argilosa
AB	2,71	1,73	670	290	40	Muito Argilosa
BA topo	2,71	1,25	680	280	40	Muito Argilosa
BA base	2,76	1,01	690	270	40	Muito Argilosa
Bw	2,73	0,80	710	250	40	Muito Argilosa

Dp: Densidade de partícula; M.O: matéria orgânica; ¹ De acordo com Santos et al. (2013).

Para a coleta de amostras, foram abertas trincheiras para a identificação dos horizontes, em três pontos distintos, equivalentes a três repetições em cada tratamento. As amostras foram coletadas nos horizontes A, AB, BA topo, BA base e Bw. A amostragem, orientada por horizontes, teve como objetivo contemplar a possibilidade de redução da espessura do horizonte superficial, em decorrência tanto de erosão quanto de compactação, uma vez que os Latossolos muito argilosos do Cerrado são extremamente porosos e altamente suscetíveis à compactação na sua condição nativa (AJAYI et al., 2009). O horizonte BA foi

amostrado em duas camadas, em razão de sua maior espessura, enquanto o horizonte Bw foi amostrado apenas em sua porção superior. Nos horizontes A e AB, as amostras foram coletadas em posição intermediária.

Com o intuito de avaliar a resistência mecânica do solo, em condições padronizadas, optou-se pelas tensões de 6 e 100kPa. A sucção de 6 kPa é reconhecida como uma boa indicadora da capacidade de campo em Latossolos tropicais muito argilosos, enquanto, na sucção de 100 kPa, o solo estaria com água ainda disponível, mas em uma condição mais seca que a anterior (PIRES et al., 2012; REICHARDT, 1988).

Para determinar a resistência do solo à penetração e a pressão de pré-consolidação, foram coletadas 120 amostras indeformadas do solo (3 pontos amostrais x 4 tratamentos x 5 horizontes x 2 sucções matriciais), utilizando o amostrador de Umland com anéis volumétricos de 6,40 cm de diâmetro interno e 2,54 cm de altura.

As amostras de solo foram preparadas e saturadas e, após atingir o equilíbrio em cada tensão, as amostras foram pesadas e submetidas ao ensaio de resistência do solo à penetração, conforme Tormena, Silva e Libardi (1998). Para isso, foi empregado um penetrógrafo digital de bancada da marca Marconi, modelo MA 933, com ponteira de cone circular reto, de 45° e 3,84 mm de diâmetro e velocidade constante de 10 mm min⁻¹. A resistência do solo à penetração foi calculada conforme Serafim et al. (2013).

Posteriormente, as amostras foram submetidas ao ensaio compressão uniaxial (DIAS JUNIOR; MARTINS, 2017). Para isso, foram empregados consolidômetros da marca Durham Geo Slope® modelo S-450 Terraload, cuja aplicação das pressões se faz pela utilização de ar comprimido. As pressões aplicadas às amostras foram: 25, 50, 100, 200, 400, 800, 1600 kPa, as quais foram aplicadas às amostras até que 90% de sua deformação máxima fossem alcançadas (HOLTZ; KOVACS, 1981; TAYLOR, 1948). As pressões de pré-

consolidação foram obtidas, de acordo com Dias Junior e Pierce (1995), nas curvas de compressão do solo.

Após os ensaios, as amostras foram secas em estufa, a 105-110 °C, por 48h, para a determinação do conteúdo de água nas respectivas tensões e da densidade do solo (D_s). Foram calculadas a porosidade total utilizando a Equação 1, microporosidade (valor referente a 6 kPa) e a macroporosidade utilizando a Equação 2 (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA, 2017).

$$PT = 1 - \left(\frac{D_s}{D_p} \right) \quad (1)$$

$$\text{Macroporosidade} = PT - \text{Microporosidade} \quad (2)$$

em que: D_s e D_p são as densidades do solo e de partículas (g cm^{-3}), respectivamente.

Os dados foram submetidos à análise de variância e, quando pertinente, ao teste de média de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Para os modelos de capacidade de suporte de carga (MCSC), foram coletadas 5 amostras indeformadas (anéis volumétricos de 6,40cm de diâmetro interno e 2,54cm de altura), nos horizontes A, AB, BA topo e BA base, totalizando 240 amostras (5 amostras x 3 pontos x 4 tratamentos x 4 horizontes). As amostras indeformadas foram saturadas e, posteriormente, secas ao ar no laboratório, a fim de simular uma série de umidades para, então, serem submetidas ao ensaio de compressão uniaxial descrito anteriormente (DIAS JUNIOR; MARTINS, 2017).

Após a realização dos ensaios de compressão uniaxial, as pressões de pré-consolidação foram obtidas, de acordo com Dias Junior e Pierce (1995), nas

curvas de compressão do solo. A seguir, as pressões de pré-consolidação foram representadas, em função das umidades volumétricas simuladas em laboratório e foram obtidas as equações matemáticas que correspondem aos MCSC, de acordo com Dias Junior (1994) $\sigma_p = 10^{(a+b \theta)}$, em que σ_p é a pressão de pré-consolidação, θ é a umidade volumétrica do solo e “a” e “b” os coeficientes de ajuste da regressão.

