

IGOR COSTA DE FREITAS

**ATRIBUTOS FÍSICOS, QUÍMICOS E ESTOQUES DE
CARBONO E NITROGÊNIO DO SOLO SOB DIFERENTES
SISTEMAS DE USO E MANEJO NA MESORREGIÃO
CENTRAL MINEIRA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Produção Vegetal do Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Produção Vegetal.

Área de concentração: Produção Vegetal

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Leidivan Almeida Frazão

Montes Claros

2016

F866a
2016

Freitas, Igor Costa de.

Atributos físicos, químicos e estoques de carbono e nitrogênio do solo sob diferentes sistemas de uso e manejo na Mesorregião Central Mineira

/ Igor Costa de Freitas. Montes Claros (MG): ICA/UFMG, 2016.
104 f.: il.

Dissertação (mestrado) - Área de concentração: Produção Animal, Universidade Federal de Minas Gerais / Instituto de Ciências Agrárias.

Orientadora: Leidivan Almeida Frazão.

Banca examinadora: Reginaldo Arruda Sampaio e Takashi Muraoka.

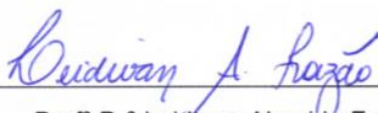
Inclui referências: fls. 92-104.

1. Qualidade do solo. 2. Integração Lavoura-Pecuária-Floresta. 3. Cerradão. 4. Matéria orgânica do solo I. Frazão, Leidivan Almeida. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Ciências Agrárias. III. Título.

CDU: 631.4

IGOR COSTA DE FREITAS

**ATRIBUTOS FÍSICOS, QUÍMICOS E ESTOQUES DE CARBONO E
NITROGÊNIO DO SOLO SOB DIFERENTES SISTEMAS DE USO E
MANEJO NA MESORREGIÃO CENTRAL MINEIRA**



Profª Drª Leidivan Almeida Frazão
(Orientadora – ICA-UFMG)

Aprovada em 21 de dezembro de 2016.

Montes Claros
2016

Aos meus pais Edi de Freitas Cardoso e Maria Eufêmia Costa de Freitas, que sempre dedicaram muito amor e sabedoria em meus passos. Aos meus irmãos Edi de Freitas Cardoso Júnior e Hebert Costa de Freitas, pelo companheirismo e pelos sábios ensinamentos prestados em todos os momentos vividos. À minha namorada Laís Gonçalves Martins pelo, companheirismo, carinho, compreensão e paciência.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por todas as conquistas;

À minha orientadora Prof.^a Dr.^a Leidivan Almeida Frazão, pelo excelente trabalho de orientação e pela paciência ao longo desta pesquisa;

Ao Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Minas Gerais – ICA/UFMG, por possibilitar a realização desta pós-graduação;

Aos professores da banca examinadora, pela participação e por todas as sugestões prestadas;

A todos os professores do Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, pelos ensinamentos transmitidos;

À Prof.^a Márcia Vitória Santos, por gentilmente disponibilizar as áreas para realização das pesquisas.

Ao Prof. Dr. Reginaldo Arruda Sampaio, pela disponibilização do Laboratório de Análise de Resíduos para Aproveitamento Agrícola para a realização dos trabalhos;

Ao Técnico de Laboratório Márcio Neves Rodrigues, pelo auxílio e orientação na condução dos trabalhos no Laboratório de Análise de Resíduos para Aproveitamento Agrícola;

Ao Prof. Dr. Luiz Arnaldo Fernandes, pela disponibilização do Laboratório de Análise de Solos para realização dos trabalhos;

Ao Técnico de Laboratório Manoel Martins Siqueira, pelo auxílio e orientação na condução dos trabalhos no Laboratório de Análise de Solos;

À Prof.^a Dr.^a Brigitte Josefine Feigl, por aceitar e proporcionar a realização de parte importante desta pesquisa no Laboratório de Biogeoquímica Ambiental do Centro de Energia Nuclear da Universidade de São Paulo - CENA/USP;

A Ralf Vieira de Araújo, Lílian Assêncio de Campos Duarte, Sandra Maria Genaro Nicolete, Admilson Rogério Margato, Dagmar Gisleine

Marchesoni Vasca e José Venceslau de Souto, que integram a equipe de apoio do Laboratório de Biogeoquímica Ambiental - CENA/USP, prestando todo o auxílio necessário no decorrer dos trabalhos;

À Prof.^a Dr.^a Adriana Pinheiro Martinelli, que por meio do programa Procad tornou possível a realização de parte das pesquisas no Laboratório de Biogeoquímica Ambiental - CENA/USP;

Aos colegas e amigos Taynan Marinho, Nayara Christina, Daniela Freitas, Guilherme Cyrino, Gean F. Costa, Vítor Ferreira, Ariel Duarte, William Primo, Pedro H. Lopes, Demerson L. de A. Barbosa, Jaílson Magalhães e todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste estudo.

Ao Programa Nacional de Cooperação Acadêmica da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES/Brasil, por proporcionar a interação científico-acadêmica entre o ICA/UFMG e o CENA/USP.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES/Brasil, pela concessão de bolsa de estudo.

Muito obrigado!

“A mãe-natureza em louvável ação, sempre aponta o caminho, exigindo observação: os fenômenos estão patentes, mas, aquilo tão aparente pode ser mera ilusão”.

(Ulisses Prudente da Silva)

RESUMO

Objetivou-se avaliar os atributos físicos, químicos e os teores e estoques de carbono e nitrogênio de um Latossolo Vermelho distrófico típico após um ano de conversão de pastagem degradada em sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) e cultivo de forrageiras em Curvelo (MG). Amostras de solo foram coletadas nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-30 cm nos seguintes tratamentos: áreas de ILPF com cultivo de eucalipto consorciado com milho e capim-marandu (ILPF M), milho e java (*Macrotyloma axillare*) (ILPF J) e milho, marandu e java (ILPF J+M); áreas com monocultivo de capim-marandu (MAR) e java (JAVA); área consorciada de marandu com java (J+M) e pastagem em processo de degradação (PAST). Determinaram-se os teores e estoques de C e N do solo nas áreas ILPF M, MAR, PAST e na vegetação nativa de Cerradão (VN). Avaliaram-se os atributos físicos: densidade do solo (DS) e de partículas (DP), porosidade total (PT), diâmetro médio geométrico (DMG) e ponderado (DMP) e índice de estabilidade de agregados (IEA); e químicos: matéria orgânica do solo (MOS), fósforo (mehlich-1), pH (acidez ativa), soma de bases (SB), capacidade efetiva (t) e potencial de troca de cátions (T) e saturação por bases (V). A dinâmica da MOS foi avaliada por meio dos atributos C orgânico total (COT) e N total (NT) do solo, estoque de COT (EstC) e NT (EstN), C orgânico (CO) das frações Leve-Livre (FLL), areia (F-areia) e silte+argila (F-silte+argila) da MOS. Para cada variável, calculou-se a média e o intervalo de confiança pelo teste t de Student ($p < 0,05$) e, para os parâmetros de qualidade da MOS, realizou-se análise de agrupamento por método hierárquico. Os atributos físicos do solo apresentaram poucas modificações devido ao pouco tempo (um ano) de implantação dos sistemas de uso e manejo avaliados. Quanto aos atributos químicos, verificou-se, de forma geral, melhoria na qualidade do solo sob sistemas de ILPF, expressa pelos maiores valores de MOS, fósforo, T e V. A conversão de pastagem de baixa produtividade em sistema ILPF M promoveu a recuperação dos estoques de COT para níveis próximos aos obtidos na VN na profundidade de 0-30 cm. Para o EstN, não foram observadas mudanças significativas no período estudado. Constatou-se, também, aumento dos teores de CO da FLL do solo sob o sistema ILPF M, observando-se valores semelhantes aos obtidos na VN até a profundidade de 20 cm. O sistema MAR apresentou valores de COT, NT, EstC, EstN e CO da FLL superiores aos observados no PAST. Em virtude da ausência de manejo adequado no sistema PAST, verificou-se também a perda da fração mais estável da MOS (F-silte+argila). Foi observado, a partir da análise de agrupamento dos tratamentos ILPF M, MAR, PAST e VN, que houve similaridade entre os sistemas MAR e PAST, enquanto o sistema ILPF M apresentou melhorias na qualidade da MOS, com maior similaridade em relação à VN. Dessa forma, conclui-se que há necessidade de estudos contínuos para verificar as possíveis melhorias na

qualidade do solo proporcionadas pela implantação do sistema de ILPF ao longo do tempo.

Palavras-chave: Qualidade do solo. Integração Lavoura-Pecuária-Floresta. Cerradão.

**PHYSICAL AND CHEMICAL ATTRIBUTES, AND CARBON AND
NITROGEN STOCKS IN SOIL UNDER DIFFERENT SYSTEMS OF USE
AND MANAGEMENT IN THE CENTRAL MESOREGION OF MINAS
GERAIS**

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the physical and chemical attributes, and contents and stocks of carbon and nitrogen in a typical dystrophic Red Latosol after one year of conversion of degraded pasture into systems of Integrated Crop-Livestock-Forest (ICLF) and forage cropping in Curvelo (MG). Soil samples were collected from depths of 0-5, 5-10, 10-20 and 20-30 cm in the following treatments: ICLF areas with eucalyptus intercropped with corn and marandu grass (ICLF M), corn and java (*Macrotyloma axillare*) (ICLF J), and corn, mandaru grass and java (ICLF J + M); areas with monoculture of marandu grass (MAR) and java (JAVA); marandu intercropped with java (J + M), and pasture in degradation process (PAST). The contents and stocks of C and N of soil in areas of ICLF M, MAR, PAST and native vegetation (NV) of Cerradão were measured. The following physical attributes were assessed: soil density (SD) and particle density (PD), total porosity (TP), geometric mean diameter (GMG) and weighted mean diameter (WMD), and aggregate stability index (ASI); and the chemical ones: soil organic matter (SOM), phosphorus (mehlich-1), pH (active acidity), sum of bases (SB), effective cation exchange capacity (ECEC) and potential cation exchange capacity (PCEC), and base saturation (BS). Soil organic matter (SOM) dynamics was evaluated through the following attributes: total organic C (TOC), and total N (TN); stock of TOC (CStock) and TN (NStock); organic C (OC) in free light fractions (FLF), sand (F-sand), and silt + clay (F-silt + clay) from MOS. For each variable, the mean and the confidence interval were calculated by using Student's t-test ($p < 0.05$), and for SOM quality parameters a hierarchical grouping analysis was performed. The soil physical attributes presented few modifications due to the short time (one year) of implementation of the systems of use and management evaluated. As for the chemical attributes, in general, there was improvement in soil quality under ICLF systems expressed by increased values of SOM, phosphorus, PCEC and BS. The conversion of low productivity pasture into ICLF M system promoted the recovery of CStocks to levels close to those obtained in NV at 0-30 cm depth. For NStock, no significant changes were observed in the study period. It was also observed an increase in OC contents of FLF of the soil under ICLF M system, presenting values similar to those obtained in NV up to 20 cm depth. MAR system presented values of TOC, TN, CStock, NStock and OC in FLF higher than those observed in PAST. Due to lack of adequate management in PAST

system, loss of a more stable fraction of SOM (F-silt + clay) was also observed. It was noted from the cluster analysis of ICLF M, MAR, PAST and NV treatments that there was similarity between MAR and PAST systems, whereas ICLF M system presented improvements in SOM quality, with better similarity to NV. Thus, it is concluded that there is a need for continuous studies to verify possible improvements in soil quality provided by the implementation of ICLF system over time.

Key-words: Soil quality. Integrated crop-livestock-forest systems. Cerradão - Savana.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Al	–	Alumínio
C	–	Carbono
Ca	–	Cálcio
CO	–	Carbono orgânico
COT	–	Carbono orgânico total
CTC	–	Capacidade de troca de cátions
DMG	–	Diâmetro médio geométrico
DMP	–	Diâmetro médio ponderado
DP	–	Densidade de partículas
DS	–	Densidade do solo
EstC	–	Estoque de carbono
EstN	–	Estoque de nitrogênio
F-areia	–	Fração areia
FFMOS	–	Fracionamento físico da matéria orgânica do solo
FLL	–	Fração leve livre
F-silte+argila	–	Fração silte e argila
GEE	–	Gases de efeito estufa
H	–	Hidrogênio
IEA	–	Índice de estabilidade de agregados
ILPF	–	Integração Lavoura-Pecuária-Floresta
K	–	Potássio
M	–	Saturação por alumínio
Mg	–	Magnésio
MOS	–	Matéria orgânica do solo
N	–	Nitrogênio
NT	–	Nitrogênio total
P	–	Fósforo
PT	–	Porosidade total
SB	–	Soma de bases
t	–	Capacidade efetiva de troca de cátions
T	–	Capacidade potencial de troca de cátions
TFSA	–	Terra fina seca ao ar
V	–	Saturação por bases

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

CAPÍTULO 2 – ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO SOB DIFERENTES SISTEMAS DE USO E MANEJO NA MESORREGIÃO CENTRAL MINEIRA 34

Figura 1 – Localização da área experimental em Curvelo (MG) 39

Figura 2 – Distribuição mensal da precipitação pluviométrica no período de condução do experimento e média do período de 2000 a 2016 em Curvelo (MG) 39

Figura 3 – Representação esquemática das unidades experimentais instaladas em Curvelo (MG)..... 42

Figura 4 – Minitrincheira utilizada para coletas das amostras de solo nas unidades experimentais instaladas em Curvelo (MG) 44

CAPÍTULO 3 – ESTOQUES DE CARBONO E NITROGÊNIO DO SOLO SOB DIFERENTES SISTEMAS DE USO DA TERRA NA MESORREGIÃO CENTRAL MINEIRA 67

Figura 1 – Contribuição em percentagem de diferentes frações físicas da matéria orgânica do solo no teor de COT do solo em Curvelo (MG)..... 84

Figura 2 – Dendrograma resultante da análise hierárquica de agrupamentos mostrando a formação de grupos segundo os atributos: carbono orgânico total, nitrogênio total do solo, relação carbono/nitrogênio, estoque de carbono orgânico total, estoque de nitrogênio total e carbono orgânico total das frações matéria orgânica leve livre, areia e silte+argila da camada de 0 a 30 cm de profundidade em áreas de pastagem em processo de degradação (PAST), monocultivo de capim-marandu (MAR), eucalipto consorciado com milho e capim-marandu (ILPF M) e vegetação nativa de Cerradão (VN) em Curvelo (MG) 89

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2 – ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO SOB DIFERENTES SISTEMAS DE USO E MANEJO NA MESORREGIÃO CENTRAL MINEIRA 34

Tabela 1 – Composição granulométrica e classificação textural do solo (0-30 cm) da área experimental localizada em Curvelo (MG) 40

Tabela 2 – Características químicas do solo (0-30 cm) ocupado com pastagem¹ de *B. decumbens* antes da implantação do experimento em Curvelo (MG) 40

Tabela 3 – Densidade do solo (DS) sob diferentes sistemas de manejo e uso em Curvelo (MG) 48

Tabela 4 – Densidade de partículas (DP) sob diferentes sistemas de manejo e uso em Curvelo (MG) 51

Tabela 5 – Porosidade total (PT) sob diferentes sistemas de manejo e uso em Curvelo (MG) 52

Tabela 6 – Diâmetro médio ponderado (DMP) sob diferentes sistemas de manejo e uso em Curvelo (MG) 55

Tabela 7 – Diâmetro médio geométrico (DMG) sob diferentes sistemas de manejo e uso em Curvelo (MG) 56

Tabela 8 – Índice de estabilidade de agregados (IEA) sob diferentes sistemas de manejo e uso em Curvelo (MG) 57

Tabela 9 - Teores de matéria orgânica do solo (MOS) sob diferentes sistemas de manejo e uso em Curvelo (MG) 59

Tabela 10 – Teores de fósforo (P) sob diferentes sistemas de manejo e uso em Curvelo (MG) 61

Tabela 11 – Valores de pH, soma de bases (SB), CTC efetiva (t), CTC potencial (T) e saturação por bases (V) sob diferentes sistemas de manejo e uso em Curvelo (MG) 63

CAPÍTULO 3 – ESTOQUES DE CARBONO E NITROGÊNIO DO SOLO SOB DIFERENTES SISTEMAS DE USO DA TERRA NA MESORREGIÃO CENTRAL MINEIRA 67

Tabela 1 – Teor de carbono orgânico total (COT), nitrogênio total do solo (NT) e relação carbono/nitrogênio (C/N) sob diferentes sistemas de uso da terra em Curvelo (MG)	77
Tabela 2 – Estoque de carbono orgânico total (EstC) e estoque de nitrogênio total do solo (EstN) sob diferentes sistemas de uso da terra em Curvelo (MG)	81
Tabela 3 – Teor de carbono orgânico (CO) das frações matéria orgânica leve livre (FLL), areia (F-areia), silte+argila (F-silte+argila) e carbono orgânico total (COT) sob diferentes sistemas de uso da terra em Curvelo (MG)	86

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – REFERENCIAL TEÓRICO	16
1.1 INTRODUÇÃO GERAL	16
1.2 REVISÃO DE LITERATURA	18
1.2.1 Integração Lavoura-Pecuária-Floresta.....	18
1.2.2 Qualidade e Atributos Físicos do Solo em Sistemas de Integração ..	21
1.2.3 Qualidade e Atributos Químicos do Solo em Sistemas de Integração	25
1.2.4 Dinâmica da Matéria Orgânica do Solo em Sistemas de Integração	27
1.2.4.1 Estoques de Carbono e Nitrogênio do Solo	29
1.2.4.2 Fracionamento Físico da Matéria Orgânica do Solo	32
CAPÍTULO 2 – ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO SOB DIFERENTES SISTEMAS DE USO E MANEJO NA MESORREGIÃO CENTRAL MINEIRA	34
2.1 INTRODUÇÃO	36
2.2 MATERIAL E MÉTODOS	38
2.2.1 Localização e caracterização da área de estudo	38
2.2.2 Tratamentos	41
2.2.2.1 Implantação das unidades Agrossilvipastoris (ILPF)	42
2.2.2.2 Implantação das unidades pastoris (MAR, JAVA, J+M e PAST)...	43
2.2.3 Amostragem do solo.....	44
2.2.4 Determinação dos atributos químicos e físicos do solo	45
2.2.5 Análise estatística.....	47
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
2.3.1 Atributos físicos do solo	48
2.3.1.1 Densidade do solo (DS), densidade de partículas (DP) e porosidade total do solo (PT)	48

2.3.1.2	Diâmetro médio ponderado (DMP) e geométrico (DMG) e índice de estabilidade de agregados (IEA)	54
2.3.2	Atributos químicos do solo	59
2.4	CONCLUSÕES	66
CAPÍTULO 3 – ESTOQUES DE CARBONO E NITROGÊNIO DO SOLO SOB DIFERENTES SISTEMAS DE USO DA TERRA NA MESORREGIÃO CENTRAL MINEIRA		67
3.1	INTRODUÇÃO	69
3.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	71
3.2.1	Localização e caracterização da área de estudo.....	71
3.2.2	Tratamentos	71
3.2.3	Amostragem e preparo de amostras de solo	72
3.2.4	Determinação dos teores e estoques de carbono orgânico e nitrogênio totais do solo	72
3.2.5	Fracionamento físico da matéria orgânica do solo (FFMOS)	73
3.2.6	Análise estatística.....	74
3.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	76
3.3.1	Teores de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) do solo	76
3.3.2	Estoques de carbono (EstC) e nitrogênio (EstN) do solo	80
3.3.3	Carbono orgânico nas frações físicas da MOS.....	83
3.3.4	Similaridades entre os sistemas de uso do solo	88
3.4	CONCLUSÕES	91
	REFERÊNCIAS.....	92

CAPÍTULO 1 – REFERENCIAL TEÓRICO

1.1 INTRODUÇÃO GERAL

A exploração agrícola, pecuária e florestal tem promovido a redução da qualidade ambiental, afetando a sustentabilidade dos recursos naturais. A expansão das fronteiras agrícolas e a utilização de monocultivos em larga escala, por exemplo, desencadeiam uma série de processos prejudiciais ao solo, aos recursos hídricos e à qualidade do ar. Destaca-se, em relação aos fatores mencionados, a perda da qualidade física, química e biológica dos solos, a contaminação e diminuição das fontes hídricas e a poluição atmosférica por meio da emissão de gases de efeito estufa. Com isso, faz-se necessário a adoção de sistemas que garantam bons níveis de produção aliados ao desenvolvimento econômico, social e à conservação da natureza.

Os sistemas conservacionistas de uso do solo, como a integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) ou sistema agrossilvipastoril, estão incluídos no contexto da produção sustentável, pois vêm demonstrando resultados favoráveis quanto à viabilidade econômica, social e ambiental. A diversificação da produção gerada pelos sistemas integrados promove o sinergismo entre os componentes florestal, pecuário e agrícola. Dessa forma, além da maximização do uso da terra, que diminui a necessidade de criação de novas áreas de produção, os recursos necessários ao desenvolvimento dos diferentes componentes, aplicados ou inerentes aos locais de produção, são melhor aproveitados no sistema produtivo. Além disso, há aumento da biodiversidade local, que desfavorece organismos antagônicos à produção agrícola, pecuária e florestal, como pragas e doenças (CORDEIRO *et al.*, 2015b).

A qualidade física, química e biológica do solo é essencial para o desenvolvimento das diferentes espécies vegetais. A boa estrutura do solo

promove condições ideais de aeração, infiltração, retenção e disponibilização de água às plantas, bem como apresenta resistência aos processos erosivos. Dessa forma, os atributos físicos do solo constituem importantes indicadores de qualidade do solo de diferentes usos e manejos adotados (REICHERT *et al.*, 2003). Já a qualidade química do solo está, entre outros fatores, relacionada à sua acidez e à presença de nutrientes em níveis adequados ao desenvolvimento das plantas, tendo, assim, importante papel nos estudos de qualidade do solo (VEZZANI; MIELNICZUK, 2009).