Os MCSC de cada tratamento, nos diferentes horizontes, foram comparados, utilizando-se o teste de homogeneidade de modelos lineares descrito em Snedecor e Cochran (1989).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Pelos resultados obtidos, não houve diferença significativa entre os tratamentos, no que se refere à resistência do solo à penetração (RP) na tensão de 6 kPa (TABELA 2). Observou-se que, para todos os tratamentos, a RP foi maior no horizonte A, contudo, em nenhum horizonte, a RP na tensão de 6 kPa foi restritiva ao crescimento radicular, visto que não atingiu valores superiores a 2 MPa, valor amplamente considerado como limitante para o crescimento radicular (TAYLOR; ROBERTSON; PARKER, 1966; TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1998).

Tabela 2 - Resistência à penetração e pressão de pré-consolidação, em diferentes tensões para CN, Pastagem, ILPF 1 ano e ILPF 6 anos em diferentes horizontes.

(Continua)

Tratamento	Horizonte				
	A	AB	BAtopo	BAbase	Bw
6 kPa					
RP (MPa)					
CN	0,54 b	0,21 a	0,26 a	0,13 a	0,13 a
PASTAGEM	0,82 b	0,47 a	0,25 a	0,22 a	0,14 a
ILPF 1 ANO	0,58 b	0,30 a	0,26 a	0,14 a	0,12 a
ILPF 6 ANOS	0,53 b	0,28 a	0,24 a	0,18 a	0,12 a
σ_p (kPa)					
CN	82 b	66 b	59 a	56 a	66 a
PASTAGEM	129 b	92 b	59 a	50 a	44 a
ILPF 1 ANO	97 b	80 b	48 a	38 a	28 a
ILPF 6 ANOS	79 b	78 b	43 a	35 a	48 a
100 kPa					
RP (MPa)					
CN	0,63 Aa	0,55 Aa	0,89 Aa	0,30 Aa	0,36 Aa
PASTAGEM	3,16 Bb	1,43 Aa	0,57 Aa	0,51 Aa	0,52 Aa
ILPF 1 ANO	2,31 Bb	1,20 Aa	0,67 Aa	0,36 Aa	0,50 Aa
ILPF 6 ANOS	2,58 Bb	0,75 Aa	0,46 Aa	0,41 Aa	0,32 Aa

Tabela 2 - Resistência à penetração e pressão de pré-consolidação, em diferentes tensões para CN, Pastagem, ILPF 1 ano e ILPF 6 anos em diferentes horizontes.

(Conclusão)

Tratamento	Horizonte				
	A	AB	BAtopo	BAbase	Bw
	σ_p (kPa)				
CN	75 A	88 A	112 A	111 A	65 A
PASTAGEM	251 B	299 B	242 B	253 B	244 B
ILPF 1 ANO	239 B	269 B	282 B	181 B	240 B
ILPF 6 ANOS	233 B	201 B	273 B	235 B	221 B

Fonte: Da autora (2018).

Letras maiúsculas comparam os tratamentos dentro do mesmo horizonte. Letras minúsculas comparam os horizontes dentro do mesmo tratamento. A ausência de uma das letras ou letras iguais não diferem significativamente pelo teste de Scott Knott ($p < 0,05$).

Não houve diferença significativa entre os tratamentos na pressão de pré-consolidação (σ_p) na tensão de 6 kPa (TABELA 2). Observa-se que, para todos os tratamentos, a σ_p foi maior nos horizontes A e AB, indicando a influência dos manejos em superfície, já que a σ_p é um indicativo da máxima pressão aplicada ao solo no passado (DIAS JUNIOR, 1994), assim, os horizontes A e AB sofreram maior compactação.

A ausência de diferença entre os tratamentos na RP e na σ_p , na tensão de 6 kPa, pode estar relacionada com a umidade nesta sucção que variou de 0,35 a 0,31 $m^3 m^{-3}$ (TABELA 3) e solos muito úmidos apagam sua história de tensão, assim, os altos valores de umidade podem ter diminuído a RP e a σ_p , mesmo que algum tratamento causasse compactação do solo, tornando-os semelhantes ao CN.

Tabela 3 - Umidades volumétricas ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), em diferentes sucções para CN, Pastagem, ILPF 1 ano e ILPF 6 anos em diferentes horizontes.

Tratamento	Horizonte				
	A	AB	BAtopo	BAbase	Bw
6 kPa					
CN	0,33	0,33	0,34	0,32	0,33
PASTAGEM	0,31	0,35	0,33	0,33	0,32
ILPF 1 ANO	0,33	0,31	0,31	0,33	0,35
ILPF 6 ANOS	0,35	0,34	0,34	0,35	0,32
100 kPa					
CN	0,26	0,26	0,26	0,24	0,23
PASTAGEM	0,24	0,27	0,27	0,21	0,21
ILPF 1ANO	0,28	0,25	0,25	0,22	0,24
ILPF 6 ANOS	0,29	0,27	0,27	0,25	0,24

Fonte: Da autora (2018).

Na tensão de 100 kPa, houve incrementos na RP no horizonte A, em todos os manejos, quando comparados ao CN com grande probabilidade de restrição ao crescimento radicular, já que os valores superaram o limite de 2MPa. Já a σ_p aumentou em todos os manejos, quando comparados ao CN, nos diferentes horizontes, evidenciando o impacto dos tratamentos, também, em profundidade, um efeito que apenas este indicador detectou.

Observam-se maiores valores de RP e σ_p na tensão 100 kPa, quando comparados a 6kPa. Esses resultados demonstram a influência da umidade nas duas propriedades, apesar da pouca variação de umidade, uma vez que a umidade na tensão de 100 kPa variou de 0, 21 a 0,29 m^3m^{-3} , enquanto em 6 kPa variou de 0,31 a 0,35 m^3m^{-3} (TABELA 3). Com o aumento do teor de água, decresce a atuação das forças de coesão entre as partículas do solo e o atrito interno, promovendo a diminuição da RP e da σ_p (CUNHA; VIEIRA; MAGALHÃES, 2002).

O CN apresentou os menores valores de RP, em todos os horizontes, concordando com Ortigara et al. (2014) que, avaliando a RP, em diferentes

tratamentos, observaram que a mata nativa apresentou os menores valores em todas as profundidades estudadas (até 15 cm).

Ortigara et al. (2014) relataram que o pisoteio animal elevou os valores (σ_p), no sistema de pastagem rotacionada, em relação aos sistemas com revolvimento do solo e mata nativa, para amostras equilibradas na tensão de 6 kPa. Tal fato não foi observado neste trabalho, na mesma tensão, uma vez que não houve diferença entre os tratamentos para todos os horizontes. Essa diferença só foi observada na tensão de 100 kPa, em que ocorreu o impacto de todos os tratamentos, em todos os horizontes, o que é muito relevante, visto que muitos estudos de mecânica dos solos optam por sucções mais baixas (ORTIGARA et al., 2014) e, nessa circunstância, a limitação físico-mecânica é menos expressiva do que em relação à tensão de 100 kPa, principalmente, em Latossolos muito argilosos que possuem alta capacidade de reter água.

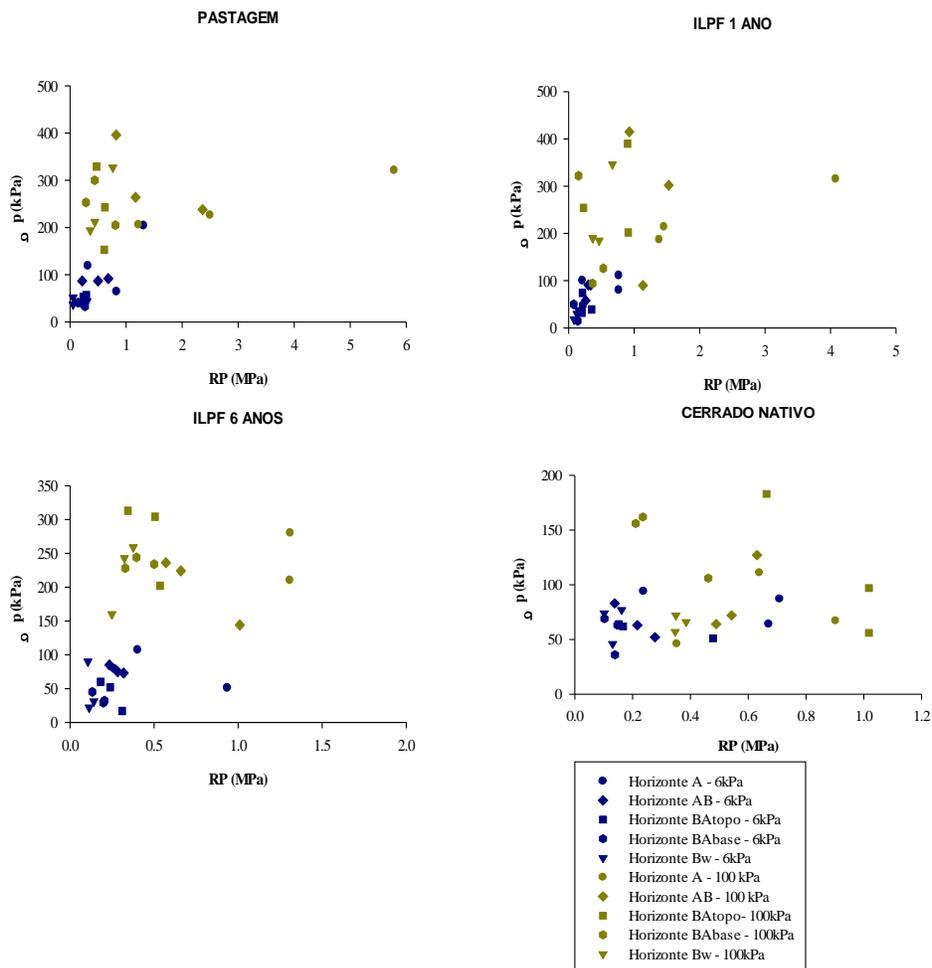
O CN apresentou os menores valores de σ_p , indicando melhor preservação da sua estrutura; resultados semelhantes foram encontrados por Neiva Junior et al. (2015) que, estudando Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico sob diferentes usos e manejos, observaram que a mata nativa apresentou os menores valores de σ_p enquanto o solo com pastagem de ovinos apresentou os maiores valores.