O carbono orgânico, principal constituinte da matéria orgânica do solo, também constitui importante indicador de qualidade do solo, uma vez que a qualidade física, química e biológica do solo apresenta relação direta com os teores de matéria orgânica. Esse componente contribui, principalmente, com a estruturação do solo, com o desenvolvimento de macro, meso e microrganismos e funciona como fonte de nutrientes às plantas. O aumento dos teores de carbono orgânico no solo contribui, também, com a mitigação das emissões de gases de efeito estufa (LAL, 2015).

Diante disso, o objetivo do presente estudo foi comparar os atributos físicos e químicos, os teores e estoques de carbono e nitrogênio do solo após a conversão de pastagem de baixa produtividade em sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) e cultivo de forrageiras em Curvelo (MG).

1.2 REVISÃO DE LITERATURA

1.2.1 Integração Lavoura-Pecuária-Floresta

A busca pela redução do desmatamento e das emissões de gases de efeito estufa (GEE) contrapõe o constante aumento da necessidade por alimentos, bioenergia e produtos florestais. Com isso, torna-se imprescindível o uso de tecnologias que conciliem o aumento da produção e a manutenção da sustentabilidade ambiental. Como alternativa, tem-se a elevação dos níveis de produtividade agrícola e a intensificação do uso da terra. Nesse contexto, os sistemas de integração lavoura-pecuária ou agropastoril (ILP), lavoura-floresta ou silviagrícolas (ILF), pecuária-floresta ou silvipastoris (IPF) e lavoura-pecuária-floresta ou agrossilvipastoris (ILPF) têm sido apresentados com o intuito de tornar a produção agrícola sustentável, considerando os aspectos sociais, ambientais e econômicos (VILELA *et al.*, 2012). Assim, pode-se dizer que os diferentes sistemas de integração se enquadram dentro da conjuntura da intensificação sustentável.

Segundo Balbino *et al.* (2011b), o sistema agropastoril consiste na integração dos componentes agrícola e pecuário em rotação, consórcio ou sucessão, ocupando a mesma área e mesmo ano agrícola ou por vários anos. O sistema silvipastoril é caracterizado pela integração dos componentes pecuário (pastagem e animal) e florestal, cultivados em consórcio. Na integração silviagrícola o sistema apresenta os elementos florestal e agrícola, nos quais são cultivadas espécies arbóreas com culturas agrícolas, anuais ou perenes. A integração dos componentes agrícola, pecuário e florestal, dispostos em rotação, consórcio ou sucessão em uma mesma área é denominada agrossilvipastoril. Ainda conforme Balbino *et al.* (2011b), o componente agrícola pode compor o sistema apenas no ano inicial

de implantação dos sistemas silviagrícola e agrossilvipartoril ou durante múltiplos anos.

Entende-se por consórcio o cultivo simultâneo de duas ou mais espécies vegetais em uma mesma área. Tem-se a sucessão quando, após a colheita de uma cultura, realiza-se uma nova sementeira, no mesmo ano agrícola. A rotação de culturas é definida pela alternância de espécies vegetais, cultivadas na mesma área e época do ano com o objetivo de diminuir a incidência de pragas e doenças. Apesar da complexidade gerada na integração de diferentes componentes, promove-se o surgimento de efeitos sinérgicos que potencializam os fatores bióticos e abióticos. Com isso, elevam-se os rendimentos dos componentes integrados comparativamente às monoculturas (KLUTHCOUSKI *et al.*, 2015; SALTON *et al.*, 2015).

Conforme Garnett *et al.* (2013), entende-se por intensificação sustentável o aumento da produção de alimentos com reduzida pressão ao meio ambiente e com a manutenção da capacidade de produção futura. Nesse contexto, ressalta-se que o aumento da produção deve ser alcançado pela elevação dos níveis de produtividade, já que a ampliação da área plantada acarreta sérios danos ambientais. De acordo com Lal (2008b), para a intensificação da produção é imprescindível o manejo adequado do solo, que possibilite uma produção satisfatória de biomassa e promova o sequestro de carbono pelo solo, mitigando as concentrações de GEE na atmosfera.

Cordeiro *et al.* (2015b) descrevem os sistemas que integram as atividades agrícolas, pecuárias e/ou florestais como tecnologias sustentáveis de produção para as regiões tropicais, sendo, na atualidade, recursos capazes de viabilizarem uma produção econômica, ambiental e socialmente sustentável, além de otimizar os recursos técnicos que são aplicados nos processos produtivos. Balbino *et al.* (2011a) relatam que a integração de diferentes componentes otimizam os ciclos biológicos das espécies vegetais e animais e promovem maior aproveitamento dos insumos utilizados. Os

benefícios citados por esses autores compreendem a recuperação de pastagens degradadas; melhoria do bem-estar animal, proveniente do conforto térmico gerado pelo componente arbóreo; manutenção e reconstituição da cobertura florestal; utilização de práticas agropecuárias adequadas; e outros benefícios ambientais gerados pelos agroecossistemas, como a conservação do solo e da água, atração de agentes polinizadores, inimigos naturais e predadores (insetos promotores do controle biológico de insetos-praga), mitigação de GEE, entre outros. Alvarenga *et al.* (2010) e Balbino *et al.* (2011b) destacam o potencial dos sistemas integrados de produção na melhoria dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo. Ressaltam, ainda, que tais sistemas promovem aumento na ciclagem e na utilização de nutrientes pelas espécies vegetais empregadas.

Estima-se que apenas cerca de 0,9% das áreas cultivadas no Brasil sejam destinadas a sistemas integrados de produção, o que corresponde a aproximadamente 2 milhões dos 224,9 milhões de hectares em produção no país. Existem, desse total, 67,8 milhões de hectares aptos para a implantação dos diversos arranjos de sistemas integrados (CORDEIRO *et al.*, 2015a). Como a integração entre diferentes componentes resulta em sistemas complexos e dinâmicos, torna-se necessária a realização contínua de pesquisas científicas e tecnológicas com avaliações experimentais de longo prazo, fazendo-se uso de pesquisas regionalizadas, permitindo, dessa forma, inferir sobre a sustentabilidade desses sistemas em variados ambientes de cultivo para que, com isso, a criação de novas áreas seja realizada visando a maximização dos benefícios gerados pela integração (BALBINO *et al.*, 2011a).

1.2.2 Qualidade e Atributos Físicos do Solo em Sistemas de Integração

Segundo Reichert *et al.* (2003) e Bognola *et al.* (2010), para que haja boa qualidade física, o solo deve apresentar condições apropriadas de infiltração, retenção e disponibilização de água às plantas; resistência à desagregação e à conseqüente ocorrência de processos erosivos; e deve permitir a realização de trocas gasosas com a atmosfera e com o sistema radicular dos vegetais. Dessa forma, a qualidade do solo pode ser mensurada a partir dos seus atributos físicos. Esses parâmetros são utilizados como importantes indicadores no levantamento de impactos provenientes de diferentes usos e manejos aplicados ao solo (ARAÚJO *et al.*, 2007; STONE *et al.*, 2015).

Vários atributos físicos têm sido utilizados na determinação da qualidade do solo, como a densidade aparente ou do solo, densidade real ou de partículas, porosidade total, os índices de agregação, etc. (ASSIS *et al.*, 2015; FREITAS *et al.*, 2012; ARAÚJO *et al.*, 2007; CARVALHO *et al.*, 2015; BEUTLER *et al.*, 2016; MELLONI *et al.*, 2008, CRUZ *et al.*, 2014).

Conforme Kiehl (1979) e Brady e Weil (2012), a densidade do solo é a relação entre a massa de uma amostra de solo seco pelo seu volume, composto pelas partículas e poros. Assim, o aumento da densidade corresponde à compactação do solo, que promove a redução da porosidade e conseqüentes prejuízos na dinâmica da água no solo e diminuição das trocas gasosas no sistema solo-planta-atmosfera, entre outros prejuízos. O desenvolvimento do sistema radicular está relacionado à densidade do solo, sendo prejudicado com o aumento desse atributo (REINERT *et al.*, 2008). Nesse sentido, existem valores críticos para algumas classes texturais, sendo, respectivamente, as densidades de 1,30 a 1,40 g cm⁻³, 1,40 a 1,50 g cm⁻³ e 1,70 a 1,80 g cm⁻³ para solos argilosos, franco-argilosos e franco-arenosos (REICHERT *et al.*, 2003).

Assis *et al.* (2015), em estudo sobre atributos físicos do solo em sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta, constataram que a densidade e o arranjo poroso do solo nos diferentes sistemas integrados foram importantes para diferenciá-los da pastagem degradada avaliada, a qual apresentou menor qualidade física do solo comparativamente às áreas em integração. Com isso, mostrou-se que a adoção dos sistemas integrados de produção pode contribuir para a melhoria da qualidade física do solo.

Ao avaliar os atributos físicos e químicos de um Neossolo Quartzarênico sob diferentes sistemas de manejo e uso, Carvalho *et al.* (2015) observaram que os sistemas de integração Lavoura-Pecuária e Lavoura-Pecuária-Floresta não foram capazes de elevar a qualidade do solo para os níveis obtidos pela vegetação nativa adjacente, assim como os demais tratamentos adotados. Observou-se que os valores de densidade obtidos nos sistemas integrados foram superiores aos observados no monocultivo de eucalipto e na pastagem extensiva, exceto na camada superficial (0-5 cm), em que a pastagem extensiva apresentou média semelhante aos sistemas integrados. Porém, segundo os autores, a densidade obtida para esses sistemas não atingiu o valor crítico de $1,75 \text{ g cm}^{-3}$, o qual foi definido por estudos realizados por Corsini e Ferraudo (1999) para solos de textura arenosa.

O menor valor de densidade do solo observado em áreas de vegetação nativa está relacionado, geralmente, aos maiores teores de carbono orgânico total, resultantes do depósito de serapilheira na superfície do solo e à ausência da ação antrópica (JHA *et al.* 2014; SELLE, 2007). Quanto ao aumento da densidade do solo na presença dos componentes agrícola e pecuário, esse decorre, respectivamente, do tráfego de máquinas e do pisoteio animal (CARVALHO *et al.* 2015).

Resultados apontam que os sistemas agrossilvipastoris podem apresentar índices de qualidade do solo superiores a sistemas florestais

nativos, conforme demonstra estudo conduzido em diferentes municípios do estado de Minas Gerais (FREITAS *et al.*, 2012). Esses autores verificaram que os sistemas silvipastoris avaliados a partir de índices de qualidade do solo, mensurados por meio de diferentes atributos químicos e físicos, apresentaram valores superiores a áreas de manejo florestal e ao tratamento utilizado como referência, em que se empregou uma vegetação de Cerrado.

Define-se densidade real ou de partículas como a relação existente entre a massa de solo seco de uma amostra e o volume ocupado pelas partículas sólidas, sendo, portanto, o volume de sólidos da amostra subtraído a porosidade total (EMBRAPA, 1997). A densidade de partículas está relacionada ao material de origem. Assim, as diferentes classes de solo apresentam densidades específicas, resultantes dos minerais que foram formadas. Geralmente, os valores deste atributo se apresentam entre 2,60 e 2,75 g cm⁻³ para o quartzo, feldspato e silicatos coloidais (BRADY; WEIL, 2012). No entanto, na presença de altos teores de material orgânico podem ser encontradas densidades inferiores, com valores abaixo de 1,20 g cm⁻³ (CIPRIANO-SILVA *et al.*, 2014). Dessa forma, a densidade de partículas pode ser utilizada para compor os indicadores de qualidade física do solo, pois apresentam relação com a matéria orgânica do solo e consequente potencial na distinção de ambientes agrícolas e nativos (MELLONI *et al.*, 2008).

Loss *et al.* (2014), estudando os atributos físicos do solo nos sistemas lavoura, pastagem e sistema silvipastoril em Santa Teresa (ES), não constataram diferença na densidade de partículas entre os tratamentos avaliados. Já os atributos densidade do solo, porosidade total e diâmetro médio ponderado mostraram-se mais sensíveis às alterações promovidas pelos cultivos. Neste mesmo trabalho, não foi verificada diferença para o carbono orgânico total entre os tratamentos utilizados, podendo, portanto, ter

influenciado o comportamento observado no parâmetro densidade de partículas.

A porosidade total do solo representa o volume de uma amostra seca não ocupado por sólidos. Assim, juntamente com a densidade do solo, a porosidade total está altamente relacionada com a compactação do solo. Poros superiores a 0,05 mm são classificados como macroporos, os quais são mais sensíveis ao processo de compactação (EMBRAPA, 1997; REICHERT *et al.*, 2007). O volume de poros apresenta correlação negativa com a densidade do solo e possui importante papel nos fluxos de ar e água no sistema solo-planta-atmosfera, entre outras funções relativas ao desenvolvimento das plantas (STONE *et al.*, 2015; BELLOTE; DEDECEK, 2006). Silva *et al.* (2016) observaram que os sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta, com dois anos de implantação em Santa Fé, no estado do Pará, aumentaram a qualidade física do solo, com melhorias na densidade aparente e porosidade, mostrando potencial na recuperação de áreas degradadas. Resultados semelhantes foram observados por Assis *et al.* (2015), em Nova Canaã do Norte (MT), sob Latossolo Vermelho-Amarelo distroférico de textura argilosa, e em Cachoeira Dourada (GO), sob Latossolo Vermelho acriférico de textura argilosa; e por Loss *et al.* (2014) em Santa Teresa (ES), sob Latossolo Vermelho de textura argilosa.

O processo de agregação do solo ocorre a partir da união de partículas primárias, dando origem aos microagregados. A união dos microagregados promove a formação dos macroagregados. Esses processos decorrem da ação de óxidos de ferro e alumínio, através da presença de hifas de fungos e de raízes de plantas (OADES, 1984). As raízes, principalmente de gramíneas, que apresentam expressivo desenvolvimento ao longo do perfil do solo, contribuem para a o processo de agregação por promoverem maior união de partículas primárias e devido à liberação de exudatos ricos em polissacarídeos (SANTOS *et al.* 2007; SALTON *et al.* 2008).

A estabilidade de agregados do solo pode ser estudada a partir de índices como o diâmetro médio ponderado, diâmetro médio geométrico e índice de estabilidade de agregados. Nesse sentido, Loss *et al.* (2014) constataram que o diâmetro médio ponderado dos agregados foi superior em um sistema de integração silvipastoril quando comparado com lavoura em monocultivo, mostrando maior capacidade de agregação no solo sob o sistema pecuária-floresta.

Loss *et al.* (2011) verificaram resultados positivos quanto à agregação do solo em sistema agropastoril. Esses autores constataram que o sistema de plantio direto com produção integrada apresentou valores de diâmetro médio ponderado e geométrico superiores aos observados em área sob sistema de plantio direto sem integração com lavoura pecuária. Estudo realizado por Spera *et al.* (2010), após oito anos de cultivo sob integração lavoura-pecuária em sistema de plantio direto, constatou que não houve degradação física do solo que compromettesse o desenvolvimento das plantas cultivadas na área estudada.

1.2.3 Qualidade e Atributos Químicos do Solo em Sistemas de Integração

Estudos apontam que há uma melhoria da qualidade química do solo após a adoção de sistemas integrados de produção em diferentes regiões e tipos de solo (BEUTLER *et al.*, 2016; BONINI *et al.*, 2016; CARVALHO *et al.*, 2015; MAIA *et al.*, 2006; SANTOS *et al.*, 2011b). De acordo com Costa *et al.* (2015), a maior deposição de resíduos vegetais na camada superficial do solo verificada em sistemas integrados e posterior decomposição, favorecem o acúmulo de nutrientes no sistema, gerando, também, maior atividade biológica no ambiente. Além disso, segundo Santos *et al.* (2001), a integração de espécies com morfologias radiculares distintas, levando à

exploração de diferentes profundidades no perfil do solo, aumenta a eficiência do processo de ciclagem de nutrientes. Outro benefício relativo à qualidade química em sistemas integrados é relatada por Balbinot Junior *et al.* (2009). Conforme esses autores, a inserção de animais no sistema também favorece a ciclagem de nutrientes, já que há disponibilização de elementos na forma mineral por meio de fezes e urina.

Carvalho *et al.* (2015), estudando um Neossolo Quartzarênico no Mato Grosso do Sul, observaram que a integração dos componentes agrícola e pecuário, assim como dos componentes agrícola, pecuário e florestal, proporcionou maiores contribuições na fertilidade do solo quando comparada aos sistemas de plantio homogêneo de eucalipto e pastagem extensiva. Os autores obtiveram aumentos significativos em relação aos teores de nutrientes e redução da acidez e teor de Al trocável sob os sistemas de integração Lavoura-Pecuária e Lavoura-Pecuária-Floresta, corroborando com o potencial que tais sistemas possuem quanto à melhoria da qualidade química do solo.

Segundo Carvalho *et al.* (2015), deve-se observar, contudo, as condições edafoclimáticas, as espécies utilizadas e o solo do local, pois tais variáveis influem significativamente na dinâmica dos nutrientes, sendo encontrados resultados distintos quanto à qualidade do solo sob sistemas integrados. Loss *et al.* (2009) verificaram, ao avaliar os atributos químicos de um Argissolo Vermelho-Amarelo em sistema integrado de produção no Estado do Rio de Janeiro, menores índices de fertilidade do solo no sistema integrado comparativamente aos demais tratamentos estudados, demonstrando a importância da realização de estudos regionalizados e a necessidade de acompanhamento constante com o desenvolvimento de pesquisas, dada a complexidade gerada a partir da integração de diferentes componentes de produção.

1.2.4 Dinâmica da Matéria Orgânica do Solo em Sistemas de Integração

O carbono orgânico (CO) é considerado um importante indicador de qualidade do solo, sendo utilizado na determinação da sustentabilidade de diferentes sistemas agrícolas, principalmente em condições tropicais, e apresenta, também, relevante papel na mitigação das mudanças climáticas. O solo funciona como um grande reservatório ou dreno desse elemento. Contudo, a utilização inadequada e/ou a remoção de formações florestais nativas torna o solo uma grande fonte de carbono em curto espaço de tempo, aumentando as concentrações de GEE na atmosfera (COOK *et al.*, 2014; DENARDIN *et al.*, 2014; USUGA *et al.*, 2010; WAUTERS *et al.*, 2008). Devem-se adotar, portanto, estratégias de manejo mais eficazes na sua conservação, pois a redução dos estoques de CO pode, ao longo do tempo, tornar a exploração agrícola economicamente e ambientalmente insustentável (ASSIS *et al.*, 2010; PINHEIRO, 2007; LAL, 2005; MIELNICZUK, 2008).

Segundo Roscoe e Machado (2002), entende-se por matéria orgânica do solo (MOS) todo o CO presente no solo, que pode ser encontrado em resíduos frescos ou em diferentes estágios de decomposição; na forma de compostos humificados; em materiais carbonizados, como carvão em solos de savana; na porção viva, formada por raízes e pela micro, meso e macrofauna. O CO do solo é encontrado associado ou não a fração mineral. Geralmente a MOS apresenta em torno de 58% de CO (STOCKMANN *et al.*, 2013).

A MOS representa também um importante reservatório de Nitrogênio (N), sendo mais de 95% desse elemento presente no solo na forma orgânica, apresentando-se potencialmente disponível às plantas através do processo de mineralização da MOS. Anualmente, em função do uso e manejo do solo, 2 a 5% do N orgânico são convertidos em N mineral (N-NO₃⁻ e N-NH₄⁺)

(MOREIRA; SIQUEIRA, 2006; D'ANDRÉA *et al.*, 2004). Em decorrência da elevada concentração de N₂ (78%) na atmosfera, elevada parcela desse elemento no solo é proveniente do processo de fixação biológica de N₂ realizado por microrganismos, simbióticos ou não, os quais integram a microbiota do solo (SILVA; MENDONÇA, 2007).

Existem diversos fatores que controlam a dinâmica da MOS. Segundo Souto *et al.* (2005), a taxa de decomposição é fortemente influenciada pela pluviosidade, que é intensificada com o aumento da umidade. Tal fato favorece a atividade microbiana e enzimática, que eleva as taxas de decomposição do material orgânico e consequente liberação de nutrientes. Conforme Silva *et al.* (2008) e Souto *et al.* (2005), faixas de temperatura mais baixas tendem a promover menor decomposição da MOS, pois afetam o crescimento microbiano. De acordo com Caldeira *et al.* (2013), o aporte de biomassa varia conforme o tipo de cobertura vegetal, influenciando os teores de carbono orgânico e de nutrientes dispostos sobre o solo.

A textura do solo, segundo Freitas *et al.* (2013), interfere nos teores de matéria orgânica, tendo os solos de textura argilosa maior capacidade de acumular carbono. Com isso, tendem a apresentar melhores atributos físicos e químicos. Quanto ao manejo, sistemas sem perturbação do solo possibilitam maior acúmulo de carbono, comparativamente aos manejos que promovem revolvimento do solo, que estimulam a degradação da MOS, aumentando a liberação de C na forma de CO₂ (CORAZZA *et al.*, 1999). Segundo Pinheiro (2007) e Calonego *et al.* (2012), a conversão de um ecossistema natural para agricultura promove alterações nas taxas de adição e decomposição da MOS, sendo a decomposição intensificada através da destruição dos macroagregados. Esta desagregação é promovida principalmente pelas práticas de revolvimento do solo. Com isso, expõe-se a MOS, anteriormente protegida no interior dos macroagregados, à oxidação e

ação microbiana, reduzindo seu teor no solo e aumentando as emissões de CO₂.