Apesar de ambas as propriedades (RP e σ_p) variarem com a umidade do solo, observa-se que a σ_p sofre uma influência muito maior. Na Figura 1, nota-se, claramente, a maior concentração de amostras mais úmidas (6 kPa), na parte inferior do eixo, representado pela σ_p , e as amostras menos úmidas (100 kPa) se concentram na parte superior. Observou-se, ainda o impacto na RP nos horizontes A e AB do ILPF 1 ano, ILPF 6 anos e pastagem (FIGURA 1), indicando a influencia da RP nos horizontes superficiais.

A densidade do solo (TABELA 4) foi alterada pelos usos do solo; os maiores valores de Ds foram encontrados no horizonte A e AB da pastagem,

indicando alteração na estrutura no solo por pisoteio animal nos horizontes superficiais. Os menores valores de D_s foram observados no CN e resultados semelhantes foram encontrados por Ortigara et al. (2014) que, estudando propriedades físico-mecânicas, encontraram maiores valores de D_s na pastagem rotacionada quando comparada à mata nativa.

Figura 1 - Relação pressão de pré-consolidação e resistência à penetração do solo, para CN, Pastagem, ILPF 1 ano e ILPF 6 anos, em diferentes horizontes e tensões de retenção da água no solo.



Fonte: Da autora (2018).

O decréscimo da porosidade total e o aumento da Ds no horizonte A foi observado para a sequência de manejo: pastagem > ILF1 ano = ILPF 6 anos > CN. Essas propriedades do solo indicam que, apesar do maior impacto ser observado na pastagem, os sistemas integrados ILPF 1 e ILPF 6 anos também degradaram a estrutura do solo, quando comparados ao CN (TABELA 4).

Segundo Taylor e Ashcroft (1972), o espaço aéreo de 10 % de macroporos é considerado suficiente, para arejar e satisfazer a demanda respiratória no solo, assim, apesar de todos os tratamentos diminuírem a macroporosidade do solo, nenhum deles é limitante quanto à areação do solo, porém o horizonte A da pastagem está muito próximo desse limite.

Salton et al. (2002) encontraram uma redução de 18 %, na macroporosidade do solo, na camada de 0-5 cm de profundidade, após o pastoreio rotativo, em um Latossolo Distrófico típico muito argiloso, conduzido sob plantio direto com sucessão soja/aveia.

Tabela 4 - Porosidade total, macroporosidade, microporosidade densidade do solo do CN, Pastagem, ILPF 1 ano e ILPF 6 anos em diferentes horizontes.

(Continua)

Tratamento	Horizonte				
	A	AB	BAtopo	BAbase	Bw
	PT (%)				
CN	0,62 Aa	0,61 Aa	0,63 Aa	0,64 Aa	0,63 Aa
PASTAGEM	0,46 Cc	0,55 Bb	0,56 Bb	0,59 Aa	0,61 Aa
ILPF 1 ANO	0,57 Ba	0,61 Aa	0,60 Ba	0,61 Aa	0,60 Aa
ILPF 6 ANOS	0,57Ba	0,59 Aa	0,64 Aa	0,61 Aa	0,61 Aa
	Macro (%)				
CN	0,30 Aa	0,26 Aa	0,29 Aa	0,26 Aa	0,27 Aa
PASTAGEM	0,11 Bb	0,21 Aa	0,20 Ba	0,22 Aa	0,24 Aa
ILPF 1 ANO	0,21 Aa	0,27 Aa	0,26 Aa	0,23 Aa	0,24 Aa
ILPF 6 ANOS	0,21 Aa	0,26 Aa	0,28 Aa	0,24 Aa	0,23 Aa

Tabela 4 - Porosidade total, macroporosidade, microporosidade densidade do solo do CN, Pastagem, ILPF 1 ano e ILPF 6 anos em diferentes horizontes.

(Conclusão)

Tratamento	Horizonte				
	A	AB	BAtopo	BAbase	Bw
	Micro(%)*^{ns}				
CN	0,32	0,35	0,34	0,38	0,36
PASTAGEM	0,35	0,34	0,36	0,37	0,37
ILPF 1 ANO	0,36	0,34	0,34	0,38	0,36
ILPF 6 ANOS	0,36	0,36	0,36	0,37	0,38
	Densidade do solo (Mg m⁻³)				
CN	1,00 Aa	1,03 Aa	1,00 Aa	1,01 Aa	0,97 Aa
PASTAGEM	1,30 Cb	1,26 Bb	1,08 Aa	1,03 Aa	1,00 Aa
ILPF 1 ANO	1,11 Bc	1,11 Ac	1,04 Ab	0,98 Aa	0,96 Aa
ILPF 6 ANOS	1,18 Bc	1,08 Ab	1,02 Aa	1,00 Aa	0,96 Aa

Fonte: Da autora (2018).

Letras iguais não diferem significativamente pelo teste de Scott Knott ($p < 0,05$). Letras maiúsculas comparam os tratamentos dentro do mesmo horizonte. Letras minúsculas comparam os horizontes dentro do mesmo tratamento. ^{ns}: não significativo na análise de variância.