A manutenção da produtividade do solo ao longo do tempo está relacionada à sua qualidade física e química. Para isso, necessita-se adotar usos e manejos que favoreçam o aumento dos teores de MOS, já que esta apresenta relação direta com a qualidade física e química do solo. Tal fato torna-se essencial, principalmente, em solos com elevado grau de intemperização. Como exemplo, podem-se citar os solos do Cerrado, nos quais entre 75 e 93% da capacidade de troca catiônica (CTC) está associada à MOS, apresentando-se, assim, diretamente relacionada aos índices de agregação. A prática de rotação com forrageiras tropicais é tida como um manejo sustentável, já que essas espécies apresentam sistema radicular abundante e agressivo, que possibilita elevar os teores de C no solo e, como consequência, melhora os atributos físicos, químicos e biológicos onde são cultivadas. Sabe-se também que o componente arbóreo tem apresentado potencial na fixação de carbono, promovendo maior sustentabilidade na exploração agrícola e florestal (CORDEIRO *et al.*, 2015b; CASTRO FILHO *et al.*, 1991; SOUSA; LOBATO, 2004; NAIR *et al.*, 2011).

1.2.4.1 Estoques de Carbono e Nitrogênio do Solo

O solo apresenta importante papel no armazenamento de carbono. Estima-se globalmente que o estoque de carbono do solo presente, em relação ao estoque contido na vegetação, uma proporção superior a 4:1 (EAGLE *et al.*, 2012). Os oceanos, a atmosfera, as formações geológicas que contêm carbono fóssil e mineral e os ecossistemas terrestres, formados pela biota e solo representam os principais compartimentos de carbono presentes na Terra. Cerca de 2500 Pg C estão estocados no solo, 620 Pg C na vegetação, 5000 Pg C em formações geológicas (carvão, petróleo e gás

mineral) e 38000 Pg nos oceanos. A atmosfera é responsável por cerca de 760 Pg C, sendo o solo, comparativamente a esse compartimento, responsável por estocar 3,3 vezes mais carbono (LAL, 2008a). Estimativa de estoque de carbono, em estudo realizado por Fidalgo *et al.* (2007), utilizando-se 1712 perfis de solo na profundidade de 0-30 cm em 12 classes de solo, apontou estoque de 36,59 Pg C nos solos do país.

Quanto ao nitrogênio, segundo Batjes (1996), o estoque global de nitrogênio total no solo varia entre 63 e 67 Pg na camada de 0-30 cm e de 133 a 140 Pg na camada de 0-100 cm de profundidade. Alterações nos estoques de carbono orgânico geralmente promovem modificações nos estoques de nitrogênio do solo, já que esses elementos apresentam dinâmica semelhante e possuem relação direta com os diferentes manejos e usos aplicados ao solo (CARDOSO *et al.*, 2010).

Em trabalho realizado por Tonucci *et al.* (2011), verificou-se que a condução de sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta no bioma Cerrado foi capaz de propiciar sequestro de carbono em virtude da presença de diferentes componentes que aumentam o volume de raízes e fornecem maior produção de biomassa vegetal. Wendling *et al.* (2011) observaram, em trabalho sobre carbono e sob sistema agrossilvipastoril no Cerrado, que a integração dos componentes florestal, pecuário e agrícola foi desfavorável na manutenção da matéria orgânica do solo nos anos iniciais de implantação do sistema, tendo, entretanto, depois de dez anos de cultivo, demonstrado capacidade de recuperação da mesma.

Em estudo realizado em Latossolo Vermelho-Escuro distrófico em Vazante-MG, após adoção de um sistema agrossilvipastoril com eucalipto, Vergutz *et al.* (2010) concluíram que a implantação dos sistemas agrossilvipastoris ocasionou redução nos estoques de carbono orgânico total nas camadas superficiais, sendo necessário um período superior ao estudado para reestabelecimento dos estoques originais representados por

uma vegetação de Cerrado, período esse de 12,56 anos. Tal redução decorre da alteração da deposição de resíduos orgânicos ao solo, perda da proteção física promovida pelos agregados à matéria orgânica do solo e temperatura e umidade ideais para ação da microbiota do solo (SILVA *et al.*, 2008; SOUTO *et al.*, 2005; CALDEIRA *et al.*, 2013; CORAZZA *et al.*, 1999; CALONEGO *et al.*, 2012). Reduções nos estoques de carbono orgânico do solo após a conversão de vegetação nativa para sistemas de integração também foram observadas por Sousa Neto *et al.* (2014) em Latossolo Vermelho distrófico no Mato Grosso do Sul.

Ao avaliar o estoque de carbono de um Latossolo Vermelho distrófico típico em diferentes sistemas de cultivo na região noroeste do Estado de Minas Gerais, Neves *et al.* (2004) constataram que, no terceiro ano de condução de um sistema agrossilvipastoril, houve uma tendência de aumento dos estoques de carbono ao longo dos anos, evidenciando o potencial dos sistemas integrados em recuperar os estoques desse elemento, que são perdidos na conversão de florestas nativas para sistemas de exploração agrícola.

Segundo Macedo (2009), a utilização de sistemas integrados pode proporcionar estoques de carbono orgânico do solo superior aos encontrados em sistemas nativos devido ao emprego de gramíneas tropicais. Tais espécies promovem boa cobertura do solo, produção de palha, estruturação do solo e consequente aumento do carbono. A rotação com leguminosas forrageiras também apresenta importante papel neste processo, contribuindo na estocagem de carbono e nitrogênio no solo. Ao avaliar os estoques de carbono orgânico total e o nitrogênio total em Latossolo Vermelho distroférico após quatro e oito anos de implantação de sistema de integração lavoura-pecuária em Maracaju-MS, Silva *et al.* (2011) verificaram que aos oito anos os estoques de nitrogênio total foram semelhantes aos observado em

vegetação nativa adjacente, com ganhos significativos nos estoques de carbono orgânico total.

Conforme Torres *et al.* (2014), o maior número de espécies arbóreas e/ou arbustivas por unidade de área promove, em sistemas integrados de produção, maior estocagem de carbono e conseqüente mitigação de GEE, contribuindo na promoção de atividades agropecuárias ambientalmente sustentáveis. A produção de serapilheira se insere dentre os fatores que contribuem para os maiores valores de estoque de carbono nessas áreas. Baldotto *et al.* (2015), ao determinar os estoques de carbono orgânico do solo em áreas de mata remanescente, integração agricultura-floresta e monoculturas (agrícola e pastoril) em Minas Gerais, verificaram maiores estoques de carbono nos sistemas florestais, seguidos pelos sistemas agrícola e pastoril.

1.2.4.2 Fracionamento Físico da Matéria Orgânica do Solo

De acordo com Roscoe e Machado (2002), na realização de estudos que têm como objetivo verificar a dinâmica e a disponibilidade dos diferentes compartimentos da MOS, deve-se atentar ao método de fracionamento físico empregado. Assim, os métodos conhecidos podem trazer informações distintas. Contudo, a combinação de diferentes métodos, como o granulométrico (baseado nas diferenças de tamanho das partículas) e o densimétrico (baseado na diferença de densidade das partículas), torna possível avaliar a dinâmica e a disponibilidade dos diferentes compartimentos existentes a partir de um maior volume de informações.

Roscoe e Machado (2002) afirmam que não há um método consensual na realização dos procedimentos de fracionamento físico da MOS. Sabe-se, contudo, que a MOS apresenta diferentes níveis de associação com as partículas minerais do solo, subdividindo-se em frações fortemente

associadas aos minerais ou em frações mais lábeis. A MOS fortemente associada aos minerais é constituída por materiais em elevado estágio de degradação. Por sua vez, a MOS lábil é composta principalmente por materiais em condições iniciais de degradação, sendo mais facilmente decompostos pela microbiota. Com isso, é possível utilizar as diferentes frações, com destaque ao compartimento lábil, para inferir sobre os impactos decorrentes dos diferentes usos e manejos aplicados ao solo (ROSCOE; MACHADO, 2002; CHRISTENSEN, 1992; CARMO *et al.*; 2012; SIGNOR *et al.*, 2014; KUNDE *et al.*, 2016; CONCEIÇÃO *et al.*, 2014).

Segundo Carvalho *et al.* (2010), os sistemas integrados de produção promovem aumento dos teores de carbono no solo. Contudo, esse aumento varia conforme a espécie utilizada, o tipo de solo da área, o clima e o tempo de implantação do sistema. Santos *et al.* (2013) verificaram, em estudo sobre dinâmica da MOS em Argissolo Vermelho submetido a diferentes usos no Rio Grande do Sul, que o sistema agrossilvipastoril utilizado apresentou, na camada superficial, valores de carbono orgânico total e da fração grosseira (fração lábil) da MOS semelhantes aos observados no campo nativo, utilizado como referência, demonstrando potencial na conservação dos recursos naturais, uma vez que as frações lábeis são mais sensíveis às alterações promovidas no solo.

Santos *et al.* (2011a) também observaram resultados semelhantes para o carbono orgânico total e a fração grosseira da MOS entre os sistemas agrossilvipastoril e vegetação nativa. Entretanto, Vergutz *et al.* (2010) constataram que o sistema agrossilvipastoril promoveu reduções, principalmente, nos teores da fração leve-livre da MOS, porém com tendência de recuperação em sistemas com maior tempo de implantação.

CAPÍTULO 2 – ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO SOB DIFERENTES SISTEMAS DE USO E MANEJO NA MESORREGIÃO CENTRAL MINEIRA

Resumo: O objetivo deste estudo foi avaliar os atributos físicos, químicos e os teores e estoques de carbono e nitrogênio de um Latossolo Vermelho distrófico típico após um ano de conversão de pastagem degradada em sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) e cultivo de forrageiras na Mesorregião Central Mineira. Amostras de solo foram coletadas nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-30 cm de profundidade em Curvelo (MG). Os atributos físicos e químicos do solo foram determinados em: áreas de ILPF com cultivo de eucalipto consorciado com milho e capim-marandu (ILPF M), milho e java (ILPF J) e milho, marandu e java (ILPF J+M); áreas com monocultivo de capim-marandu (MAR) e java (JAVA); área consorciada de marandu com java (J+M) e pastagem em processo de degradação (PAST). Os atributos físicos avaliados foram a densidade do solo (DS), a densidade de partículas (DP), a porosidade total (PT), o diâmetro médio geométrico (DMG) e ponderado (DMP) e o índice de estabilidade de agregados (IEA). Os atributos químicos avaliados foram a matéria orgânica do solo (MOS), fósforo (mehlich-1), o pH (acidez ativa), a soma de bases (SB), a capacidade efetiva de troca de cátions (t), a capacidade potencial de troca de cátions (T) e a saturação por bases (V). Para cada variável, foram calculados a média e o intervalo de confiança pelo teste t de Student ($p < 0,05$). Os atributos físicos do solo apresentaram poucas variações entre os diferentes sistemas de uso e manejo avaliados devido ao pouco tempo (um ano) de implantação das áreas. Os valores observados para estes atributos não atingiram níveis que comprometessem a produtividade das culturas. Quanto aos atributos químicos, verificou-se melhoria na qualidade do solo sob sistemas de ILPF, expressa pelo aumento dos teores de MOS e fósforo, da CTC potencial e da saturação por bases. Há, contudo, necessidade de realização de avaliações contínuas durante o desenvolvimento desses sistemas visando o monitoramento da qualidade do solo ao longo tempo após a introdução de sistemas integrados de produção.

Palavras-chave: Qualidade do solo. Integração Lavoura-Pecuária-Floresta. Cerradão.

CHAPTER 2 – PHYSICAL AND CHEMICAL ATTRIBUTES OF SOIL UNDER DIFFERENT SYSTEMS OF USE AND MANAGEMENT IN THE CENTRAL MESOREGION OF MINAS GERAIS

Abstract: This study aimed to evaluate the physical and chemical attributes, and contents and stocks of carbon and nitrogen in a typical dystrophic Red Latosol after one year of conversion of degraded pasture into systems of Integrated Crop-Livestock-Forest (ICLF) and forage cropping in the central mesoregion of the state of Minas Gerais. Soil samples were collected in layers 0-5, 5-10, 10-20 and 20-30 cm deep in the town of Curvelo (MG). Soil physical and chemical attributes were determined in ICLF areas with eucalyptus intercropped with corn and marandu grass (ICLF M), corn and java (ICLF J), and corn, mandaru grass and java (ICLF J + M); areas with monoculture of marandu grass (MAR) and java (JAVA); marandu intercropped with java (J + M), and pasture in degradation process (PAST). The following physical attributes were assessed: soil density (SD) and particle density (PD), total porosity (TP), geometric mean diameter (GMD) and weighted mean diameter (WMD), and aggregate stability index (ASI). The following chemical attributes were assessed: soil organic matter (SOM), phosphorus (mehlich-1), pH (active acidity), sum of bases (SB), effective cation exchange capacity (ECEC) and potential cation exchange capacity (PCEC), and base saturation (BS). For each variable, the mean and the confidence interval were calculated by using Student's t-test ($p < 0.05$). The soil physical attributes presented few variations among the different systems of use and management evaluated due to the short time (one year) of implementation of the areas. The values measured for these attributes did not reach levels that affected crop productivity. As for the chemical attributes, there was improvement in soil quality under ICLF systems expressed by increased contents of SOM, phosphorus, potential cation exchange capacity, and base saturation. Nevertheless, continuous assessments are required during the development of such systems in order to monitor soil quality over time after implementation of integrated production systems.

Key-words: Soil quality. Integrated crop-livestock-forest systems. Cerradão.

2.1 INTRODUÇÃO

A qualidade química, física e biológica do solo desempenha papel fundamental na sustentabilidade ambiental. A degradação química e física dos solos diminui a capacidade produtiva, comprometendo a produção de alimentos e, conseqüentemente, o suprimento das necessidades básicas da sociedade. Modelos agrícolas baseados em cultivos homogêneos de espécies vegetais e em elevada mobilização do solo têm acarretado efeitos prejudiciais na qualidade dos solos, além da perda de biodiversidade da fauna e flora.

Estudos realizados em diferentes condições edafoclimáticas vêm mostrando a importância dos sistemas integrados de produção na recuperação da qualidade do solo, pois a integração dos componentes agrícola, pecuário e florestal favorece o aumento da biodiversidade, proporcionando a geração de efeitos sinérgicos no ambiente. Além disso, maximiza-se o uso do solo reduzindo a necessidade de abertura de novas áreas de produção e inserindo os sistemas integrados no contexto da intensificação sustentável (CORDEIRO *et al.*, 2015b).

Os atributos químicos e físicos têm sido amplamente adotados para realização de inferências relativas à sustentabilidade de diferentes sistemas de uso e manejo, já que tais atributos apresentam potencial na detecção de alterações promovidas na qualidade do solo (STONE *et al.*, 2015; CARVALHO *et al.*, 2015). A qualidade física do solo está associada a condições apropriadas de infiltração, retenção e disponibilização de água às plantas, resistência à desagregação e à sua adequada aeração, enquanto a qualidade química está, entre outros fatores, associada à acidez do solo e aos teores de nutrientes necessários ao desenvolvimento das plantas (BOGNOLA *et al.*, 2010; VEZZANI; MIELNICZUK, 2009).

Diante da complexidade e dinâmica gerada a partir da integração de diferentes componentes, torna-se necessária a realização constante de pesquisas nas mais variadas condições edafoclimáticas de cultivo, tendo em vista, também, os diferentes estágios de desenvolvimento e espécies utilizadas na implantação desses sistemas. Com isso, o objetivo do presente estudo foi comparar os atributos físicos e químicos de um Latossolo Vermelho distrófico típico sob diferentes sistemas de uso e manejo na Mesorregião Central Mineira.

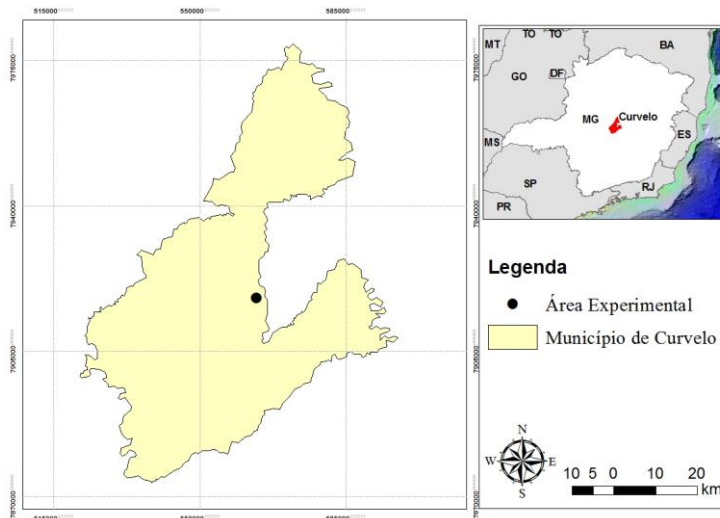
2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Localização e caracterização da área de estudo

O experimento foi realizado no período de dezembro de 2014 a janeiro de 2016 na Fazenda Experimental do Moura (pertencente à Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri – UFVJM), no município de Curvelo (MG) (paralelos 18°44'52,03" de latitude sul e meridianos 44°26'53,56" de longitude oeste), localizado na Mesorregião Central Mineira (FIGURA 1). A altitude da área é de aproximadamente 644 m, com topografia plana e vegetação de Cerrado.

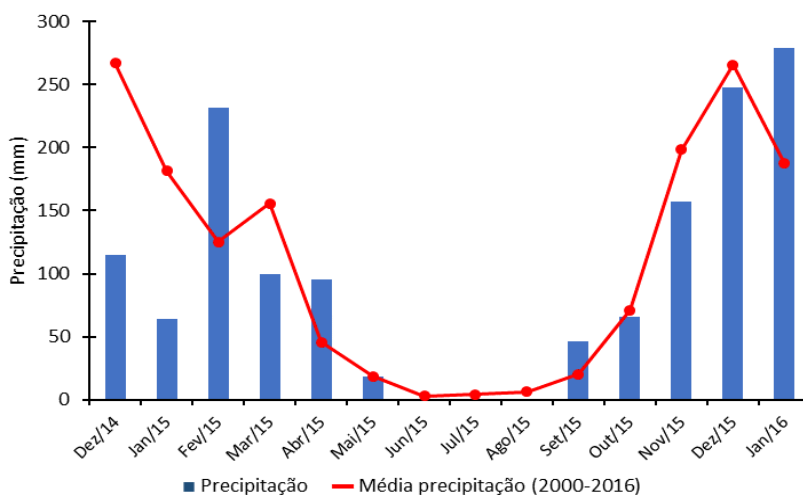
Conforme a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo Aw, o que corresponde ao clima tropical de savana, com chuvas concentradas no verão (outubro a abril) e período seco correspondente ao inverno (maio a setembro) (FIGURA 2). A precipitação média anual do município dos últimos 15 anos foi de 1064 mm, com temperatura média de 22°C (INMET, [2016]).

Figura 1 – Localização da área experimental em Curvelo (MG)



Fonte: Do Autor, 2016.

Figura 2 – Distribuição mensal da precipitação pluviométrica no período de condução do experimento e média do período de 2000 a 2016 em Curvelo (MG)



Fonte: INMET, [2016].

O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico, cuja classificação textural encontra-se descrita na Tabela 1. O solo cultivado com pastagem por duas décadas apresentava valores baixos de pH (acidez ativa média) e valores médios de acidez trocável (Al^{3+}), soma de bases (SB), acidez potencial (H+Al), capacidade efetiva de troca de cátions (t), capacidade potencial de troca de cátions (T), saturação por alumínio (m), saturação por bases (V) e carbono orgânico (CO) (TABELA 2), conforme classificação de Alvarez V. *et al.* (1999).

Tabela 1 – Composição granulométrica e classificação textural do solo (0-30 cm) da área experimental localizada em Curvelo (MG)

Fração granulométrica ⁽¹⁾			Classificação textural ⁽¹⁾
Areia	Silte	Argila	
	g kg ⁻¹		
94,8	249,2	656,0	Argiloso

⁽¹⁾Determinação realizada pelo método do densímetro (EMBRAPA, 1997).

Fonte: Do autor, 2016.

Tabela 2 – Características químicas do solo (0-30 cm) ocupado com pastagem¹ de *B. decumbens* antes da implantação do experimento em Curvelo (MG)

² pH	³ P	K	Ca	Mg	Al	H+AL	⁴ SB	⁵ t	⁶ T	⁷ m	⁸ V	⁹ CO
	mgdm ³	cmolc.dm ³					----- % -----			gkg ⁻¹		
5,32	0,47	0,16	1,54	0,59	0,67	2,88	2,30	2,97	5,18	27,95	41,08	19,62

1 = Pastagem em processo de degradação; 2 = pH em água; 3 = Fósforo Mehlich 1; 4 = Soma de Bases; 5 = Capacidade efetiva de Troca de Cátions; 6 = Saturação por Alumínio; 7 = Capacidade potencial de Troca de Cátions; 8 = saturação por Bases; 9 = Carbono Orgânico. Caracterização química realizada conforme metodologia proposta pela Embrapa (1997).

Fonte: Do autor, 2016.

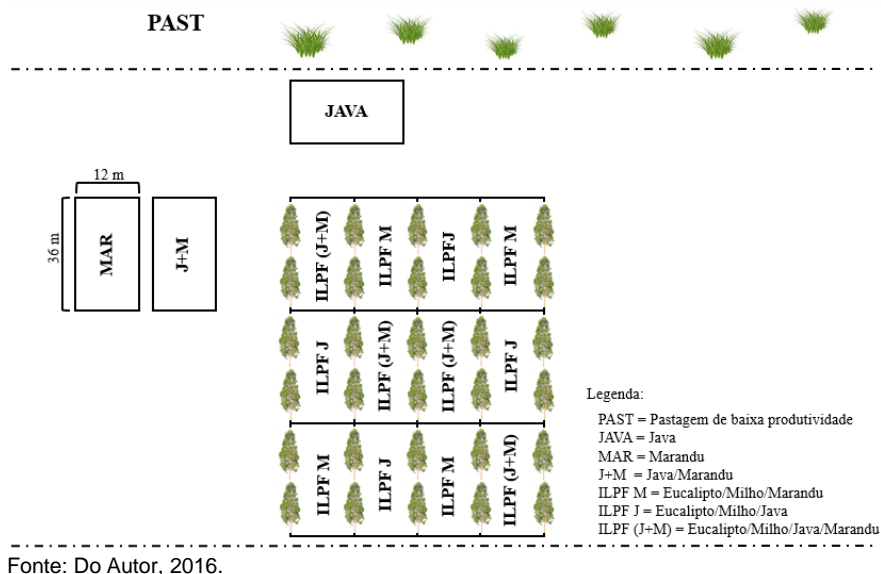
2.2.2 Tratamentos

O experimento foi composto por 7 tratamentos e 4 repetições (FIGURA 3), que consistiram em 4 trincheiras abertas aleatoriamente em cada tratamento, sendo eles:

- Sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta, cultivado com eucalipto consorciado com capim-marandu (ILPF M);
- Sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta, cultivado com eucalipto consorciado com java (ILPF J);
- Sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta, consorciado com marandu e java (ILPF J+M);
- Monocultivo de capim-marandu (MAR);
- Monocultivo de java (JAVA);
- Consórcio de marandu com java (J+M);
- Pastagem em processo de degradação (PAST).