A σ_p mostrou-se mais sensível, ao identificar a compactação do solo causada pelos diferentes tratamentos, nos horizontes sub-superficiais, quando comparada à RP e à Ds (TABELAS 2 e 4). A Ds foi significativamente diferente até o horizonte AB, enquanto a RP diferiu apenas no horizonte A. Esses resultados demonstram a importância de se avaliar diferentes propriedades físico-mecânicas para determinar a influência dos sistemas de manejo da estrutura do solo.

A diferença entre os horizontes, na estrutura do Latossolo distrófico típico de cada manejo para os MCSC, estão apresentados na Tabela 5.

Os valores de “a” (intercepto da regressão linearizada) variaram de 2,80 a 2,95 e os de “b” (coeficiente angular da regressão linearizada) entre -1,72 a -

2,77. Os coeficientes de determinação (R^2) foram todos significativos a 1 % pelo teste t-Student e variaram de 0,80 a 0,82.

Os MCSC, para os horizontes A e AB do CN e do ILPF 6 anos, não foram estatisticamente diferentes, assim, uma nova equação foi ajustada a todos os pontos, obtendo-se um novo MCSC para representar o horizonte A+AB. O mesmo ocorreu, ao se comparar os horizontes BA topo e BA base, contudo, ao comparar os MCSC do A+AB com BA base+BA topo, não houve diferença estatística. Logo uma nova equação foi ajustada, e os MCSC do CN e ILPF 6 anos, para diferentes horizontes, foram representados num único modelo (FIGURA 2).

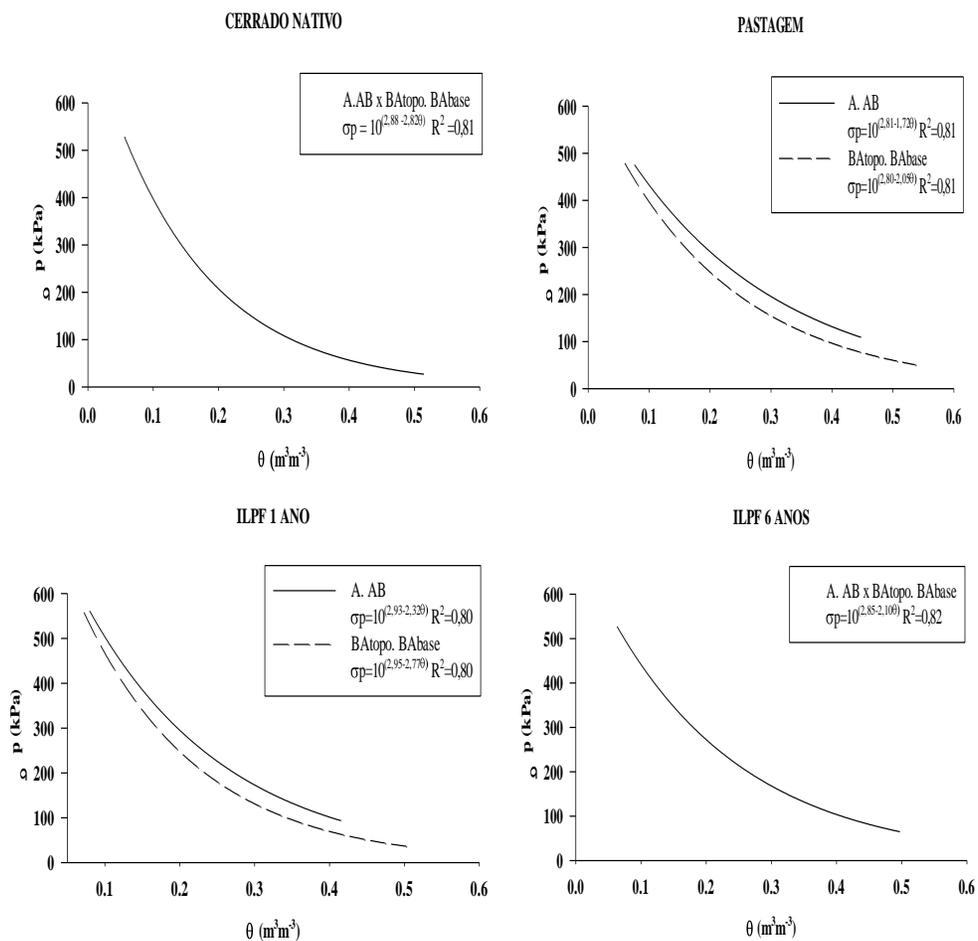
Os MCSC, para os horizontes A e AB da pastagem e do ILPF 1 ano, não foram estatisticamente diferentes, assim, uma nova equação foi ajustada a todos os pontos, obtendo-se um novo MCSC para representar o horizonte A+AB. O mesmo ocorreu, ao se comparar os horizontes BA topo e BA base. Contudo, ao comparar os MCSC do A+AB com BA base+BA topo, nesses dois manejos, houve diferença estatística e seus respectivos MCSC estão representados na Figura 2.

Tabela 5 - Teste de significância⁽¹⁾ entre os modelos de capacidade de suporte de carga [$\sigma_p = 10^{(a + b\theta)}$] do CN, Pastagem, ILPF 1 ano e ILPF 6 anos para diferentes horizontes.

Horizontes	F	F	
		Coefficiente angular, b	Coefficiente linear, a
CN			
A x AB	H	ns	ns
BAtopo x BAbase	H	ns	ns
AAB x BAtopoBAbase	H	ns	ns
PASTAGEM			
A x AB	H	ns	ns
BAtopo x BAbase	H	ns	ns
AAB x BAtopoBAbase	H	ns	*
ILPF 1 ANO			
A x AB	H	ns	ns
BAtopo x BAbase	H	ns	ns
AAB x BAtopoBAbase	H	ns	*
ILPF 6 ANOS			
A x AB	H	ns	ns
BAtopo x BAbase	H	ns	ns
AAB x BAtopoBAbase	H	ns	ns

(1) Snedecor e Cochran (1989). H: homogêneo; * e ns:significativo 5% e não significativo, respectivamente.

Figura 2 - MCSC do CN, pastagem, ILPF 1ane ILPF 6 anos em diferentes horizontes.



Fonte: Da autora (2018).

Esses resultados demonstram a compactação do solo que ocorreu, nos horizontes superficiais da pastagem e do ILPF 1 ano, indicando o potencial do pisoteio animal em compactar a camada superficial, concordando com Pires et al. (2012).

Embora o preparo do solo tenha sido semelhante aos ILPF 1 ano e ILPF 6 anos, observa-se que o tempo de implantação interferiu na estrutura dos horizontes A e AB do solo, pois, apesar dos maiores teores de matéria orgânica, o ILPF 1 ano (TABELA 2), obteve o maior tempo de atuação dos microorganismos, e os ciclos de umedecimento e secagem no ILPF 6 anos proporcionaram uma recuperação estrutural nos horizontes superficiais.

Ortigara et al. (2014), analisando a capacidade de suporte de carga, em pastejo rotacionado, mata nativa e preparo convencional, observaram que o pisoteio animal intensivo, em área de pastagem, causou alterações na estrutura do solo, gerando níveis de compactação restritivos às plantas e que as áreas de mata nativa e preparo convencional são as mais suscetíveis à compactação do solo, apresentando baixa pressão de pré-consolidação.

A diferença entre manejos na estrutura do Latossolo distrófico típico, nos horizontes superficial (A+AB) e subsuperficial (BAtopo+BAbase), para os MCSC, estão apresentados na Tabela 6. Os valores de “a” variaram de 2,85 a 2,88, e os de “b” entre -2,03 a -2,82. Os coeficientes de determinação (R^2) foram todos significativos a 1 % pelo teste t-Student e variaram de 0,80 a 0,81.

Tabela 6 - Teste de significância⁽¹⁾ entre os modelos de capacidade de suporte de carga [$\sigma_p = 10^{(a + b0)}$] dos horizontes A e B para os diferentes tratamentos.

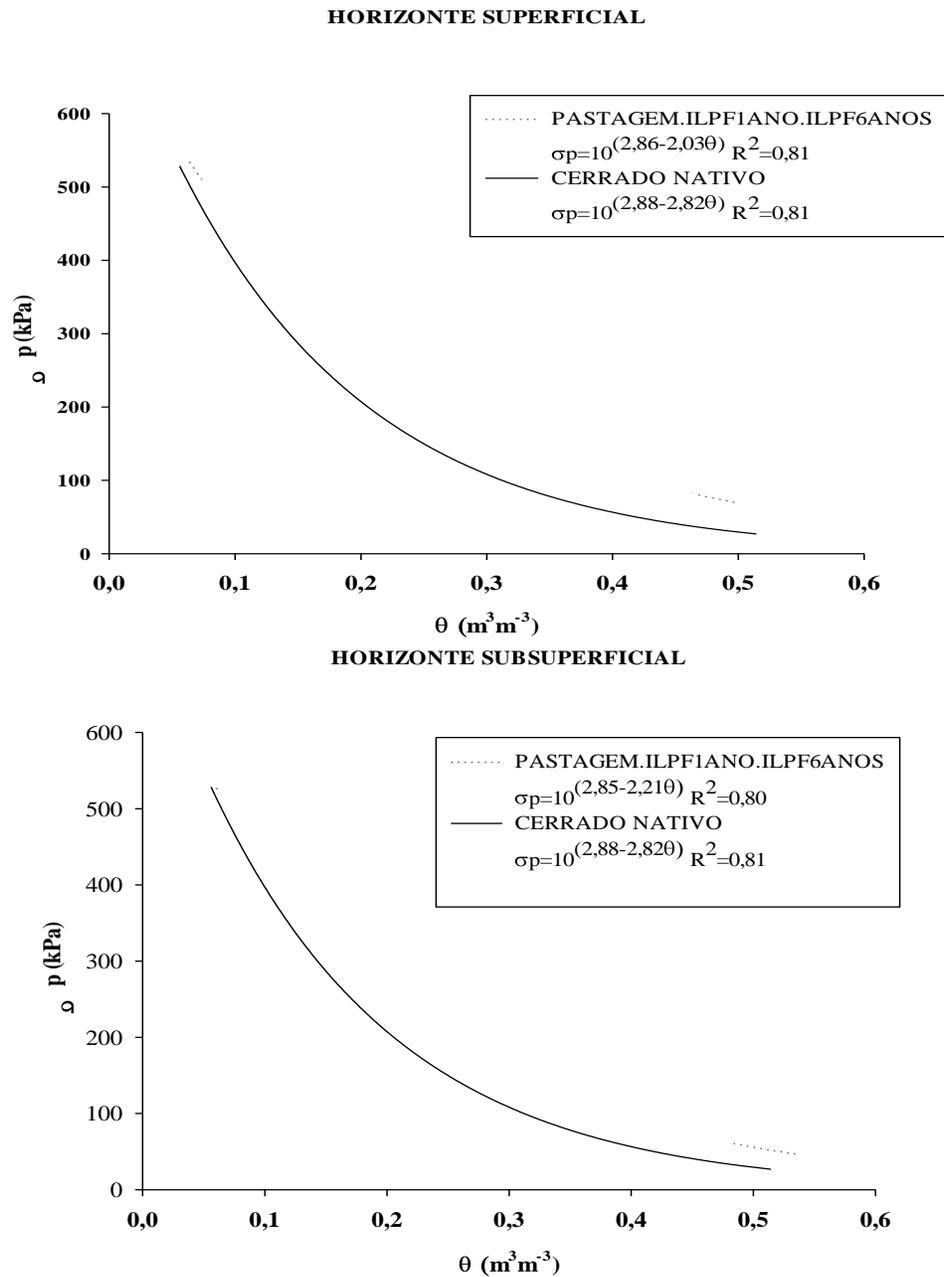
Tratamentos	F	F	
		Coefficiente angular, b	Coefficiente linear, a
HORIZONTE SUPERFICIAL			
PASTAGEM x ILPF 1	H	ns	ns
PASTAGEM.ILPF 1 x ILPF 6	H	ns	ns
PASTAGEM.ILPF 1.ILPF 6 x CN	H	ns	**
HORIZONTE SUBSUPERFICIAL			
PASTAGEM x ILPF 1	H	ns	ns
PASTAGEM.ILPF 1 x ILPF 6	H	ns	ns
PASTAGEM.ILPF 1.ILPF 6 x CN	NH	ns	**