As forrageiras, implantadas em sistema de ILPF, foram consorciadas com milho no primeiro ano de cultivo. As unidades experimentais dos sistemas compreenderam 12 m de largura por 36 m de comprimento, sendo, quando na presença de eucalipto, compostas por duas fileiras simples da espécie arbórea espaçadas por 12 m (FIGURA 3).

Figura 3 – Representação esquemática das unidades experimentais instaladas em Curvelo (MG)



2.2.2.1 Implantação das unidades Agrossilvipastoris (ILPF)

Foi realizada a aplicação de calcário com aproximadamente 90 dias antes da implantação das unidades experimentais, tendo como referência resultados da caracterização química do solo feita previamente. Em seguida, realizou-se o preparo convencional do solo com aração e gradagem.

O plantio do eucalipto foi realizado em dezembro de 2014 em área anteriormente ocupada por pastagem de *Brachiaria decumbens* de baixa produtividade. Utilizou-se o eucalipto Urograndis clone 144 (híbrido de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*). O clone foi fornecido pela empresa Agrocity, localizada em Inimutaba (MG). Na adubação de plantio da espécie arbórea utilizou-se 0,2 kg de fosfato reativo e 0,125 kg de NPK (8-28-16) por cova, cuja dimensão foi de 40x40x40 cm. O adubo foi homogeneizado ao solo proveniente de cada cova anteriormente à realização do plantio das

mudas em campo. O transplântio ocorreu juntamente com a semeadura do milho (híbrido SHS 7920) e das forrageiras estudadas (*Brachiaria brizantha* cv. Marandu) (marandu) e *Macrotyloma axillare* (java)). No plantio do eucalipto foi adotado o espaçamento 12x3 m, sendo reservada uma faixa de 1,5 m entre o milho consorciado com as forrageiras e as mudas. A adubação de cobertura do eucalipto foi realizada após 60 dias do transplântio. Foram utilizados, para tal finalidade, 0,125 kg de cloreto de potássio, 0,05 kg de sulfato de amônio, 0,010 kg de bórax e 0,005 kg de sulfato de zinco por planta.

O plantio do milho foi realizado nas entrelinhas do eucalipto distribuindo-se sete sementes por metro linear, com espaçamento entre linhas de 0,8 m. As sementes das forrageiras foram misturadas à adubação de plantio e semeadas em consórcio com o milho, utilizando 4 kg ha⁻¹ de sementes puras viáveis e espaçamento de 0,4 m entre linhas. Para o consórcio das forrageiras marandu e java, a quantidade de sementes puras viáveis de cada espécie correspondeu a 2 kg ha⁻¹, totalizando 4 kg ha⁻¹. Na adubação de plantio dessas culturas foram utilizados 400 kg ha⁻¹ de NPK (8-28-16). Já para a adubação de cobertura, forneceram-se 100 kg ha⁻¹ de N, cujas fontes corresponderam a 50% de uréia e a 50% de sulfato de amônio.

2.2.2.2 Implantação das unidades pastoris (MAR, JAVA, J+M e PAST)

No plantio das unidades experimentais, compostas pelo capim-marandu e pelo consórcio capim-marandu e java, foram utilizadas as mesmas recomendações de plantio e aplicados os mesmos tratos culturais direcionados às forrageiras nos sistemas agrossilvipastoris. A área de pastagem de baixa produtividade (PAST) foi utilizada por cerca de 20 anos para bovinocultura de leite e corte. A implantação do pasto foi realizada com *Brachiaria decumbens*, não sendo manejada ao longo dos anos,

apresentando, portanto, baixa produtividade, solo exposto e infestação por plantas daninhas.

2.2.3 Amostragem do solo

As amostras de solo foram coletadas em janeiro de 2016. Foram abertas minitrincheiras (repetições) nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-30 cm de profundidade. Os atributos físicos e químicos do solo foram obtidos de acordo com as respectivas camadas em estudo, seguindo metodologia proposta pela Embrapa (1997). A coleta das amostras para determinação da densidade do solo foi realizada por meio de anéis volumétricos acoplados em amostrador de densidade, obtendo-se amostras indeformadas. As minitrincheiras foram distribuídas aleatoriamente nas áreas estudadas, sendo, nos sistemas de ILPF, alocadas entre as linhas de plantio do eucalipto (FIGURA 4).

Figura 4 – Minitrincheira utilizada para coletas das amostras de solo nas unidades experimentais instaladas em Curvelo (MG)



Fonte: Do Autor, 2016.

2.2.4 Determinação dos atributos químicos e físicos do solo

Determinaram-se os atributos químicos matéria orgânica (MOS), pH (acidez ativa), P, K, Ca, Mg, Al (acidez trocável) e o H+Al (acidez potencial) do solo. A MOS foi obtida por oxidação via úmida com dicromato de potássio em meio sulfúrico. O pH foi determinado em água. O P e K foram extraídos pelo Mehlich-1 ($\text{HCl } 0,05 \text{ mol L}^{-1} + \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ } 0,0125 \text{ mol L}^{-1}$). O Ca, Mg e Al trocáveis foram extraídos com $\text{KCL } 1 \text{ mol L}^{-1}$. A acidez potencial foi determinada pelo método do acetato de cálcio. A partir dessas análises, calculou-se a soma de bases ($\text{SB} = \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+$), a capacidade efetiva de troca de cátions ($t = \text{SB} + \text{Al}^{3+}$), a capacidade potencial de troca de cátions ($\text{T} = \text{SB} + \text{H} + \text{Al}$) e a saturação por bases ($\text{V} = 100 \times \text{SB}/\text{T}$).

Para avaliação dos atributos físicos, obteve-se a granulometria, pelo método do densímetro; a densidade do solo (DS), utilizando-se o método do anel volumétrico; a densidade de partículas (DP), por meio do método do balão volumétrico; a porosidade total (PT), pela relação da DP e DS; e a estabilidade de agregados (por via úmida), sendo, a partir de então, calculados o diâmetro médio geométrico (DMG), o diâmetro médio ponderado (DMP) e o índice de estabilidade de agregados (IEA), com adaptações extraídas de Kemper e Chepil (1965).

Para determinação da estabilidade dos agregados, amostras de solo foram coletadas e armazenadas em recipientes plásticos, evitando que fossem destorroadas. Após a coleta, as amostras foram secas ao ar e destorroadas cuidadosamente. Posteriormente, as mesmas foram passadas em peneira com malha de 4 mm sobre peneira de 2 mm. O material retido na peneira de malha inferior foi homogeneizado, sendo uma fração de 50 g destinada ao peneiramento úmido e outra à determinação da massa seca. Para obtenção da massa seca, as amostras foram colocadas em latas de alumínio com peso previamente determinado e levadas à estufa a 105°C até

apresentarem peso constante. Para realização do peneiramento úmido, as amostras foram inseridas em funil de papel filtro e armazenadas em recipientes contendo lâmina d'água suficiente para umedecimento via capilaridade, ficando em repouso por 16 horas. Após esse período, as amostras foram transferidas para a parte superior de um conjunto de peneiras, acopladas uma sobre a outra, em um aparelho de oscilação vertical, com os tamis na ordem de 2 mm, 1 mm, 0,50 mm e 0,25 mm de malha. O volume de água do aparelho de oscilação vertical foi nivelado para que as amostras contidas nas peneiras de 2 mm ficassem imersas quando se encontrassem na posição mais elevada do curso de oscilação. Em seguida, ligou-se o aparelho com amplitude de 4 cm de altura e frequência de 42 oscilações por minuto, por um período de 15 min. Ao final da agitação, as frações das amostras de solo retidas em cada peneira foram transferidas, com auxílio de jatos d'água, para latas de alumínio identificadas e de peso conhecido, eliminando-se o excesso de água. Posteriormente, as frações foram levadas à estufa a 105°C até atingirem peso constante.

Com os pesos obtidos das frações provenientes do peneiramento úmido foram determinados o DMG, DMP e o IEA, conforme as seguintes expressões, propostas por Moraes *et al.*, 2001:

$$\text{DMG} = \exp\left\{\frac{(\sum(\ln[X_i] \cdot [P_i]))}{\sum(P_i)}\right\}$$

Onde:

DMG = Diâmetro médio geométrico (mm);

X_i = diâmetro médio de cada fração retida na peneira;

P_i = peso (g) da fração determinada;

$$\text{DMP} = \sum X_i \cdot f_i$$

Onde:

DMP = Diâmetro médio ponderado (mm);

X_i = diâmetro médio de cada fração retida na peneira;

f_i = fração da amostra total retida em cada peneira e;

$$\text{IEA}\% = \{(P \text{ dos agregados} - \text{fração} < 0,25\text{mm} / PT \text{ da amostra}) \cdot 100$$

Onde:

IEA = Índice de estabilidade de agregados (%).

2.2.5 Análise estatística

Os dados obtidos foram submetidos ao teste t de Student a 5% de probabilidade, determinando-se os intervalos de confiança para comparação das médias entre os tratamentos utilizados. Para realização das análises empregou-se o programa Microsoft Excel 2013.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1 Atributos físicos do solo

2.3.1.1 Densidade do solo (DS), densidade de partículas (DP) e porosidade total do solo (PT)

Foram observadas alterações na densidade do solo (DS), tendo os sistemas PAST e ILPF M (TABELA 3) na camada de 0-5 cm de profundidade, apresentado valores superiores aos observados sob cultivo de JAVA. Os demais tratamentos foram semelhantes entre si e não apresentaram diferença na DS comparativamente aos sistemas JAVA, PAST e ILPF M. Nas profundidades de 5-10 e 10-20 cm constataram-se médias superiores no sistema PAST em relação ao J+M. Esses sistemas não diferiram dos demais tratamentos avaliados. Não foi observada variação entre as médias na camada de 20-30 cm de profundidade.

Tabela 3 – Densidade do solo (DS) sob diferentes sistemas de manejo e uso em Curvelo (MG)

Sistema	Profundidade (cm)			
	0-5	5-10	10-20	20-30
	DS (g cm ⁻³)			
1ILPF M	1,12±0,05 ^a	1,18±0,09 ab	1,26±0,07 ab	1,18±0,14
ILPF J	1,15±0,20 ab	1,20±0,25 ab	1,23±0,12 ab	1,25±0,16
ILPF (J+M)	1,14±0,15 ab	1,19±0,19 ab	1,23±0,10 ab	1,19±0,12
MAR	1,02±0,21 ab	1,10±0,18 ab	1,17±0,15 ab	1,20±0,05
JAVA	0,98±0,06 b	1,08±0,15 ab	1,16±0,14 ab	1,18±0,08
J+M	1,06±0,12 ab	1,13±0,05 b	1,16±0,04 b	1,19±0,09
PAST	1,20±0,07 a	1,23±0,03 a	1,26±0,02 a	1,21±0,08

¹Sistemas: ILPF M = Eucalipto consorciado com milho e capim-marandu; ILPF J = Eucalipto consorciado com milho e java; ILPF (J+M) = Eucalipto consorciado com milho, capim-marandu e java; MAR = monocultivo de capim-marandu; JAVA = monocultivo de java; J+M = consórcio de marandu com java; PAST = Pastagem em processo de degradação. Médias seguidas pela mesma letra e médias sem letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste t de Student ao nível de 5% de probabilidade. *Intervalo de confiança.

Fonte: Do autor, 2016.

Segundo Reinert *et al.* (2008), o aumento da DS promove a compactação do solo, que acarreta redução da porosidade, desequilíbrios na dinâmica da água no solo e diminuição das trocas gasosas no sistema solo-planta-atmosfera, entre outros prejuízos. Porém, os diferentes sistemas avaliados apresentaram valores de DS inferiores aos estabelecidos como críticos por Reichert *et al.* (2003) para solos argilosos, que variam de 1,30 a 1,40 g cm⁻³.

O aumento da DS decorre, geralmente, do tráfego de máquinas e do pisoteio animal (CARVALHO *et al.*, 2015). Tal fato está de acordo com os resultados observados no PAST, sistema no qual foram verificados aumentos nos valores desse atributo em virtude da presença de animais. Além disso, constatou-se no PAST diminuição visual da produção de biomassa vegetal associada à ausência de manejo do sistema, contribuindo para um possível aumento da DS. Já o aumento da DS apresentado nos sistemas ILPF, sendo o ILPF M estatisticamente superior ao JAVA, foi favorecido pelo trânsito de maquinários agrícolas para plantio e demais tratos culturais destinados ao cultivo de milho no primeiro ano de implantação dos sistemas integrados.

Menores valores de DS observados no sistema JAVA (0-5 cm) e J+M (5-10 e 10-20 cm) podem ser explicados por um aumento na atividade biológica, geralmente proporcionado pelo cultivo de espécies leguminosas, como a java, associado ao expressivo desenvolvimento radicular de gramíneas, como o capim-marandu, fatores que contribuem com a melhoria da estruturação e capacidade de resiliência do solo (ASSIS *et al.*, 2015). Além disso, nos sistemas JAVA e J+M não houve plantio de milho, diminuindo os tratos culturais e, conseqüentemente, os impactos sobre o solo, que contribuem com o aumento da DS.

Ao avaliar os atributos físicos de um Neossolo Quartzarênico sob diferentes sistemas de manejo e uso em Rio Pardo (MS), Carvalho *et al.* (2015) observaram que os sistemas de integração Lavoura-Pecuária e

Lavoura-Pecuária-Floresta estudados, respectivamente com cerca de 7 e 5 anos de implantação, apresentaram valores de DS superiores aos observados no monocultivo de eucalipto (6 anos) e na pastagem extensiva (26 anos), exceto na camada superficial (0-5 cm), em que a pastagem extensiva apresentou média semelhante aos sistemas integrados. Porém, segundo os autores, a densidade obtida para esses sistemas não atingiu o valor crítico de $1,75 \text{ g cm}^{-3}$, apresentado por Corsini e Ferraudó (1999) para textura arenosa.

Assis *et al.* (2015), estudando atributos físicos do solo em sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta em Nova Canaã do Norte (MT) e em Cachoeira Dourada (GO), observaram redução da DS nos sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta comparativamente à pastagem degradada em Latossolo Vermelho-Amarelo distroférico e Latossolo Vermelho acriférico, ambos de textura argilosa. Esse trabalho demonstrou que os sistemas de integração podem contribuir para melhoria da qualidade física do solo, representada pela DS, principalmente quando comparados a sistemas degradados.

Apesar da não diferenciação dos valores de DS entre os sistemas ILPF e PAST, estudados no presente trabalho, não foi constatada restrição ao desenvolvimento das espécies utilizadas em virtude dos valores obtidos. Além disso, o pasto utilizado no presente trabalho ainda se encontra em processo de degradação, possivelmente ocasionado por perda de fertilidade e manejo de pastejo realizado incorretamente, sendo passível de correção com realização de fertilização, adequação do pastejo, entre outras práticas. De acordo com Ferreira *et al.* (2010), a utilização do pastejo extensivo aliado à ausência de tempo de regeneração das forrageiras pós-pastejo cessa gradativamente a capacidade de produção do pasto, levando à redução do desenvolvimento da parte aérea e radicular. Esse processo promove desequilíbrios na ciclagem de nutrientes e na adição de matéria orgânica ao

solo. Com o pastejo incorreto aliado à ausência de fertilização do componente forrageiro, tem-se a degradação do sistema expressa inicialmente pela redução da produção de biomassa vegetal e da capacidade regenerativa das espécies vegetais de interesse econômico, que poderá resultar na degradação física do sistema.

A densidade de partículas (DP) não variou entre os sistemas nas profundidades avaliadas (TABELA 4). Resultados semelhantes foram obtidos por Loss *et al.* (2014) ao avaliarem os atributos físicos do solo em sistemas de consórcio e sucessão de lavoura, pastagem e silvipastoril localizados no município de Santa Teresa (ES) em Latossolo Vermelho de textura argilosa. Meloni *et al.* (2008), avaliando a qualidade de solos sob diferentes coberturas florestais e de pastagem no sul de Minas Gerais, verificaram menor DP apenas no tratamento referência, classificado como Mata Atlântica sem interferência antrópica. Beutler *et al.* (2001) associam os menores valores de DP em função de maiores teores de matéria orgânica, tendo em vista a presença de poros nas estruturas das partículas orgânicas que reduzem a densidade destes compostos.

Tabela 4 – Densidade de partículas (DP) sob diferentes sistemas de manejo e uso em Curvelo (MG)

Sistema	Profundidade (cm)			
	0-5	5-10	10-20	20-30
	DP (g cm ⁻³)			
¹ ILPF M	2,37 ± 0,12*	2,42 ± 0,24	2,36 ± 0,03	2,48 ± 0,30
ILPF J	2,32 ± 0,07	2,30 ± 0,11	2,35 ± 0,08	2,41 ± 0,24
ILPF (J+M)	2,31 ± 0,07	2,34 ± 0,09	2,45 ± 0,20	2,37 ± 0,10
MAR	2,47 ± 0,15	2,42 ± 0,15	2,49 ± 0,16	2,45 ± 0,15
JAVA	2,46 ± 0,11	2,49 ± 0,21	2,47 ± 0,20	2,46 ± 0,08
J+M	2,42 ± 0,30	2,42 ± 0,19	2,40 ± 0,11	2,42 ± 0,12
PAST	2,38 ± 0,20	2,45 ± 0,12	2,41 ± 0,15	2,41 ± 0,12

¹Sistemas: ILPF M = Eucalipto consorciado com milho e capim-marandu; ILPF J = Eucalipto consorciado com milho e java; ILPF (J+M) = Eucalipto consorciado com milho, capim-marandu e java; MAR = monocultivo de capim-marandu; JAVA = monocultivo de java; J+M = consórcio de marandu com java; PAST = Pastagem em processo de degradação. Médias sem letras, na coluna, não diferem entre si pelo teste t de Student ao nível de 5% de probabilidade. *Intervalo de confiança.

Fonte: Do autor, 2016.

A densidade de partículas, segundo Brady e Weil (2012), está relacionada ao material de origem, tendo as diferentes classes de solo densidades específicas, encontrando-se valores entre 2,60 e 2,75 g cm⁻³ para o quartzo, feldspato e silicatos coloidais. Entretanto, de acordo com Cipriano-Silva *et al.* (2014), elevados teores de material orgânico podem resultar em densidades reais inferiores a 1,20 g cm⁻³. Porém, Bicalho (2011) define a DP como um atributo estático, necessitando-se de um longo período de tempo para detecção de possíveis variações nos valores deste atributo em função de alterações de manejo e uso do solo, corroborando com os resultados obtidos no presente estudo.

O sistema JAVA apresentou maior porosidade total (PT) comparativamente aos sistemas ILPF (J+M) e ILPF M na camada superficial (0-5 cm) (TABELA 5). Não foram encontradas diferenças nas demais profundidades estudadas.

Tabela 5 – Porosidade total (PT) sob diferentes sistemas de manejo e uso em Curvelo (MG)

Sistema	Profundidade (cm)			
	0-5	5-10	10-20	20-30
	PT (%)			
¹ ILPF M	52,63±0,92 ^b	51,20±7,85	46,77±2,95	52,29±9,45
ILPF J	50,53±8,95 ^{ab}	47,62±12,63	47,64±5,71	48,19±7,33
ILPF (J+M)	50,76±5,24 ^b	49,04±7,45	49,68±3,93	49,83±5,14
MAR	58,68±7,83 ^{ab}	54,63±8,06	52,90±8,25	51,08±4,04
JAVA	60,19±3,88 ^a	56,46±7,83	52,85±6,76	52,31±1,72
J+M	56,00±9,91 ^{ab}	53,09±5,50	51,55±2,07	50,91±4,20
PAST	49,38±7,28 ^{ab}	49,53±2,16	47,62±3,31	49,77±5,33

¹Sistemas: ILPF M = Eucalipto consorciado com milho e capim-marandu; ILPF J = Eucalipto consorciado com milho e java; ILPF (J+M) = Eucalipto consorciado com milho, capim-marandu e java; MAR = monocultivo de capim-marandu; JAVA = monocultivo de java; J+M = consórcio de marandu com java; PAST = Pastagem em processo de degradação. Médias seguidas pela mesma letra e médias sem letras, na coluna, não diferem entre si pelo teste t de Student ao nível de 5% de probabilidade. *Intervalo de confiança.

Fonte: Do autor, 2016.

Juntamente com a densidade, a porosidade total está diretamente relacionada à compactação do solo, sendo a densidade e a porosidade,

respectivamente, inversamente e diretamente proporcionais à compactação. Assim, o volume total de poros apresenta correlação negativa com a densidade. Verifica-se, assim como a densidade, que a porosidade do solo exerce importante papel no desenvolvimento das plantas. Dessa forma, a partir da redução dos valores desse atributo, podem ser ocasionados impactos negativos no desenvolvimento radicular das culturas, na drenagem e retenção de água, na difusão de oxigênio, entre outros processos. A porosidade total subdivide-se em microporos e macroporos. Os macroporos apresentam maior sensibilidade ao processo de compactação. Diferentes estudos demonstram valor crítico de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para os macroporos, constatando-se que valores inferiores limitam ou restringem o desenvolvimento da maioria das espécies de interesse econômico (STONE *et al.*, 2015; BELLOTE; DEDECEK, 2006; REICHERT *et al.*, 2007).