(1) Snedecor e Cochran (1989). H: homogêneo; NH: não homogêneo** e ns: significativo 1% e não significativo, respectivamente.

Os MCSC, para a pastagem, ILPF 1 ano e ILPF 6 anos, não foram estatisticamente diferentes no horizonte superficial. Assim, uma nova equação foi ajustada e, ao se comparar esse novo modelo com o MCSC do CN ao horizonte superficial, houve diferença estatística (TABELA 6, FIGURA 3). Os MCSC, para a pastagem, ILPF 1 ano e ILPF 6 anos, não foram estatisticamente diferentes no horizonte subsuperficial. Assim, uma nova equação foi ajustada e, ao comparar esse novo modelo com o MCSC do CN, no horizonte subsuperficial, houve diferença estatística (TABELA 3, FIGURA 2).

Decorrente de maior compacidade da sua estrutura, os solos sob pastagem, ILPF 1 ano e ILPF 6 anos sofrem menor decréscimo, na pressão de pré-consolidação com o aumento da umidade, conforme indicado pelos maiores valores do parâmetro "b" no MCSC do CN (FIGURA 2). Observou-se, ainda, pelo ajuste do parâmetro "b" que o decréscimo na pressão de pré-consolidação com o aumento da umidade é menor nos horizontes A (-2,03), em relação ao horizonte B (-2,21), indicando maior compactação no horizonte superficial.

Figura 3 - MCSC dos horizontes superficial e subsuperficial nos diferentes tratamentos.



Fonte: Da autora (2018).

Observa-se que, para ambos os modelos, o CN possui uma menor capacidade de suporte de carga, quando comparado aos demais sistemas de manejo; esse resultado indica um efeito compactador de todos os manejos na estrutura do solo.

Esses resultados são muito relevantes, dado que os MCSC podem apontar a compactação, numa ampla faixa de umidade, sendo mais abrangente que verificar os efeitos da compactação do solo numa determinada tensão ou na umidade de campo. Assim sendo, de acordo com os MCSC, todos os manejos impactaram negativamente a estrutura do solo, quando comparados ao CN, em superfície e sub-superfície, já que não houve diferença entre os sistemas integrados e a pastagem convencional.

4 CONCLUSÕES

A umidade do solo influenciou a RP e a σ_p .

O efeito de manejo, nas propriedades físico-mecânicas do solo, só foi observado na sucção de 100 kPa,

A σ_p demonstrou influência da pastagem, do ILPF 1 ano e ILPF 6 anos, em todos os horizontes, enquanto a RP e a Ds só nos horizontes superficiais.

Os sistemas integrados ILPF 1 ano e ILPF 6 anos degradaram menos as propriedades físico-mecânicas do solo, quando comparados à pastagem, mas ainda retratam uma grande influência do manejo, nas camadas mais superficiais, quando comparados ao CN.

Os horizontes A+ AB da pastagem e do pelo ILPF 1 ano possuem maior capacidade de suporte de carga.

O CN possui uma menor capacidade de suporte de carga nos horizontes superficiais e subsuperficiais.

Não houve diferença da compactação causada pela pastagem, ILPF 1 ano e ILPF 6 anos nos horizontes superficiais e subsuperficiais com o uso dos MCSC.

AGRADECIMENTOS: Os autores agradecem ao CNPq, à FAPEMIG e à CAPES o apoio financeiro concedido.