O maior valor de PT observado no sistema JAVA (0-5 cm), em relação ao sistema ILPF M, decorreu possivelmente em função do menor valor de densidade obtido sob cultivo da leguminosa. Em relação ao ILPF (J+M), o menor valor de PT, comparativamente ao sistema JAVA, provavelmente foi influenciado pelo cultivo de milho no primeiro ano do sistema. A redução do volume total de poros, geralmente, inicia-se com a redução do volume dos poros de aeração, acarretando o aumento da microporosidade. De acordo com Carvalho *et al.* (2015), o aumento do volume de microporos, em virtude da redução da macroporosidade, desde que os poros de aeração sejam mantidos acima dos níveis críticos, pode contribuir para melhoria da capacidade de retenção de água no solo, favorecendo o desenvolvimento das plantas (CARVALHO *et al.*, 2015). Dessa forma, os resultados referentes à PT apresentados pelos sistemas ILPF no presente estudo, aliados à DS, não foram suficientes para indicar redução de qualidade física do solo.

Silva *et al.* (2016) observaram que sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta, com apenas dois anos de implantação, cultivados em

Latossolo Amarelo de textura argilosa, no município de Santa Fé (PA), aumentaram a qualidade física do solo, com melhorias na densidade e porosidade. Resultados semelhantes foram observados por Assis *et al.* (2015) em Nova Canaã do Norte (MT) sob Latossolo Vermelho-Amarelo distroférrico e em Cachoeira Dourada (GO) sob Latossolo Vermelho acriférrico, ambos de textura argilosa. Tais estudos também estão de acordo com trabalho realizado por Loss *et al.* (2014) em Santa Teresa (ES) sob Latossolo Vermelho de textura argilosa.

Conforme Assis *et al.* (2015) e Corsini e Ferraudo (1999), as práticas de subsolagem como aração e gradagem, realizadas anteriormente à implantação dos sistemas agrícolas visando o estabelecimento de condições físicas adequadas ao cultivo de diferentes espécies, e a adição de material orgânico ao solo promovem aumento da porosidade e redução da densidade, enquanto o tráfego de máquinas e o pisoteio animal sem planejamento causam efeito contrário, reduzindo a qualidade física do solo. Segundo Reichert *et al.* (2007), os organismos presentes no solo, como os besouros e as minhocas, assim como a utilização de espécies vegetais com sistema radicular agressivo, promovem a formação de poros biológicos que contribuem com a recuperação e manutenção da estrutura de solos. Tais benefícios podem ser obtidos com o aumento da biodiversidade proporcionada pela integração de diferentes componentes de produção, necessitando, possivelmente, de maior período de acompanhamento destes sistemas para detecção de variações significativas.

2.3.1.2 Diâmetro médio ponderado (DMP) e geométrico (DMG) e índice de estabilidade de agregados (IEA)

Foram observadas diferenças entre os valores de diâmetro médio ponderado (DMP) apenas na profundidade de 5-10 cm, tendo o PAST

apresentado maior DMP em relação ao ILPF J (TABELA 6). O longo período sem revolvimento do solo (aproximadamente 20 anos) pode ter contribuído na obtenção de maior valor de DMP no PAST (5-10 cm), comparativamente ao ILPF J, no qual houve aração e gradagem no pré-plantio das culturas, corroborando com resultados obtidos por Loss *et al.* (2014). De acordo com Portugal *et al.* (2010), a mobilização do solo é o principal fator responsável pelo seu processo de desagregação.

Tabela 6 – Diâmetro médio ponderado (DMP) sob diferentes sistemas de manejo e uso em Curvelo (MG)

Sistema	Profundidade (cm)			
	0-5	5-10	10-20	20-30
	DMP (mm)			
¹ ILPF M	1,96 ± 0,25*	2,02 ± 0,39 ab	2,38 ± 0,42	2,45 ± 0,34
ILPF J	2,23 ± 0,17	2,12 ± 0,21 b	2,44 ± 0,32	2,52 ± 0,33
ILPF (J+M)	2,05 ± 0,13	2,11 ± 0,54 ab	2,32 ± 0,35	2,40 ± 0,28
MAR	2,37 ± 0,44	2,28 ± 0,23 ab	2,39 ± 0,41	2,53 ± 0,29
JAVA	2,14 ± 0,46	2,17 ± 0,30 ab	2,51 ± 0,17	2,62 ± 0,20
J+M	2,25 ± 0,23	2,27 ± 0,38 ab	2,45 ± 0,18	2,57 ± 0,07
PAST	2,27 ± 0,47	2,60 ± 0,20 a	2,66 ± 0,18	2,58 ± 0,08

¹Sistemas: ILPF M = Eucalipto consorciado com milho e capim-marandu; ILPF J = Eucalipto consorciado com milho e java; ILPF (J+M) = Eucalipto consorciado com milho, capim-marandu e java; MAR = monocultivo de capim-marandu; JAVA = monocultivo de java; J+M = consórcio de marandu com java; PAST = Pastagem em processo de degradação. Médias seguidas pela mesma letra e médias sem letras, na coluna, não diferem entre si pelo teste t de Student ao nível de 5% de probabilidade. *Intervalo de confiança.

Fonte: Do autor, 2016.

Os demais sistemas, excetuando-se o JAVA, possivelmente foram favorecidos pela ação das raízes da gramínea estudada (capim-marandu). E espécie caracterizada por apresentar expressivo desenvolvimento radicular ao longo do perfil do solo, contribuindo com o processo de agregação em virtude da maior união de partículas primárias e devido à liberação de exsudatos ricos em polissacarídeos (SANTOS *et al.* 2007; SALTON *et al.* 2008).

Os padrões de resposta do diâmetro médio geométrico (DMG) foram similares aos observados para o DMP (TABELA 7). Houve diferença entre os valores apenas na camada de 5-10 cm de profundidade, tendo o PAST apresentado maior DMG comparativamente ao ILPF J e ILPF M.

Tabela 7 – Diâmetro médio geométrico (DMG) sob diferentes sistemas de manejo e uso em Curvelo (MG)

Sistema	Profundidade (cm)			
	0-5	5-10	10-20	20-30
	DMG (mm)			
¹ ILPF M	1,36 ± 0,26*	1,47 ± 0,40 b	1,96 ± 0,59	2,05 ± 0,49
ILPF J	1,70 ± 0,21	1,57 ± 0,31 b	2,04 ± 0,44	2,16 ± 0,50
ILPF (J+M)	1,46 ± 0,15	1,58 ± 0,60 ab	1,84 ± 0,45	1,95 ± 0,41
MAR	1,89 ± 0,62	1,81 ± 0,29 ab	1,96 ± 0,53	2,14 ± 0,42
JAVA	1,58 ± 0,55	1,63 ± 0,39 ab	2,13 ± 0,26	2,30 ± 0,32
J+M	1,70 ± 0,32	1,78 ± 0,45 ab	2,09 ± 0,33	2,26 ± 0,15
PAST	1,75 ± 0,60	2,24 ± 0,34 a	2,36 ± 0,34	2,24 ± 0,11

¹Sistemas: ILPF M = Eucalipto consorciado com milho e capim-marandu; ILPF J = Eucalipto consorciado com milho e java; ILPF (J+M) = Eucalipto consorciado com milho, capim-marandu e java; MAR = monocultivo de capim-marandu; JAVA = monocultivo de java; J+M = consórcio de marandu com java; PAST = Pastagem em processo de degradação. Médias seguidas pela mesma letra e médias sem letras, na coluna, não diferem entre si pelo teste t de Student ao nível de 5% de probabilidade. *Intervalo de confiança.

Fonte: Do autor, 2016.

Em estudo realizado no bioma Cerrado em Latossolo Vermelho de textura argilosa, Beutler *et al.* (2016) observaram, ao avaliar os atributos edáficos de um sistema de integração lavoura-pecuária (13 anos de implantação), valor de DMG no sistema integrado inferior ao obtido no pasto em monocultivo (15 anos de implantação). Contudo, outros trabalhos têm mostrado resultados favoráveis quanto à estabilidade física do solo sob sistemas de produção integrada. Loss *et al.* (2011), por exemplo, verificaram resultados positivos quanto à agregação do solo em sistema agropastoril em Montividiu (GO), em área implantada sobre Latossolo Vermelho Distrófico típico textura argilosa. Os autores constataram no tratamento com produção integrada, sob sistema de plantio direto, valores de DMP e DMG superiores

aos observados em área sob sistema de plantio direto sem integração com lavoura-pecuária, ambos com 17 anos de implantação. Loss *et al.* (2014) constataram, em um sistema de integração silvipastoril, DMP dos agregados superior ao tratamento com lavoura em monocultivo.

O índice de estabilidade de agregados (IEA) não apresentou variação entre os sistemas nas profundidades avaliadas (TABELA 8), demonstrando menor sensibilidade às alterações de uso e manejo comparativamente aos atributos DS, PT, DMP e DMG. De acordo com Silva *et al.* (2014) e Vezzani e Mielniczuk (2011), a granulometria do solo está diretamente relacionada aos processos de estabilidade e agregação, ocorrendo aumento da agregação em solos com maiores teores de argila, já que há maior aproximação entre as partículas do solo. Dessa forma, justificam-se os elevados valores de IEA observados no presente estudo, uma vez que a textura do solo, na camada de 0-30 cm de profundidade, foi de 656,0 g kg⁻¹ de argila, 249,2 g kg⁻¹ de silte e 94,8 g kg⁻¹ de areia, sendo classificado como argiloso.

Tabela 8 – Índice de estabilidade de agregados (IEA) sob diferentes sistemas de manejo e uso em Curvelo (MG)

Sistema	Profundidade (cm)			
	0-5	5-10	10-20	20-30
	IEA (%)			
¹ ILPF M	89,12 ± 3,38*	91,31 ± 2,49	94,98 ± 3,01	95,82 ± 2,00
ILPF J	92,41 ± 2,59	91,62 ± 4,59	95,59 ± 2,55	96,29 ± 2,19
ILPF (J+M)	90,70 ± 2,30	91,29 ± 6,53	93,95 ± 1,70	94,50 ± 2,63
MAR	93,17 ± 4,99	94,63 ± 2,95	95,17 ± 1,86	95,79 ± 2,02
JAVA	90,46 ± 6,21	92,14 ± 3,92	96,63 ± 2,78	96,89 ± 2,11
J+M	92,14 ± 2,56	93,81 ± 2,87	96,67 ± 3,35	97,48 ± 2,61
PAST	92,27 ± 4,10	95,95 ± 3,15	97,13 ± 3,66	96,94 ± 1,39

¹Sistemas: ILPF M = Eucalipto consorciado com milho e capim-marandu; ILPF J = Eucalipto consorciado com milho e java; ILPF (J+M) = Eucalipto consorciado com milho, capim-marandu e java; MAR = monocultivo de capim-marandu; JAVA = monocultivo de java; J+M = consórcio de marandu com java; PAST = Pastagem em processo de degradação. Médias sem letras, na coluna, não diferem entre si pelo teste t de Student ao nível de 5% de probabilidade. *Intervalo de confiança.

Fonte: Do autor, 2016.

Segundo Pignataro Neto *et al.* (2009), efeitos prejudiciais na agregação podem ser observados devido ao pisoteio animal, à baixa cobertura vegetal e à diminuição dos teores de matéria orgânica do solo, processos responsáveis pela redução do IEA. No entanto, mesmo na área sob pisoteio animal e redução da produção de biomassa vegetal (PAST), ainda não foi possível observar redução significativa do IEA. Tal fato baseia-se no elevado período sem revolvimento do solo e no alto teor de argila das áreas estudadas.

O IEA encontra-se diretamente relacionado ao DMP e DMG. Em estudo realizado por Silva *et al.* (2006), ao avaliar as propriedades físicas em Argissolo Vermelho sob sistemas de uso e manejo no município de Eldorado do Sul (RS), demonstrou-se elevada correlação positiva e significativa entre o IEA e o DMP, obtido em peneiramento úmido. Verificou-se, também, correlação positiva e significativa entre IEA e PT e correlação negativa e significativa entre o IEA e DS. Portanto, apesar dos valores de IEA não terem apresentado diferenças significativas entre os sistemas estudados, tal atributo geralmente é alterado pelos mesmos fatores que promovem modificações nos atributos DS, PT, DMP e DMG.

O período de condução dos diferentes sistemas de manejo e uso do solo é determinante nas alterações promovidas nos atributos físicos, químicos e biológicos do solo (LAL, 2015). Diante dos resultados benéficos observados, em diferentes trabalhos envolvendo sistemas de produção integrada, e devido às poucas alterações nos atributos físicos observadas no presente estudo, verifica-se a necessidade de acompanhamento das áreas estudadas para validação e detecção de possíveis alterações nos processos abordados, gerando dados suficientes para comprovação e definição de sistemas ambientalmente sustentáveis para as condições edafoclimáticas locais.

2.3.2 Atributos químicos do solo

Os sistemas de ILPF apresentaram, de modo geral, melhoria nos teores de matéria orgânica do solo (MOS) (TABELA 9). Na profundidade de 0-5 cm, os teores de MOS nos sistemas de ILPF foram, conforme classes de interpretação apresentadas por Alvarez V. *et al.* (1999) para solos de Minas Gerais, classificados como bons (4,01 a 7,00 dag kg⁻¹). Nessa mesma camada, os demais sistemas avaliados obtiveram teores médios de MOS (2,01 a 4,00 dag kg⁻¹). Na camada subsequente (5-10 cm), observou-se classificação semelhante à obtida na camada superficial, tendo, contudo, o sistema JAVA apresentado teor bom de MOS. Na profundidade de 10-20 cm, apenas a média do sistema ILPF M foi interpretada como boa, sendo os valores dos demais tratamentos classificados como médios. Na última camada avaliada (20-30 cm), o tratamento JAVA obteve teor bom, enquanto os demais sistemas utilizados apresentaram teores médios de MOS.

Tabela 9 – Teores de matéria orgânica do solo (MOS) sob diferentes sistemas de manejo e uso em Curvelo (MG)

Sistema	Profundidade (cm)			
	0-5	5-10	10-20	20-30
	MOS (dag kg ⁻¹)			
¹ ILPF M	4,99 ± 0,54 a*	4,85 ± 1,01 ab	4,62 ± 0,86 a	3,54 ± 0,74 a
ILPF J	5,20 ± 1,23 ab	4,64 ± 0,72 a	3,82 ± 0,40 a	3,00 ± 0,21 ab
ILPF (J+M)	4,74 ± 0,47 ab	4,61 ± 0,19 a	3,50 ± 0,32 ab	2,76 ± 0,05 ab
MAR	3,89 ± 0,44 bc	3,59 ± 0,33 bc	2,93 ± 0,48 b	2,31 ± 0,26 c
JAVA	3,88 ± 1,46 abc	4,05 ± 1,48 abc	3,62 ± 1,16 ab	5,16 ± 6,76 abc
J+M	3,63 ± 0,26 c	3,53 ± 0,96 abc	3,17 ± 0,85 ab	2,41 ± 0,27 c
PAST	3,94 ± 0,68 abc	3,05 ± 0,62 c	4,00 ± 3,11 ab	2,57 ± 0,22 bc

¹Sistemas: ILPF M = Eucalipto consorciado com milho e capim-marandu; ILPF J = Eucalipto consorciado com milho e java; ILPF (J+M) = Eucalipto consorciado com milho, capim-marandu e java; MAR = monocultivo de capim-marandu; JAVA = monocultivo de java; J+M = consórcio de marandu com java; PAST = Pastagem em processo de degradação. Médias seguidas pela mesma letra e médias sem letras, na coluna, não diferem entre si pelo teste t de Student ao nível de 5% de probabilidade. *Intervalo de confiança.

Fonte: Do autor, 2016.

Os sistemas de ILPF obtiveram teores de MOS superiores ($p < 0,05$) aos tratamentos J+M (0-5 e 20-30 cm), PAST (5-10 cm) e MAR (20-30 cm). Baldotto *et al.* (2015), ao avaliarem áreas de mata remanescente, sistemas integrados de produção e monoculturas quanto à dinâmica da matéria orgânica e à fertilidade do solo em Latossolo Amarelo distrófico argissólico localizados em Florestal (MG), observaram que os sistemas florestais integrados a pastagens proporcionaram, comparativamente ao cultivo contínuo ou à monocultura de pastagem, aumentos nos teores de MOS, corroborando os resultados obtidos no presente estudo. Bonini *et al.* (2016) também verificaram aumento nos teores de MOS em Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico sob diferentes sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta, quando comparados à monocultivo em Andradina (SP). Segundo Tonucci *et al.* (2011) e Torres *et al.* (2014), a maior produção de biomassa vegetal obtida a partir da integração de diferentes componentes de produção favorece o aumento dos teores de MOS.

Para interpretação da disponibilidade de fósforo, devem-se adotar variáveis relacionadas com a capacidade tampão de fosfatos do solo, já que tal fator apresenta correlação direta na eficiência da extração de fósforo pelo método Mehlich-1 e na absorção deste nutriente pelas plantas, sendo, nesse contexto, o teor de argila uma das medidas utilizadas (ALVAREZ V., *et al.* 1999).

O teor de argila obtido nas áreas experimentais estudadas foi de 65,6%. A partir desse percentual, avaliando todas as médias observadas, sob os diferentes tratamentos e profundidades avaliadas, constatou-se que 96,43% dos valores foram classificados como muito baixos ($\leq 2,7 \text{ mg dm}^{-3}$), sendo os demais (3,57%) classificados como baixos (2,8 a $5,4 \text{ mg dm}^{-3}$) (TABELA 10). Lopes e Guilherme (1994) descrevem os solos sob vegetação de cerrado como de baixa fertilidade natural, sendo o fósforo um dos nutrientes limitantes à produção agrícola nessas áreas. Além disso, de

acordo com Lopes e Guilherme (1994), ocorre alta fixação de fósforo em regiões situadas sob o bioma em questão. Os processos de extração e exportação de nutrientes pelas espécies utilizadas no presente estudo também contribuíram para obtenção de níveis muito baixos e baixos de fósforo, mesmo com a realização de fertilização destes sistemas, uma vez que as adubações foram realizadas apenas na fase inicial de desenvolvimento das culturas estudadas.

Tabela 10 – Teores de fósforo (P) sob diferentes sistemas de manejo e uso em Curvelo (MG)

Sistema	Profundidade (cm)			
	0-5	5-10	10-20	20-30
	P (mg dm ⁻³)			
¹ ILPF M	2,60 ± 3,69 a [*]	0,99 ± 0,68 ab	0,81 ± 0,47 ab	0,60 ± 0,13 a
ILPF J	2,10 ± 1,42 a	1,18 ± 0,37 a	0,75 ± 0,19 a	0,56 ± 0,17 a
ILPF (J+M)	1,53 ± 1,47 a	1,03 ± 0,50 ab	0,82 ± 0,18 a	0,55 ± 0,24 a
MAR	1,73 ± 0,67 a	0,91 ± 0,38 ab	0,87 ± 0,28 a	0,78 ± 0,23 a
JAVA	3,66 ± 5,46 a	0,98 ± 0,74 ab	0,68 ± 0,26 ab	0,67 ± 0,14 a
J+M	1,57 ± 1,69 a	0,76 ± 0,26 ab	1,93 ± 3,87 ab	0,59 ± 0,07 a
PAST	0,62 ± 0,56 a	0,47 ± 0,33 b	0,37 ± 0,06 b	0,43 ± 0,13 a

¹Sistemas: ILPF M = Eucalipto consorciado com milho e capim-marandu; ILPF J = Eucalipto consorciado com milho e java; ILPF (J+M) = Eucalipto consorciado com milho, capim-marandu e java; MAR = monocultivo de capim-marandu; JAVA = monocultivo de java; J+M = consórcio de marandu com java; PAST = Pastagem em processo de degradação. P extraído pelo Mehlich-1 (HCl 0,05 mol L⁻¹ + H₂SO₄ 0,0125 mol L⁻¹). Médias seguidas pela mesma letra e médias sem letras, na coluna, não diferem entre si pelo teste t de Student ao nível de 5% de probabilidade.

*Intervalo de confiança.

Fonte: Do autor, 2016.

Apenas nas camadas de 5-10 e 10-20 cm de profundidade foram observadas diferenças significativas (p<0,05), tendo o sistema ILPF J apresentado maior teor de fósforo comparativamente ao PAST (5-10 e 10-20 cm). Verificou-se também média superior no sistema ILPF (J+M) em relação ao PAST na camada de 10-20 cm. Carvalho *et al.* (2015) também observaram melhorias na fertilidade do solo em área de integração lavoura-pecuária-floresta em relação à pastagem extensiva em Ribas do Rio Pardo

(MS). Em estudo realizado por Diel *et al.* (2014), em sistemas de cultivo exclusivos e de integração lavoura-pecuária-floresta no bioma, constatou-se que os sistemas integrados de produção não proporcionaram mudanças acentuadas nos atributos químicos do solo devido ao recente período de implantação (dois anos), corroborando com as poucas modificações observadas nos teores de fósforo do presente estudo.

Os valores de pH, soma de bases (SB) e CTC efetiva (t) foram semelhantes entre os sistemas estudados (TABELA 11). Apesar da correção e fertilização realizadas nos sistemas ILPF M, ILPF J, ILPF (J+M), MAR, JAVA e J+M, os nutrientes foram aplicados apenas na fase inicial de desenvolvimento das culturas, limitando-se aos primeiros meses de cultivo. Com isso, a extração e a exportação dos nutrientes aplicados nos sistemas avaliados podem ter favorecido a semelhança entre os resultados obtidos, igualando os valores dos atributos citados a PAST.

Conforme classificação proposta Alvarez V. *et al.* (1999), a grande maioria das médias obtidas foram quimicamente classificadas como acidez ativa média, variando entre 5,1 e 6,0. Os valores de SB obtiveram classificação entre médio (de 1,81 a 3,60 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) e bom (entre 3,61 e 6,0 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$). Quanto a CTC efetiva, a maior parte dos valores foram classificados como médios (2,31 a 4,6 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), seguidos por valores classificados como bons (4,61 a 8,0 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$).

Tabela 11 – Valores de pH, soma de bases (SB), CTC efetiva (t), CTC potencial (T) e saturação por bases (V) sob diferentes sistemas de manejo e uso em Curvelo (MG)

Sistema	pH (H ₂ O)			
	Profundidade (cm)			
	0-5	5-10	10-20	20-30
¹ ILPF M	5,70 ± 1,01*	5,84 ± 1,15	5,93 ± 1,22	5,91 ± 1,24
ILPF J	5,38 ± 0,30	5,40 ± 0,62	5,51 ± 0,66	5,39 ± 1,04
ILPF (J+M)	6,34 ± 1,27	6,26 ± 1,49	6,40 ± 1,54	6,35 ± 1,50
MAR	5,05 ± 0,54	5,30 ± 0,50	5,35 ± 0,33	5,48 ± 0,33
JAVA	5,28 ± 0,46	5,43 ± 0,61	5,45 ± 0,72	5,53 ± 0,74
J+M	4,98 ± 0,35	5,05 ± 0,21	5,25 ± 0,21	5,50 ± 0,13
PAST	5,55 ± 0,69	5,33 ± 0,98	5,23 ± 0,91	5,23 ± 0,76
	SB (cmol _c dm ⁻³)			
ILPF M	5,57 ± 3,76	5,78 ± 4,07	5,33 ± 4,00	3,92 ± 2,90
ILPF J	4,43 ± 2,31	4,34 ± 2,46	3,84 ± 2,55	2,57 ± 2,17
ILPF (J+M)	5,51 ± 3,60	5,63 ± 4,68	4,94 ± 4,25	3,66 ± 2,86
MAR	2,86 ± 1,26	2,53 ± 0,53	2,05 ± 0,97	1,04 ± 0,38
JAVA	3,43 ± 1,66	4,16 ± 2,38	1,81 ± 0,89	0,89 ± 0,19
J+M	2,17 ± 1,12	1,56 ± 1,00	2,00 ± 1,36	1,86 ± 2,79
PAST	4,35 ± 3,42	2,12 ± 0,46	1,71 ± 0,70	1,04 ± 0,47
	t (cmol _c dm ⁻³)			
ILPF M	5,70 ± 3,61	5,88 ± 3,95	5,54 ± 3,78	4,15 ± 2,63
ILPF J	4,60 ± 1,97	4,58 ± 1,99	4,10 ± 2,05	3,02 ± 1,49
ILPF (J+M)	5,65 ± 3,25	5,89 ± 4,09	5,12 ± 3,82	3,99 ± 2,19
MAR	3,35 ± 0,71	3,04 ± 0,43	2,55 ± 0,56	1,94 ± 0,22
JAVA	3,62 ± 1,42	4,39 ± 2,13	2,78 ± 0,57	2,14 ± 0,14
J+M	3,02 ± 0,42	2,46 ± 0,68	2,56 ± 0,79	2,54 ± 2,29
PAST	4,53 ± 3,22	2,81 ± 0,21	2,54 ± 0,49	2,06 ± 0,17
	T (cmol _c dm ⁻³)			
ILPF M	7,71 ± 2,56 ab	7,80 ± 3,20 abc	7,29 ± 2,93	5,89 ± 1,76 abc
ILPF J	7,57 ± 1,68 a	7,55 ± 1,33 a	6,53 ± 1,31	5,39 ± 1,10 ab
ILPF (J+M)	7,66 ± 1,57 a	7,97 ± 2,25 ab	7,08 ± 2,15	5,74 ± 0,96 a
MAR	5,40 ± 0,92 ab	4,96 ± 0,51 c	4,48 ± 0,88	3,36 ± 0,30 d
JAVA	5,57 ± 1,51 ab	6,56 ± 2,65 abc	4,69 ± 0,87	3,73 ± 0,49 cd
J+M	4,73 ± 0,95 b	4,24 ± 1,56 bc	4,27 ± 1,13	4,09 ± 2,50 abcd
PAST	7,05 ± 3,08 ab	4,94 ± 0,45 c	4,79 ± 0,77	3,98 ± 0,71 bcd
	V (%)			
ILPF M	70,28 ± 23,46	72,03 ± 20,18 a	69,35 ± 24,20	62,83 ± 27,72 a
ILPF J	58,37 ± 18,82	57,53 ± 22,77 ab	57,81 ± 27,30	48,58 ± 34,24 ab
ILPF (J+M)	70,73 ± 31,50	68,44 ± 39,52 ab	67,93 ± 38,90	63,57 ± 37,35 ab
MAR	52,44 ± 14,59	50,94 ± 8,00 ab	44,96 ± 15,63	30,84 ± 11,51 ab
JAVA	60,51 ± 13,86	62,34 ± 9,74 a	38,20 ± 13,93	24,19 ± 6,99 b
J+M	44,99 ± 15,44	36,21 ± 13,96 b	45,22 ± 23,28	39,56 ± 33,99 ab
PAST	59,60 ± 18,96	42,77 ± 6,51 b	35,54 ± 10,54	26,44 ± 12,44 ab

¹Sistemas: ILPF M = Eucalipto consorciado com milho e capim-marandu; ILPF J = Eucalipto consorciado com milho e java; ILPF (J+M) = Eucalipto consorciado com milho, capim-marandu e java; MAR = monocultivo de capim-marandu; JAVA = monocultivo de java; J+M = consórcio de marandu com java; PAST = Pastagem em processo de degradação. Médias seguidas pela mesma letra e médias sem letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste t de Student ao nível de 5% de probabilidade. *Intervalo de confiança.

Fonte: Do autor, 2016.

Na camada superficial (0-5 cm), os sistemas ILPF J e ILPF (J+M) apresentaram valores de CTC potencial (T) superiores ao valor obtido no sistema J+M. Já na profundidade de 5-10 cm, foi observada média de CTC potencial superior no ILPF J, quando comparada aos sistemas MAR, J+M e PAST. Na camada de 10-20 cm não foi possível observar diferenças entre as médias dos tratamentos. Na última camada avaliada (20-30 cm), verificou-se valor de CTC potencial superior no sistema ILPF (J+M), comparativamente aos sistemas MAR, JAVA e PAST. Para essa mesma profundidade, o sistema ILPF J apresentou média de CTC potencial superior aos sistemas MAR e JAVA. A grande maioria das médias obtidas foram quimicamente classificadas como CTC potencial média, cujos valores devem estar entre 4,31 e 8,6 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ (ALVAREZ V. *et al.*, 1999).

Os valores de saturação por bases (V) não variaram significativamente entre os sistemas nas camadas de 0-5 e 10-20 cm. Na profundidade de 5-10 cm, observaram-se valores superiores de saturação por bases nos tratamentos ILPF M e JAVA quando comparados aos tratamentos J+M. Na última camada avaliada (20-30 cm), o ILPF M obteve saturação por bases superior ao sistema JAVA. Os valores de saturação por bases obtiveram classificação entre médio, que varia de 40,1 a 60,0%, e bom, os quais devem estar entre 60,1 a 80,0%. Pequena parcela foi classificada como saturação por bases baixa, representada por valores entre 20,1 a 40% (ALVAREZ V. *et al.*, 1999).

Constatou-se, de forma geral, possível melhoria da qualidade química do solo nos sistemas ILPF, expressa pela CTC potencial e saturação por bases. Segundo Costa *et al.* (2015), a maior deposição de resíduos vegetais na camada superficial do solo em sistemas integrados, ao serem decompostos, contribui com maiores teores de nutrientes no sistema, promovendo, também, aumento da atividade biológica no ambiente. Além disso, conforme Santos *et al.* (2001), a integração de espécies com

morfologias radiculares distintas, levando à exploração de diferentes profundidades no perfil do solo, otimiza o processo de ciclagem de nutrientes, diminuindo as perdas desses elementos no sistema.

Selle (2007) atribui a ciclagem de nutrientes em ecossistemas florestais à circulação de matéria, processo que decorre principalmente da deposição de serapilheira. Outros importantes componentes na ciclagem de nutrientes são os galhos, troncos e raízes, principalmente as finas. O escoamento de água das chuvas pelos troncos das árvores também é responsável pela transferência de nutrientes ao solo. O sistema radicular profundo de espécies arbóreas promove a recuperação de nutrientes presentes em camadas subsuperficiais do solo para camadas superficiais, diminuindo as perdas no sistema. Com a senescência de órgãos da planta, esses nutrientes, a partir dos processos de decomposição e mineralização, podem ser novamente absorvidos pelas espécies que compõe o ambiente, aumentando a eficiência do processo de ciclagem de nutrientes.

2.4 CONCLUSÕES

Os atributos físicos do solo apresentaram poucas modificações devido ao pouco tempo (um ano) de implantação dos diferentes sistemas de uso e manejo avaliados, contudo observou-se, de forma geral, melhoria na qualidade química do solo sob sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta, expressa pelo aumento dos teores de matéria orgânica do solo, fósforo, da CTC potencial e da saturação por bases.

CAPÍTULO 3 – ESTOQUES DE CARBONO E NITROGÊNIO DO SOLO SOB DIFERENTES SISTEMAS DE USO DA TERRA NA MESORREGIÃO CENTRAL MINEIRA

Resumo: O objetivo deste estudo foi comparar os teores e estoques de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) do solo e os teores de carbono orgânico (CO) de diferentes frações físicas da matéria orgânica do solo (MOS) de um Latossolo Vermelho distrófico típico sob diferentes sistemas de uso da terra na Mesorregião Central Mineira. Amostras de solo foram coletadas nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-30 cm de profundidade em áreas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta com eucalipto, milho e *Brachiaria brizantha* cv. Marandu (ILPF M), monocultivo de capim-marandu (MAR), pastagem de *Brachiaria decumbens* de baixa produtividade (PAST) e vegetação nativa (VN), caracterizada como Cerradão, em Curvelo (MG). Os atributos avaliados foram COT e NT do solo, estoques de COT e NT e CO das frações Leve Livre (FLL), areia (F-areia) e silte+argila (F-silte+argila) da MOS. Para cada variável, foram calculados a média e o intervalo de confiança pelo teste t de Student ($p < 0,05$) e, para os parâmetros de qualidade da MOS, realizou-se análise de agrupamento por método hierárquico, usando-se a distância de Mahalanobis como medida de semelhança entre os registros e o método de Ward como forma de agrupamento. A adoção do sistema ILPF M promoveu a recuperação dos estoques de COT na camada de 0-30 para níveis próximos aos observados na VN. O estoque de NT, contudo, foi reduzido após a conversão da floresta nativa para PAST, necessitando-se de um período de recuperação superior ao observado para aumento dos estoques de COT após a adoção de sistema ILPF. Houve aumento dos teores de CO da FLL do solo sob o sistema ILPF M, onde foram observados valores semelhantes aos obtidos na VN até a profundidade de 20 cm. O MAR apresentou valores de COT, NT, EstC, EstN e CO da FLL superiores aos observados no PAST na camada de 0-5 cm, porém semelhantes nas demais profundidades. O sistema PAST não foi bem manejado ao longo do tempo e contribuiu com a perda dos teores e estoques de COT e NT do solo e, também, da fração mais estável da MOS (F silte+argila). Verificou-se, a partir da análise de agrupamento, similaridade entre os sistemas MAR e PAST, enquanto o sistema ILPF M mostrou maior semelhança com a VN. Contudo, há necessidade de acompanhamento dos sistemas MAR e ILPF M para comprovação e detecção de melhorias na qualidade do solo ao longo do tempo, tendo em vista o curto período de implantação destes sistemas.

Palavras-chave: Qualidade do solo. Integração Lavoura-Pecuária-Floresta. Matéria orgânica do solo.

CHAPTER 3 – CARBON AND NITROGEN STOCKS IN SOIL UNDER DIFFERENT LAND USE SYSTEMS IN THE CENTRAL MESOREGION OF MINAS GERAIS

Abstract: This study aimed to compare contents and stocks of total organic carbon (TOC) and total nitrogen (TN) in soil, and the content of organic carbon (OC) in different physical fractions of soil organic matter (SOM) in a typical dystrophic Red Latosol under different land use systems in the central mesoregion of the state of Minas Gerais. Soil samples were collected from layers 0-5, 5-10, 10-20 and 20-30 cm deep in integrated Crop-Livestock-Forest (ICLF) areas with eucalyptus, corn and *Brachiaria brizantha* cv. Marandu (ICLF M), monoculture of marandu grass (MAR), pasture of *Brachiaria decumbens* with low productivity (PAST), and native vegetation (NV) characterized as Cerradão, in the town of Curvelo (MG). The following attributes were assessed: soil TOC and TN; stock of TOC (CStock) and TN (NStock); organic C (OC) in free light fractions (FLF), sand (F-sand), and silt + clay (F-silt + clay) from MOS. For each variable, the mean and the confidence interval were calculated by using Student's t-test ($p < 0.05$). For the SOM quality parameters a hierarchical grouping analysis was performed by using the Mahalanobis distance as a measure of similarity between the records, and Ward's method as a form of grouping. The adoption of ICLF M system promoted recovery of CStock in the 0-30 cm soil layer to levels close to those observed in NV. However, NStock was reduced after native forest conversion to PAST, requiring a recovery period higher than that observed for increasing CStock after the adoption of ICLF system. It was also observed an increase in the OC contents of the FLF of the soil under ICLF M system, presenting values similar to those obtained in NV up to the depth of 20 cm. MAR system presented values of TOC, TN, CStock, NStock, and OC in FLF higher than those observed in PAST in the 0-5 cm soil layer, but with similar results in the other depths. PAST system was not adequately managed over time, what contributed to the loss of contents and stocks of TOC and TN, as well as to the loss of a more stable fraction of SOM (F-silt + clay). It was noted from the cluster analysis that there was similarity between MAR and PAST systems, whereas ICLF M system presented a better similarity to NV. However, there is a need for monitoring MAR and ICLF M systems in order to evidence and detect improvements in soil quality over time, given the short period of implementation of these systems.

Key-words: Soil quality. Integrated crop-livestock-forest systems. Soil organic matter.

3.1 INTRODUÇÃO

O uso inadequado do solo, assim como a ausência de práticas de conservação, promove desequilíbrios em suas funções, comprometendo a conservação da natureza e o suprimento da demanda de alimentos para a sociedade. Portanto, os modelos de produção agrícola caracterizados pela baixa diversificação de espécies vegetais e intenso revolvimento do solo têm ocasionado a degradação física, química e biológica dos solos. Os sistemas conservacionistas, como a integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF), têm sido apresentados como alternativas aos atuais modelos de produção, buscando o aumento da biodiversidade e a sustentabilidade da produção agrícola, pecuária e florestal (CORDEIRO *et al.*, 2015b).

Os teores de matéria orgânica do solo (MOS) são diretamente influenciados pelos diferentes usos da terra. Segundo Lal (2015), a MOS é um componente crítico da qualidade do solo e desempenha inúmeros serviços ecossistêmicos, como melhorias na qualidade física, química e biológica do solo e mitigação das emissões de gases de efeito estufa. A quantificação dos teores e estoques de carbono orgânico (COT) e nitrogênio total (NT) do solo, importantes constituintes da MOS, permite inferir quanto aos impactos resultantes da adoção de diferentes sistemas de uso e manejo do solo (BALDOTTO *et al.*, 2015; RANGEL; SILVA, 2007). O fracionamento físico da MOS também apresenta importante papel na distinção de ambientes, pois possibilita avaliar a dinâmica da MOS, já que cada fração apresenta função específica e respostas distintas quanto às alterações promovidas no solo (CARMO *et al.*, 2012; CONCEIÇÃO *et al.* 2014; KUNDE *et al.*, 2016).

Resultados positivos quanto ao aumento da qualidade do solo foram verificados em diferentes trabalhos envolvendo os sistemas integrados de produção. Porém, dada a dinâmica e complexidade gerada pela integração

de diferentes componentes de produção, há necessidade de realização de pesquisas regionalizadas e em diferentes estágios de desenvolvimento desses sistemas (BALBINO *et al.*, 2011a; ASSIS *et al.*, 2015; FREITAS *et al.*, 2012; SILVA *et al.*, 2016; BALDOTTO *et al.*, 2015).

Diante do exposto, o objetivo deste estudo foi comparar os teores e estoques de COT e NT do solo e os teores de CO nas diferentes frações físicas da MOS de um Latossolo Vermelho distrófico típico sob diferentes sistemas de uso na Mesorregião Central Mineira.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Localização e caracterização da área de estudo

O experimento foi realizado no período de dezembro de 2014 a janeiro de 2016 na Fazenda Experimental do Moura (pertencente à Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri – UFVJM), no município de Curvelo (MG) (paralelos 18°44'52,03" de latitude sul e meridianos 44°26'53,56" de longitude oeste), localizado na Mesorregião Central Mineira (ver FIGURA 1 no capítulo 2). A altitude da área é de aproximadamente 644 m, com topografia plana e vegetação de Cerrado. Conforme a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo Aw, o que corresponde ao clima tropical de savana, com chuvas concentradas no verão (outubro a abril) e período seco correspondente ao inverno (maio a setembro) (ver FIGURA 2 no capítulo 2). A precipitação média anual do município dos últimos 15 anos foi de 1064 mm, com temperatura média de 22°C (INMET, [2016]).

O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico (ver composição granulométrica na TABELA 01 do capítulo 2). Realizou-se, também, a coleta de amostras de solo na profundidade de 0-30 cm para caracterização química do solo (TABELA 2 do capítulo 2).

3.2.2 Tratamentos

O experimento foi composto por 4 tratamentos e 4 repetições, que consistiram em 4 trincheiras abertas aleatoriamente em cada tratamento, sendo eles:

- Sistema de integração Lavoura-Pecuária-Floresta, cultivado com eucalipto consorciado com milho e *Brachiaria brizanta* cv. Marandu (ILPF M);

- Monocultivo de *Brachiaria brizanta* cv. Marandu (MAR);
- Pastagem de *Brachiaria decumbens* em processo de degradação (PAST) e;
- Vegetação nativa, caracterizada como Cerradão (VN).

A caracterização dos manejos empregados nos tratamentos ILPF M, MAR e PAST foram descritos no capítulo 2 (ver tópicos 2.2.2.1 e 2.2.2.2). A área de vegetação nativa (VN) encontra-se situada em área adjacente às unidades experimentais. Em levantamento prévio, constatou-se que o sistema VN não apresentava intervenção antrópica, dessa forma, foi empregada como tratamento testemunha.

3.2.3 Amostragem e preparo de amostras de solo

Foram abertas 4 trincheiras por tratamento (ver FIGURA 4 no capítulo 2), onde se coletou amostras para análise da densidade do solo (DS), carbono orgânico total (COT), nitrogênio total (NT) e fracionamento físico da matéria orgânica do solo nas camadas 0-5, 5-10, 10-20 e 20-30 cm de profundidade.

Após a realização da coleta de amostras de solo, essas foram secas ao ar (TFSA) para posterior peneiramento, moagem, pesagem e determinação dos teores de COT e de NT e fracionamento físico da matéria orgânica do solo.

3.2.4 Determinação dos teores e estoques de carbono orgânico e nitrogênio totais do solo

Procedeu-se o destorroamento manual das amostras e o peneiramento em tamis com malha de 2 mm. Em seguida, uma alíquota de cada amostra foi armazenada em sacos plásticos e encaminhada para moagem. Realizou-

se a moagem em moinho de bolas e, posteriormente, peneirou-se a 0,150 mm. Para análise de COT e NT, pesou-se 0,2 g de solo em balança analítica de precisão. A pesagem foi realizada sobre folhas de estanho, sendo essas utilizadas para embrulhar as amostras de solo.

A determinação dos teores de COT do solo foi realizada via combustão a seco por absorção de Infravermelho e do NT por condutividade térmica, ambos os elementos em analisador elementar LECO TruSpec.

A densidade do solo foi determinada pelo método do anel volumétrico (EMBRAPA, 1997). O estoque de carbono (EstC) e nitrogênio (EstN) foi obtido a partir da multiplicação do teor de COT ou NT pela densidade aparente e pela profundidade analisada, realizando-se a correção dos EstC e EstN para uma mesma massa de solo. O EstC e o EstN foi calculado pela seguinte expressão:

$$\text{EstC/N} = (\bar{X} \times \rho \times h)/10$$

Onde:

EstC/N = estoque de C ou N da profundidade amostrada (Mg ha^{-1});

\bar{X} = teor de COT ou NT de cada camada amostrada (g kg^{-1});

ρ = densidade do solo (g cm^{-3});

h = espessura da camada considerada (cm).

3.2.5 Fracionamento físico da matéria orgânica do solo (FFMOS)

O FFMOS foi determinado a partir de metodologia adaptada de Christensen (1985; 1992). Para a separação das frações, as amostras foram peneiradas a 2 mm, pesando-se, em seguida, 20 g em frascos de vidro onde foram adicionados 70 mL de água. Posteriormente, deixaram-se as amostras (frascos contendo solo e água) em geladeira para resfriamento, visando o não aquecimento durante o processo de sonificação. Após esse procedimento, as mesmas foram sonificadas em aparelho de ultrassom

(Sonics Vibra Cell™) por 25 minutos, com amplitude de 53%, correspondente a aproximadamente $1028,57 \text{ j mL}^{-1}$, sendo agitadas manualmente com bastão de vidro a cada 5 minutos.