REFERÊNCIAS

AJAYI, A. E. et al. Relation of strength and mineralogical attributes in Brazilian Latosols. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 102, p. 14-18, 2009.

ANDRADE, M. L. C. et al. Soil compaction caused by harvest and logging operations on eucalyptus Forest in coarse-textured soils from northeastern Brazil. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 41, n. 2, p. 191-200, mar./abr. 2017.

ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. F.; COSTA, S. E. V. G. A. Abordagem sistêmica do solo em sistemas integrados de produção agrícola e pecuária no subtropical brasileiro. **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 8, p. 221-278, 2013.

ASSIS, P. C. R. et al. Atributos físicos do solo em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, n. 4, p. 309-316, 2015.

BALBINO, L. C. et al. Agricultura sustentável por meio da Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF). **Informações Agronômicas IPNI**, Piracicaba, n. 138, p. 1-18, jun. 2012.

BALBINO, L. C. et al. Evolução tecnológica e arranjos produtivos de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 46, p. 1-21, 2011.

CORDEIRO, L. A. M. et al. Integração lavoura-pecuária e integração lavoura-pecuária-floresta: estratégias para intensificação sustentável do uso do solo. **Cadernos de Ciência e Tecnologia**, Brasília, DF, v. 32, n. 1/2, p. 15-53, jan./ago. 2015.

CUNHA, J. P. A. R. da; VIEIRA, L. B.; MAGALHÃES, A. C. Resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes densidades e teores de água. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG, v. 10, p. 1-7, 2002.

DIAS JUNIOR, M. de S. **Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic**. 1994. 114 f. Thesis (Ph.D. in Crop and Soil Science)-Michigan State University, East Lansing, 1994.

DIAS JUNIOR, M. de S.; MARTINS, P. C. C. Ensaio de compressão uniaxial e modelos de capacidade de suporte de carga do solo. In: TEIXEIRA, P. C. et al. (Org.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília, DF: EMBRAPA, 2017. p. 152-171.

DIAS JUNIOR, M. de S.; PIERCE, F. J. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. **Soil Technology**, Amsterdam, v. 8, n. 2, p. 139-151, Nov. 1995.

DIEL, D. et al. Distribuição horizontal e vertical de fósforo em sistemas de cultivos exclusivos de soja e de integração lavoura-pecuária-floresta. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 49, n. 8, p. 639-647, ago. 2014.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual e métodos de análise de solos**. 3. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2017. 573 p.

GILL, W. R.; VAN DEN BERG, G. E. **Soil dynamics in tillage and traction**. Washington: USDA, 1967. 511 p. (Agricultural Research Service, 316).

HOLTZ, R. D.; KOVACS, W. D. **An introduction to geotechnical engineering**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1981. 733 p.

HORN, R. et al. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and environment. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 35, p. 23-36, 1988.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Estimativas de população**. Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html?=&t=o-que-e>>. Acesso em: 15 mar. 2018.

MACEDO, M. C. M. Integração lavoura e pecuária: o estado da arte e inovações tecnológicas. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, MG, v. 38, p. 133-146, 2009.

NEIVA JUNIOR, E. et al. Compressibility and penetrability of latossolo vermelho-amarelo distrófico (oxisol) under varied management systems and land uses. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 39, n. 1, p. 86-93, 2015.

ORTIGARA, C. et al. Uso do solo e propriedades físico-mecânicas de Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 38, n. 2, p. 619-626, 2014.

PERON, A. J.; EVANGELISTA, A. R. Degradação de pastagens em regiões de Cerrado. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 28, n. 3, p. 655-661, maio/jun. 2004.

PIRES, B. S. et al. Modelos de capacidade de suporte de carga de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 36, n. 2, p. 635-642, 2012.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 12, p. 211-216, 1988.

SALTON, J. et al. Pastoreio da aveia e compactação do solo. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, n. 69, p. 1-40, maio/jun. 2002.

SANTOS, R. D. et al. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013. 100 p.

SERAFIM, M. E. et al. Qualidade física e intervalo hídrico ótimo em Latossolo e Cambissolo, cultivados com cafeeiro, sob manejo conservacionista do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 37, n. 3, p. 733-7420, 2013.

SNEDECOR, G. W.; COCHRAN, W. G. **Statistical methods**. 8th ed. Ames: Iowa State University Press, 1989. 503 p.

SOUSA NETO, E. L. et al. Physical quality of an Oxisol under an integrated crop-livestock-forest system in the Brazilian Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 38, n. 2, p. 608-618, 2014.

STONE, R. J.; EKWUE, E. I. Compressibility of some Trinidadian soils as affected by the incorporation of peat. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v. 60, p. 15-24, 1995.

TAYLOR, D. W. **Fundamentals of soil mechanics**. New York: J. Wiley, 1948. 700 p.

TAYLOR, H. M.; ROBERTSON, G. M.; PARKER, J. J. Soil strength root penetration relations for medium to coarse textured soil materials. **Soil Science**, Baltimore, v. 102, p. 18-22, 1966.

TAYLOR, S. A.; ASHCROFT, G. L. **Physical edaphology**: the physics of irrigated on nonirrigated soils. San Francisco: W. H. Freeman, 1972. 532 p.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 22, n. 4, p. 573-581, 1998.