Após a dispersão, as amostras foram peneiradas em tamis de 0,053 mm sobre refratários de vidro (amostras correspondentes à fração silte+argila ($F < 0,053 \text{ mm}$)). O material retido na peneira (fração leve livre (FLL) e fração pesada (F-areia)) foi transferido para cadinho de porcelana. Adicionou-se água ao cadinho e, a partir de movimentos de garimpagem, separou-se a FLL da F-areia por meio de diferenças de densidade. Colocaram-se os materiais FLL e F-areia em latinhas de alumínio e a $F < 0,053 \text{ mm}$ permaneceu no refratário de vidro. As frações resultantes do FFMOS foram secas em estufa de circulação e renovação de ar a 65°C por cerca de 24 (frações FLL e F-areia) e 96 horas ($F < 0,053 \text{ mm}$).

Após esses períodos, realizou-se a pesagem e moagem das frações a 0,150 mm em cadinho de porcelana para posterior obtenção dos teores de C via combustão a seco, por absorção de Infravermelho, em analisador elementar LECO TruSpec.

3.2.6 Análise estatística

Para cada variável avaliada foram calculados a média e o intervalo de confiança estimados pelo teste de t de Student a 5% de probabilidade, com auxílio do programa Microsoft Excel 2013.

Para verificar as semelhanças entre os usos da terra avaliados, foi realizada a análise de agrupamento por método hierárquico, usando-se a distância de Mahalanobis como medida de semelhança entre os registros, e o método de Ward como estratégia de agrupamento. O resultado da análise foi apresentado em forma gráfica (dendrograma), que auxiliou na identificação

dos agrupamentos dos usos da terra com as variáveis analisadas, com auxílio do Programa R, versão 3.3.0.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1 Teores de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) do solo

Os teores de COT e NT decresceram com o aumento da profundidade (TABELA 1), visto que a deposição de material orgânico em superfície ocorre em maior quantidade. Observou-se, na profundidade de 0-5 cm, maior teor de carbono orgânico total do solo (COT) e nitrogênio total (NT) no Cerradão (TABELA 1). Segundo Pinheiro (2007) e Calonego *et al.* (2012), a conversão de um ecossistema natural para agricultura promove alterações nas taxas de adição e decomposição da MOS, sendo a decomposição intensificada por meio da destruição dos macroagregados. Essa desagregação é promovida principalmente pelas práticas de revolvimento do solo. Com isso, expõe-se a MOS, anteriormente protegida no interior dos macroagregados, à oxidação e ação microbiana, reduzindo seu teor no solo e aumentando as emissões de CO₂.

Os sistemas PAST, MAR e ILPF M apresentaram valores semelhantes de COT na camada superficial do solo (0-5 cm). Já o valor de NT no ILPF M foi superior ao observado no Pasto, demonstrando uma possível melhoria na qualidade superficial do solo. Segundo Carvalho *et al.* (2010), os sistemas integrados de produção promovem aumento dos teores de carbono no solo. Contudo, esse aumento varia conforme a espécie utilizada, o tipo de solo da área, o clima e o tempo de implantação do sistema. Verifica-se, portanto, que a semelhança obtida entre os valores de COT nos agrossistemas PAST, MAR e ILPF M esteja associada ao pouco tempo de conversão da área de pastagem de baixa produtividade para os tratamentos MAR e ILPF M. Wendling *et al.* (2011) observaram, em trabalho sobre mudanças no carbono e nitrogênio em diferentes compartimentos da matéria orgânica sob sistema

agrossilvipastoril no Cerrado, que a integração dos componentes florestal, pecuário e agrícola reduziu os teores de carbono e nitrogênio do solo nos anos iniciais de implantação do sistema. Entretanto, depois de dez anos de cultivo, o sistema demonstrou capacidade de elevar os teores destes elementos no solo.

Tabela 1 – Teor de carbono orgânico total (COT), nitrogênio total do solo (NT) e relação carbono/nitrogênio (C/N) sob diferentes sistemas de uso da terra em Curvelo (MG)

Sistema	Profundidade (cm)			
	0-5	5-10	10-20	20-30
COT (g kg ⁻¹)				
1PAST	20,98 ± 2,66 ^a b	18,21 ± 1,73 c	16,95 ± 2,23 b	14,76 ± 1,53 ab
MAR	24,14 ± 0,88 b	22,71 ± 0,78 b	20,41 ± 2,61 ab	15,05 ± 0,77 b
ILPF M	26,86 ± 5,14 b	25,96 ± 4,69 ab	21,35 ± 5,04 ab	14,15 ± 1,35 b
VN	52,59 ± 14,09 a	37,93 ± 9,58 a	29,35 ± 8,50 a	18,65 ± 2,65 a
NT (g kg ⁻¹)				
PAST	1,34 ± 0,16 c	1,21 ± 0,13 c	1,16 ± 0,14 b	1,02 ± 0,04 b
MAR	1,59 ± 0,10 bc	1,48 ± 0,13 b	1,31 ± 0,16 b	0,92 ± 0,08 bc
ILPF M	1,89 ± 0,24 b	1,67 ± 0,20 b	1,25 ± 0,25 ab	0,84 ± 0,12 c
VN	3,71 ± 0,60 a	2,80 ± 0,75 a	2,03 ± 0,55 a	1,20 ± 0,13 a
C/N				
PAST	15,74 ± 0,36	15,07 ± 0,26 a	14,68 ± 1,55 ab	14,44 ± 1,42
MAR	15,20 ± 1,16	15,38 ± 1,39 ab	15,56 ± 0,56 ab	16,39 ± 1,02
ILPF M	14,16 ± 1,35	15,61 ± 2,75 ab	17,04 ± 1,62 a	16,98 ± 1,70
VN	14,09 ± 1,74	13,57 ± 0,62 b	14,41 ± 0,77 b	15,52 ± 1,48

¹Sistemas: PAST = Pastagem em processo de degradação; MAR = monocultivo de capim-marandu; ILPF M = Eucalipto consorciado com milho e capim-marandu; VN = vegetação nativa de Cerradão. Médias seguidas pela mesma letra e médias sem letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste t de Student ao nível de 5% de probabilidade. *Intervalo de confiança
Fonte: Do autor, 2016.

Na camada de 5-10 cm, verificaram-se teores de COT equivalentes entre VN e ILPF M, porém o teor de NT foi inferior no ILPF M. A semelhança observada entre os valores de COT, apesar de não acompanhada pelo NT, deu-se possivelmente devido ao aumento da biodiversidade proporcionada pela integração de diferentes componentes no sistema em questão. Em trabalho realizado por Tonucci *et al.* (2011), verificou-se que a condução de

sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta no bioma Cerrado foi capaz de propiciar sequestro de carbono em virtude da presença de diferentes componentes que aumentam o volume de raízes e fornecem maior produção de biomassa vegetal.

Para profundidade de 5-10 cm, os menores valores dos atributos COT e NT foram obtidos em PAST. Observou-se que tal processo decorreu da ausência de manejo referente ao componente forrageiro e animal ao longo de aproximadamente 20 anos, visto que, apesar do potencial de exploração do solo pelo agressivo sistema radicular das gramíneas favorecendo a cimentação e estruturação das partículas e agregados, a baixa produtividade do tratamento em questão gerou decréscimos na transferência de material orgânico ao solo com conseqüente redução dos teores de COT. Já o MAR apresentou média referente ao teor de COT e NT semelhante ao ILPF M (5-10 cm), porém inferior à VN.

Os valores de COT, na camada de 10-20 cm, foram semelhantes entre VN e os sistemas ILPF M e MAR, demonstrando potencial de recuperação dos teores de COT em profundidade por ambos os sistemas recentemente implantados. Para esta mesma camada, o MAR apresentou teor de NT inferior à VN. Já o sistema PAST obteve menor valor de COT e NT comparativamente à VN (10-20 cm), corroborando com a perda de qualidade do solo observada nas camadas superiores.

Na profundidade de 20-30 cm, foi observada média de COT do solo superior na VN em relação à ILPF M e MAR. Não foi verificada diferença entre PAST e os demais sistemas quanto aos valores de COT em profundidade (20-30 cm). Nesta mesma camada, nenhum dos agrossistemas apresentou teor de NT semelhante à VN. Além disso, verificou-se redução do valor de NT no ILPF M quando comparado a PAST. Comparativamente à VN, os agrossistemas ILPF M e MAR podem ter apresentado redução dos valores

de COT e NT em virtude do recente revolvimento do solo durante o preparo, prática não realizada em PAST.

Verifica-se, portanto, que a ausência de manejo dos componentes forrageiro e animal no agrossistema PAST, sem fertilização e correção do solo, aliada a práticas incorretas de pastejo, como a não observância da capacidade de regeneração das gramíneas, levaram a redução dos teores de COT. Resultados semelhantes foram observados por Cardoso *et al.* (2010) após a conversão de sistema nativo para pastagens, havendo reduções nos teores de matéria orgânica do solo sob as áreas em pastejo.

As melhorias observadas nos teores de COT e NT sob os agrossistemas ILPF M e MAR podem ser atribuídas à maior biodiversidade, que gera maior produção de biomassa vegetal aérea e radicular, estando condicionada ao manejo adequado do solo, como a utilização de fertilizantes e corretivos para manutenção da capacidade produtiva do solo e das espécies cultivadas. Destaca-se também, o expressivo desenvolvimento do sistema radicular da gramínea utilizada ao longo do perfil do solo, que contribui com o processo de agregação devido à ação estruturante e cimentante das raízes que liberam exudatos ricos em polissacarídeos, preservando a matéria orgânica do solo da ação microbiana pela maior formação e estabilização de agregados (SANTOS *et al.* 2007; SALTON *et al.* 2008).

Verificaram-se valores de C/N próximos entre os sistemas estudados. Porém, menores valores de C/N foram observados em VN quando comparado a PAST (5-10 cm) e ao ILPF M (10-20 cm) (TABELA 1). Segundo Machado *et al.* (2014), tal resultado sugere maior intensidade na ciclagem da matéria orgânica do solo no ecossistema nativo, havendo, dessa forma, favorecimento na mineralização e liberação de nitrogênio no solo. De acordo com Silva e Mendonça (2007), para que haja mineralização do nitrogênio, a relação C/N deve ser inferior a 30, caso contrário, ocorre imobilização deste

nutriente e conseqüente redução de sua disponibilização às plantas. Contudo, as médias de C/N variaram entre 13,57 (VN) a 17,04 (ILPF M), indicando predomínio do processo de mineralização em relação ao processo de imobilização, caracterizando uma eficiente ciclagem da matéria orgânica nos sistemas avaliados.

Conforme Braghirolli *et al* (2012), o elevado número de espécies vegetais em formações florestais nativas, dentre elas plantas fixadoras de nitrogênio, e conseqüentemente o estabelecimento de associações simbióticas entre as plantas, os fungos micorrízicos e as bactérias diazotróficas, contribuem com o aumento do carbono e do nitrogênio fixado no solo, corroborando com a redução dos valores de C/N observados no presente estudo.

3.3.2 Estoques de carbono (EstC) e nitrogênio (EstN) do solo

Os resultados obtidos para EstC e EstN foram semelhantes aos observados para o COT e NT, uma vez que houve pouca variação em relação à densidade do solo entre os sistemas avaliados (TABELA 1 do capítulo 2). A VN apresentou maior EstC nas camadas de 0-5 e 20-30 cm de profundidade (TABELA 2). A redução dos estoques nos agrossistemas avaliados decorre da alteração da deposição de resíduos orgânicos ao solo e perda da proteção física promovida pelos agregados à matéria orgânica por meio do revolvimento do solo sob condições de temperatura e umidade ideais para ação da microbiota do solo (SILVA *et al.*, 2008; SOUTO *et al.*, 2005; CALDEIRA *et al.*, 2013; CORAZZA *et al.*, 1999; CALONEGO *et al.*, 2012). Fontana *et al.* (2011) observaram redução dos teores e estoques de COT após a conversão de florestas para agrossistemas como conseqüência da diminuição do aporte de resíduos orgânicos na superfície do solo e devido à

melhoria das condições do meio, aumentando, assim, a atividade microbiana no solo.

Tabela 2 – Estoque de carbono orgânico total (EstC) e estoque de nitrogênio total do solo (EstN) sob diferentes sistemas de uso da terra em Curvelo (MG)

Sistema	Profundidade (cm)				
	0-5	5-10	10-20	20-30	0-30
EstC (Mg ha ⁻¹)					
¹ PAST	10,74±1,36 ^{*b}	10,36±0,99 ^c	18,35±2,41 ^b	17,50±1,82 ^b	56,94±5,45 ^b
MAR	12,36±0,45 ^b	12,91±0,45 ^b	22,09±2,83 ^{ab}	17,85±0,91 ^b	65,21±3,70 ^{ab}
ILPF M	13,75±2,63 ^b	14,76±2,67 ^{ab}	23,11±5,46 ^{ab}	16,78±1,61 ^b	68,40±9,41 ^{ab}
VN	26,98±8,44 ^a	21,41±5,59 ^a	31,82±10,70 ^a	22,04±1,43 ^a	102,25±24,97 ^a
EstN (Mg ha ⁻¹)					
PAST	0,68±0,08 ^c	0,69±0,07 ^c	1,25±0,16 ^b	1,21±0,05 ^b	3,84±0,26 ^b
MAR	0,81±0,05 ^{bc}	0,84±0,08 ^b	1,42±0,18 ^{ab}	1,09±0,10 ^{bc}	4,17±0,29 ^b
ILPF M	0,97±0,12 ^b	0,95±0,12 ^b	1,36±0,27 ^{ab}	0,99±0,14 ^c	4,26±0,39 ^b
VN	1,90±0,44 ^a	1,58±0,46 ^a	2,21±0,72 ^a	1,42±0,11 ^a	7,11±1,53 ^a

¹Sistemas: PAST = Pastagem em processo de degradação; MAR = monocultivo de capim-marandu; ILPF M = Eucalipto consorciado com milho e capim-marandu; VN = vegetação nativa de Cerradão. Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste t de Student ao nível de 5% de probabilidade. *Intervalo de confiança
Fonte: Do autor, 2016.

Vergutz *et al.* (2010), em estudo sobre mudanças na matéria orgânica de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico causadas pelo tempo de adoção de um sistema agrossilvipastoril com eucalipto, realizado em Vazante (MG), concluíram que a implantação dos sistemas agrossilvipastoris ocasionou redução nos estoques de carbono orgânico total nas camadas superficiais, sendo necessário um período superior ao estudado para reestabelecimento dos estoques originais representados por uma vegetação de Cerrado, período este de aproximadamente doze anos.

Na profundidade de 5-10 cm, verificaram-se valores de EstC semelhantes entre VN e ILPF M e o menor valor, entre os tratamentos estudados, foi obtido em PAST. Ao longo do perfil do solo (0-30 cm) e na camada de 10-20 cm, foi obtido valor de EstC superior em VN

comparativamente a PAST, enquanto os sistemas ILPF M e MAR proporcionaram valores de EstC semelhantes ao Cerradão. Ao avaliar o estoque de carbono em sistemas agrossilvopastoril, pastagem e eucalipto sob cultivo convencional na região noroeste do Estado de Minas Gerais em Latossolo Vermelho distrófico típico, Neves *et al.* (2004) constatou, no terceiro ano de condução de um sistema agrossilvopastoril, uma tendência de aumento dos estoques de carbono ao longo dos anos, evidenciando o potencial dos sistemas integrados em recuperar os estoques deste elemento que são perdidos na conversão de florestas nativas para sistemas de exploração agrícola, corroborando com o presente trabalho.

Segundo Macedo (2009), a utilização de sistemas integrados pode proporcionar estoques de carbono orgânico do solo igual ou superior aos encontrados em sistemas nativos devido ao emprego de gramíneas tropicais. Tais espécies promovem boa cobertura do solo, produção de palha, estruturação do solo e conseqüente aumento do carbono. Conforme Torres *et al.* (2014), o maior número de espécies arbóreas e/ou arbustivas por unidade de área promove, em sistemas integrados de produção, maior estocagem de carbono e conseqüente mitigação de GEE, contribuindo na promoção de atividades agropecuárias ambientalmente sustentáveis. A produção de serapilheira se insere dentre os fatores que contribuem para os maiores valores de estoque de carbono nessas áreas.

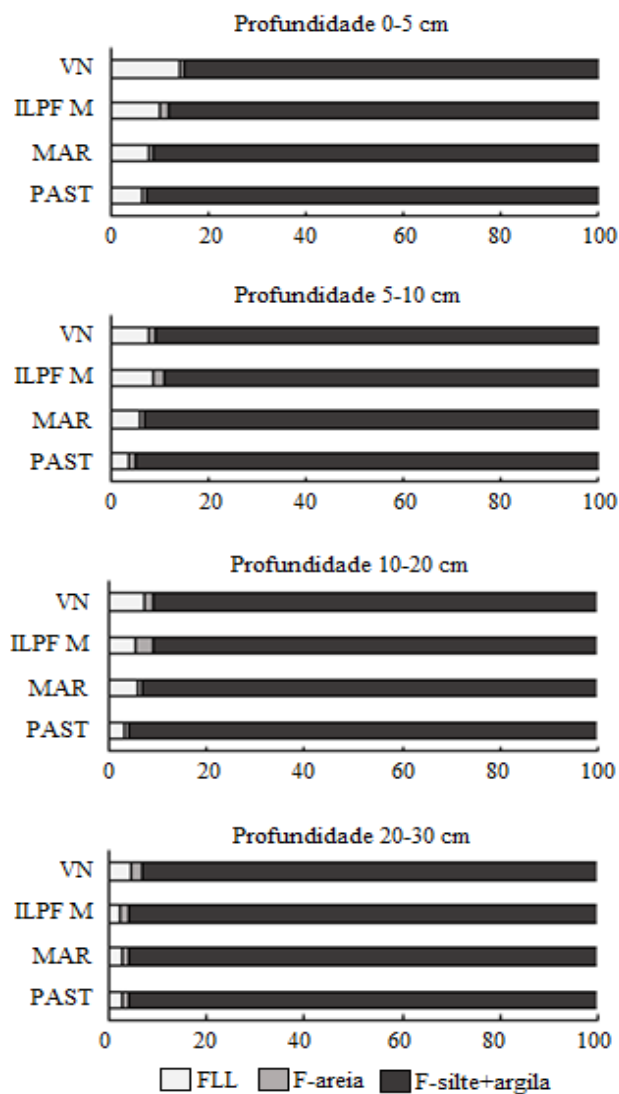
O EstN do solo foi superior em VN nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm, enquanto os sistemas ILPF M e MAR apresentaram EstN semelhantes. Já a PAST obteve EstN igual ao MAR e inferior ao tratamento ILPF M (TABELA 2), observando-se, portanto, possível aumento do EstC com a adoção do sistema integrado. Os valores de EstN na profundidade de 10-20 cm apresentaram-se semelhantes entre VN e os sistemas ILPF M e MAR. Já na camada 20-30 cm de profundidade, todos os sistemas avaliados obtiveram média de EstN do solo inferior à VN.

Ao longo do perfil do solo (0-30 cm), verificou-se que a VN apresentou maior média para o EstN. Sendo assim, não foi possível recuperar os estoques de N do solo dentro do curto período de implantação (13 meses) dos sistemas ILPF M e MAR em relação à condição original de uso do solo (Cerradão), mesmo após a realização de correção e fertilização dessas áreas, anteriormente ocupada por pastagem de baixa produtividade. Silva *et al.* (2011), avaliando os estoques de carbono orgânico total e o nitrogênio total em Latossolo Vermelho distroférico, sob sistema integrado de produção em Maracaju (MS), verificaram que apenas aos oito anos de cultivo os estoques de nitrogênio total do solo foram semelhantes aos observados em vegetação nativa adjacente, com ganhos significativos nos estoques de carbono orgânico total. Verifica-se, portanto, que a recuperação da qualidade do solo está associada ao tempo de adoção de um sistema conservacionista, de forma que as melhorias podem ser observadas com maior tempo de cultivo.

3.3.3 Carbono orgânico nas frações físicas da MOS

Os resultados do fracionamento físico da matéria orgânica do solo (FFMOS) apontaram um elevado percentual de carbono orgânico (CO) associado a F-silte+argila, sendo que o menor percentual de CO estava presente na F-areia (FIGURA 1). Além disso, foi observado, de maneira geral, aumento dos percentuais de CO na F-silte+argila e decréscimos na FLL com o aumento da profundidade, enquanto para a F-areia os percentuais de CO foram menos influenciados pelas profundidades avaliadas.

Figura 1 – Contribuição em percentagem de diferentes frações físicas da matéria orgânica do solo no teor de COT do solo em Curvelo (MG)



Nota: Fração da matéria orgânica leve-livre (FLL), fração do tamanho areia (F-areia) e fração do tamanho silte e argila (F silte+argila). Sistemas: PAST (pastagem em processo de degradação), MAR (monocultivo de capim-marandu), ILPF M (eucalipto consorciado com milho e capim-marandu) e VN (vegetação nativa de Cerradão).

Fonte: Do autor, 2016.

Segundo Roscoe e Machado (2002), a F-argila+silte apresenta, dentre as frações físicas, elevado estágio de decomposição, caracterizando-se por possuir maior tempo de residência no solo e menor potencial de mineralização de carbono devido à presença de compostos mais humificados. Além disso, essa fração é responsável por armazenar maior parte do COT, devido a maior superfície específica e densidade de carga superficial das argilas, contrapondo-se à F-areia. Segundo esses autores, a F-areia apresenta potencial intermediário de mineralização, enquanto a FLL pode ser facilmente decomposta pela microbiota do solo, resultado da sua alta labilidade, pois é composta por resíduos em estágio inicial de decomposição. Assim, a FLL está diretamente relacionada ao suprimento de resíduos orgânicos ao solo, sendo, conseqüentemente, facilmente alterada pelas modificações de manejo e uso do solo. Tal característica corrobora com os maiores percentuais de FLL encontrados nas camadas superficiais do solo do presente estudo, diminuindo em profundidade.

Na camada superficial (0-5 cm), os valores de CO da FLL foram estatisticamente semelhantes entre os sistemas (TABELA 3). Todavia, valores consideravelmente inferiores à VN foram obtidos pelos sistemas estudados, sendo observadas reduções de 63,48%, 75,03% e 82,47%, respectivamente, para o ILPF M, MAR e PAST. Esses resultados indicam melhoria da qualidade do solo no ILPF M, já que a FLL é tida, dentre as frações utilizadas, como a mais susceptível às alterações de uso e manejo, visto sua alta labilidade e conseqüente degradação pelos microrganismos do solo (SIGNOR *et al.*, 2014; KUNDE *et al.*, 2016; CONCEIÇÃO *et al.*, 2014). Vergutz *et al.* (2010) constataram que o sistema agrossilvipastoril estudado promoveu reduções, principalmente, nos teores da fração leve-livre da MOS, porém com tendência de recuperação em sistemas com maior tempo de implantação.

Tabela 3 – Teor de carbono orgânico (CO) das frações matéria orgânica leve livre (FLL), areia (F-areia), silte+argila (F-silte+argila) e carbono orgânico total (COT) sob diferentes sistemas de uso da terra em Curvelo (MG)

Profundidade (cm)	PAST ¹	MAR	ILPF M	VN
CO FLL (g kg ⁻¹)				
0-5	1,32 ± 0,52 ^a	1,88 ± 0,31 a	2,75 ± 1,62 a	7,53 ± 5,79 a
5-10	0,72 ± 0,19 c	1,38 ± 0,32 b	2,25 ± 2,27 ab	3,03 ± 1,06 a
10-20	0,50 ± 0,15 b	1,16 ± 0,62 ab	1,19 ± 0,71 ab	2,16 ± 0,88 a
20-30	0,39 ± 0,39 b	0,37 ± 0,13 b	0,31 ± 0,23 b	0,87 ± 0,24 a
CO F-areia (g kg ⁻¹)				
0-5	0,24 ± 0,10 b	0,25 ± 0,03 b	0,49 ± 0,80 ab	0,51 ± 0,07 a
5-10	0,18 ± 0,01 b	0,24 ± 0,04 b	0,58 ± 1,09 ab	0,46 ± 0,08 a
10-20	0,18 ± 0,02 b	0,21 ± 0,04 b	0,72 ± 1,59 ab	0,46 ± 0,11 a
20-30	0,18 ± 0,04 b	0,20 ± 0,02 b	0,23 ± 0,14 ab	0,35 ± 0,05 a
CO F-silte+argila (g kg ⁻¹)				
0-5	20,18 ± 2,11 b	22,90 ± 0,70 b	23,86 ± 5,52 b	45,00 ± 8,90 a
5-10	18,52 ± 1,15 b	22,44 ± 0,66 ab	24,85 ± 3,60 ab	35,40 ± 8,36 a
10-20	19,03 ± 3,29 a	20,86 ± 2,00 a	19,95 ± 2,48 a	26,77 ± 7,59 a
20-30	16,14 ± 1,84 ab	16,36 ± 0,09 b	15,58 ± 1,63 ab	19,15 ± 2,20 a
COT (g kg ⁻¹)				
0-5	20,98 ± 2,66 b	24,14 ± 0,88 b	26,86 ± 5,14 b	52,59 ± 14,09 a
5-10	18,21 ± 1,73 c	22,71 ± 0,78 b	25,96 ± 4,69 ab	37,93 ± 9,58 a
10-20	16,95 ± 2,23 b	20,41 ± 2,61 ab	21,35 ± 5,04 ab	29,35 ± 8,50 a
20-30	14,76 ± 1,53 ab	15,05 ± 0,77 b	14,15 ± 1,35 b	18,65 ± 2,65 a

¹Sistemas: PAST = Pastagem em processo de degradação; MAR = monocultivo de capim-marandu; ILPF M = Eucalipto consorciado com milho e capim-marandu; VN = vegetação nativa de Cerradão. Médias seguidas pela mesma letra e médias sem letra, na linha, não diferem entre si pelo teste t de Student ao nível de 5% de probabilidade. *Intervalo de confiança.

Fonte: Do autor, 2016.

Na profundidade de 5-10 cm, o sistema ILPF M apresentou teor de CO da FLL semelhante à VN, tendo PAST apresentado o menor valor dentre os

sistemas estudados. Já na camada 10-20 cm de profundidade, ILPF M e MAR apresentaram médias semelhantes à VN.

Santos *et al.* (2013), em estudo sobre dinâmica da MOS em Argissolo Vermelho submetido a diferentes usos no Rio Grande do Sul, verificaram que o sistema agrossilvipastoril utilizado apresentou, na camada superficial, valores de carbono orgânico total e da fração grosseira, denominação utilizada com referência à fração lábil da MOS, semelhantes aos observados no campo nativo, utilizado como referência, demonstrando potencial na manutenção da qualidade do solo. Santos *et al.* (2011a) também observaram resultados semelhantes para o carbono orgânico total e da fração grosseira da MOS entre sistema agrossilvipastoril e vegetação nativa.

Observou-se, na última camada avaliada (20-30 cm), maior valor de CO da FLL em VN e os demais tratamentos não diferiram entre si. Atribui-se tal resultado ao pouco tempo de implantação dos sistemas ILPF M e MAR. Quanto a PAST, a redução do teor de CO da FLL decorreu do longo período de exploração sob ausência de manejo adequado da área, levando à baixa produção de biomassa pela espécie forrageira empregada e consequente redução de transferência de resíduos orgânicos ao sistema.

Os teores de CO da F-areia apresentam comportamento semelhante em todas as profundidades avaliadas. Verificaram-se maiores valores de CO da F-areia em VN quando comparados aos sistemas PAST e MAR. Já o sistema ILPF M apresentou teores de CO da F-areia semelhantes ao Cerradão. Conforme argumentam Roscoe e Machado (2002), esse aumento obtido no ILPF M possivelmente provém da matéria orgânica recentemente depositada ao solo, apresentando-se ainda potencial intermediário de decomposição pelos microrganismos do solo. Com isso, pode-se inferir que o sistema tem contribuído com o aumento das frações mais sensíveis às alterações de manejo, provavelmente em decorrência da maior biodiversidade proporcionada pela integração de diferentes componentes,

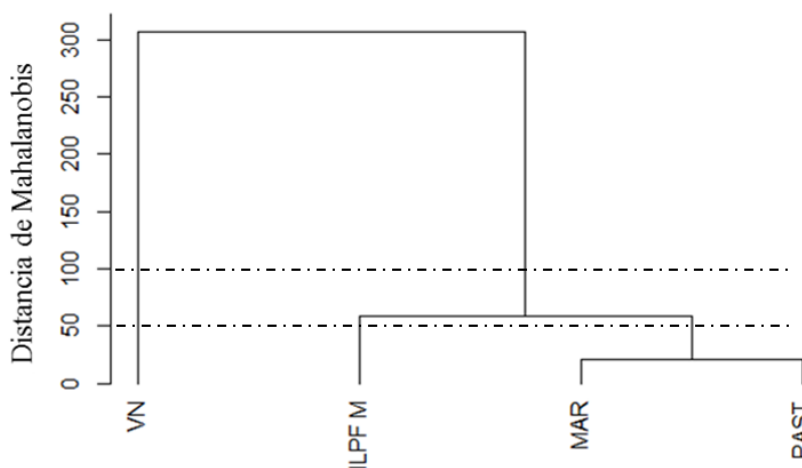
favorecendo a produção e transferência de biomassa vegetal ao solo, apesar do pouco tempo de implantação da área.

O valor de CO da F-silte+argila na camada 0-5 cm de profundidade foi superior em VN. Nas camadas subsuperficiais do solo, os teores de CO foram semelhantes entre VN e ILPF M, já que há menor exposição às variáveis ambientais que, associadas ao menor potencial de mineralização da F-silte+argila, contribuíram para uma maior semelhança dos teores desta fração entre os sistemas estudados. Na camada de 5-10 cm, verificou-se redução do teor de CO da F-silte+argila em PAST e MAR em relação à VN. Na camada 10-20 cm, os teores foram semelhantes entre todos os sistemas avaliados. Já na profundidade 20-30 cm do solo, constatou-se redução apenas do MAR em relação à VN, justificando-se pelo longo período de uso do solo com pastagem extensiva sem manejo adequado e recente revolvimento das camadas do solo durante o preparo para implantação do sistema atual.

3.3.4 Similaridades entre os sistemas de uso do solo

As variáveis utilizadas para a análise de agrupamento permitiram a diferenciação das áreas estudadas a partir dos atributos avaliados (FIGURA 2). Para o conjunto de variáveis analisadas observou-se uma variação significativa nos valores de distância de Mahalanobis entre os sistemas, sendo possível a formação de grupos. Admitindo-se um corte na distância 50, foi possível classificar os dados em três grupos, sendo um grupo constituído pela VN, um grupo constituído pelo sistema ILPF M e um terceiro grupo constituído pelos sistemas MAR e PAST.

Figura 2 – Dendrograma resultante da análise hierárquica de agrupamentos, mostrando a formação de grupos segundo os atributos: carbono orgânico total, nitrogênio total do solo, relação carbono/nitrogênio, estoque de carbono orgânico total, estoque de nitrogênio total e carbono orgânico total das frações matéria orgânica leve livre, areia e silte+argila da camada de 0 a 30 cm de profundidade em áreas de pastagem em processo de degradação (PAST), monocultivo de capim-marandu (MAR), eucalipto consorciado com milho e capim-marandu (ILPF M) e vegetação nativa de Cerradão (VN) em Curvelo (MG)



Fonte: Do autor, 2016.

No grupo formado por mais de um sistema (MAR e PAST), pode-se inferir que os solos apresentaram valores semelhantes quanto aos atributos avaliados, corroborando com resultados discutidos anteriormente. Verificou-se, portanto, que o sistema ILPF M, apesar de uma elevada distância de Mahalanobis apresentada em relação à VN, já obteve melhoria da qualidade do solo comparativamente aos sistemas MAR e PAST.

O incremento no EstC e nos teores de CO da FLL da MOS sob o sistema ILPF M, conforme discutido anteriormente, contribuiu para uma maior similaridade com o sistema VN, assim como para o distanciamento do sistema PAST. No sistema MAR ainda não foi possível observar aumento

suficiente na qualidade do solo para distinção deste em relação à PAST. Portanto, verificou-se o potencial de melhoria da qualidade do solo a partir da conversão de pastagem de baixa produtividade para sistema de produção integrada em curto período de tempo, proporcionada possivelmente pelo aumento na produção de biomassa vegetal em virtude da integração de diferentes componentes (TONUCCI *et al.*, 2011; TORRES *et al.*, 2014).

3.4 CONCLUSÕES

A adoção do sistema agrossilvipastoril contribuiu para recuperação dos estoques de carbono orgânico total ao longo do perfil do solo (0-30 cm), chegando a níveis próximos aos observados em vegetação nativa sem intervenção antrópica.

A utilização de pastagem extensiva mal manejada diminuiu a qualidade do solo, evidenciada pela perda dos teores e estoques de COT e NT do solo.

O teor de CO da fração leve livre da MOS foi semelhante entre o sistema agrossilvipastoril e a vegetação nativa em equilíbrio até a profundidade de 20 cm.

A análise de agrupamentos mostrou que o sistema integrado de produção obteve maior aporte e manutenção da matéria orgânica do solo em relação a MAR e PAST. No entanto, há necessidade de acompanhamento desse sistema para comprovação e detecção de melhorias na qualidade do solo ao longo do tempo.

REFERÊNCIAS

ALVARENGA, R. C.; PORFÍRIO-DA-SILVA, V.; GONTIJO NETO, M. M.; VIANA, M. C. M.; VILELA, L. Sistema Integração Lavoura-Pecuária-Floresta: condicionamento do solo e intensificação da produção de lavouras. **Informe Agropecuário**, v. 31, n. 257, p. 1-9, 2010.

ALVAREZ V., V. H.; NOVAES, R. F.; BARROS, N. F.; CANTARUTTI, R. B.; LOPES, A. S. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARAES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. (Eds.). **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5º Aproximação**. Viçosa: CFSEMG, 1999. p. 25-32.

ARAÚJO, R.; GOEDERT, W. J.; LACERDA, M. P. C. Qualidade de um solo sob diferentes usos e sob cerrado nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 5, p. 1099-1108, 2007.

ARSHAD, M. A.; MARTIN, S. Identifying critical limits for soil quality indicators in agro-ecosystems. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 88, p. 153-160, 2002.

ASSIS, C. P.; OLIVEIRA, T. S.; DANTAS, J. d'A. N.; MENDONÇA, E. S. Organic matter and phosphorus fractions in irrigated agroecosystems in a semi-arid region of Northeastern Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 138, p. 74-82, 2010.

ASSIS, P. C. R.; STONE, L. F.; MEDEIROS, J. C.; MADARI, B. E.; OLIVEIRA, J. M.; WRUCK, F. J. Atributos físicos do solo em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 4, p. 309-316, 2015.

BALBINO, L. C.; CORDEIRO, L. A. M.; PORFIRIO-DA-SILVA, V.; MORAES, A.; MARTÍNEZ, G. B.; ALVARENGA, R. C.; KICHEL, A. N.; FONTANELI, R. S.; SANTOS, H. P.; FRANCHINI, J. C.; GALERANI, P. R. Evolução tecnológica e arranjos produtivos de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 10, p. 1-12, out. 2011a.

BALBINO, L. C.; BARCELLOS, A. O.; STONE, L. F. (Eds.). **Marco referencial: integração lavoura-pecuária-floresta**. Brasília: Embrapa, 2011b.130 p.

BALBINOT JUNIOR, A. A.; MORAES, A.; VEIGA, M.; PELISSARI, A.; DIECKOW, J. Integração lavoura-pecuária: intensificação de uso de áreas agrícolas. **Ciência Rural**, vol. 39, n. 6, p. 1925-1933, 2009.

BALDOTTO, M. A.; VIEIRA, E. M.; SOUZA, D. O.; BALDOTTO, L. E. B. Estoque e frações de carbono orgânico e fertilidade de solo sob floresta, agricultura e pecuária. **Revista Ceres**, v. 62, n. 3, p. 301-309, 2015.

BATJES, N. H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. **European Journal of Soil Science**, v. 47, p. 151-163, 1996.

BELLOTE, A. F. J.; DEDECEK, R. A. Atributos físicos e químicos do solo e suas relações com o crescimento e a produtividade do *Pinus Taeda*. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 53, p. 21-38, 2006.

BEUTLER, A. N.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; FERREIRA, M. M.; CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A. Resistência à penetração e permeabilidade de Latossolo Vermelho distrófico típico sob sistemas de manejo na Região dos Cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 1, p. 167-177, 2001.

BEUTLER, S. J.; PEREIRA, M. G.; LOSS, A.; PERIN, A.; SILVA, C. F. Edaphic attributes of a crop-livestock system in the Cerrado Biome. **Revista Caatinga**, v. 29, n. 4, p. 892-900, 2016.

BICALHO, I. M. Um estudo da densidade do solo em diferentes sistemas de uso e manejo. **Enciclopédia Biosfera**, v. 7, n. 12, p. 1-9, 2011.

BOGNOLA, I. A.; DEDECEK, R. A.; LAVORANTI, O. J.; HIGA, A. R. Influência de propriedade físico-hídricas do solo no crescimento de *Pinus Taeda*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 30, n. 61, p. 37-49, 2010.

BONINI, C. S. B.; LUPATINI, G. C.; ANDRIGHETTO, C.; MATEUS, G. P.; HEINRICH, R.; ARANHA, A. S.; SANTANA, E. A. R.; MEIRELLES, G. C. Produção de forragem e atributos químicos e físicos do solo em sistemas integrados de produção agropecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1695-1698, 2016.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012. 716 p.

BRAGHIROLI, F. L.; SGROTT, A. F.; PESCADOR, R.; UHLMANN, A.; STÜRMER, S. L. Fungos micorrízicos arbusculares na recuperação de florestas ciliares e fixação de carbono no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 3, p. 733-744, 2012.

CALDEIRA, M. V. W.; SILVA, R. D.; KUNZ, S. H.; ZORZANELLI, J. P. F.; CASTRO, K. C.; GODINHO, T. O. Biomassa e nutrientes da serapilheira em diferentes coberturas florestais. **Comunicata Scientiae**, v. 4, n. 2, p. 111-119, 2013.

CALONEGO, J. C.; SANTOS, C. H.; TIRITAN, C. S.; CUNHA JÚNIOR, J. R. Estoques de carbono e propriedades físicas de solos submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Caatinga**, v. 25, n. 2, p. 128-135, 2012.

CARDOSO, E. L.; SILVA, M. L. N.; SILVA, C. A.; CURI, N.; FREITAS, D. A. F. Estoques de carbono e nitrogênio em solo sob florestas nativas e pastagens no bioma Pantanal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 9, p. 1028-1035, 2010.

CARMO, F. F.; FIGUEIREDO, C. C.; RAMOS, M. L. G.; VIVALDI, L. J.; ARAÚJO, L. G. Frações granulométricas da matéria orgânica em Latossolo sob plantio direto com gramíneas. **Bioscience Journal**, v. 28, n. 3, p. 420-431, 2012.

CARVALHO, J. L. N.; RAUCCI, G. S.; CERRI, C. E. P.; BERBOUX, M.; FEIGL, B. J.; WRUCK, F. J.; CERRI, C. C. Impact of pasture, agriculture and crop-livestock systems on soil C stocks in Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 110, p. 175-186, 2010.

CARVALHO, R. P.; DANIEL, O.; DAVIDE, A. C.; SOUZA, F. R. Atributos físicos e químicos de um Neossolo Quartzarênico sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Caatinga**, v. 28, n. 1, p. 148-159, 2015.

CASTRO FILHO, C.; HENKLAIN, J. C. VIEIRA, M.; CASÃO JÚNIOR, R. Tillage methods and soil and water conservation in Southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 20, p. 271-283, 1991.

CHRISTENSEN, B. T. Carbon and nitrogen in particle size fractions isolated from Danish arable soils by ultrasonic dispersion and gravity-sedimentation. **Acta Agriculturae Scandinavica**, London, v. 35, p. 175-187, 1985.

_____. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates. **Advances in Soil Science**, v. 20, p. 1-90, 1992.

CIPRIANO-SILVA, R.; VALLADARES, G. S.; PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C. Caracterização de Organossolos em ambientes de várzea no nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 1, p. 26-38, 2014.

CONCEIÇÃO, P. C.; BAYER, C.; DIECKOW, J.; SANTOS, D. C. Fracionamento físico da matéria orgânica e índice de manejo de carbono de um Argissolo submetido a sistemas conservacionistas de manejo. **Ciência Rural**, v. 44, n. 5, p. 794-800, 2014.

COOK, R. L.; BINKLEY, D.; MENDES, J. C. T.; STAPE, J. L. S. Soil carbon stocks and forest biomass following conversion of pasture to broadleaf and conifer plantations in southeastern Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 324, p. 37-45, 2014.

CORAZZA, E. J.; SILVA, J. E.; RESCK, D. V. S.; GOMES, A. C. Comportamento de diferentes sistemas de manejo como fonte ou depósito de carbono em relação à vegetação de Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 2, p. 425-432, 1999.

CORDEIRO, L. A. M.; BALBINO, L. C.; GALERANI, P. R.; DOMIT, L. A.; SILVA, P. C.; KLUTHCOUSKI, J.; VILELA, L.; MARCHÃO, R. L.; SKORUPA, L. A.; WRUCK, F. J. Transferência de Tecnologias para adoção da estratégia de integração Lavoura-Pecuária-Floresta. In: CORDEIRO, L. A. M.; VILELA, L.; KLUTHCOUSKI, J.; MARCHÃO, R. L. (Eds.). **Integração Lavoura-Pecuária-Floresta: o produtor pergunta, a Embrapa responde**. Brasília, DF: Embrapa, 2015a. p. 377-393. (Coleção 500 Perguntas, 500 Respostas).

CORDEIRO, L. A. M.; VILELA, L.; MARCHÃO, R. L.; KLUTHCOUSKI, J.; MARTHA JÚNIOR, G. B. Integração Lavoura-Pecuária e integração Lavoura-Pecuária-Floresta: estratégias para intensificação sustentável do uso do solo. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 32, p. 15-43, 2015b.

CORSINI, P. C.; FERRAUDO, A. S. Efeitos de sistemas de cultivo na densidade e macroporosidade do solo e no desenvolvimento radicular do milho em Latossolo Roxo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, n. 2, p. 289-298, 1999.

COSTA, N. R.; ANDREOTTI, M.; LOPES, K. S. M.; YOKOBATAKE, K. L.; FERREIRA, J. P.; PARIZ, C. M.; BONINI, C. dos S. B.; LONGHINI, V. Z. Atributos do solo e acúmulo de carbono na integração Lavoura-Pecuária em Sistema Plantio Direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 3, p. 852-863, 2015.

CRUZ, D. L. S.; VALE JÚNIOR, J. F.; CRUZ, P. L. S.; CRUZ, A. B. S.; NASCIMENTO, P. P. R. R. Atributos físico-hídricos de um Argissolo Vermelho Amarelo sob floresta e savana naturais convertidas para pastagem em Roraima. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 1, p. 307-314, 2014.

D'ANDRÉA, A. F.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; GUILHERME, L. R. G. Estoques de carbono e nitrogênio e formas de nitrogênio mineral em um solo submetido a diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 2, p. 179-186, 2004.

DENARDIN, R. B. N.; MATTIAS, J. L.; WILDNER, L. P.; NESI, C. N. N.; SORDI, A.; KOLLING, D. F.; BUSNELLO, F. J.; CERUTTI, T. Estoque de carbono no solo sob diferentes formações florestais, Chapecó - SC. **Ciência Florestal**, v. 24, n. 1, p. 59-69, 2014.

DIEL, D.; BEHLING, M.; FARIAS NETO, A. L.; ISERNHAGEN, E. C. C. Distribuição horizontal e vertical de fósforo em sistemas de cultivos exclusivos de soja e de integração lavoura-pecuária-floresta. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, n. 8, p. 639-647, 2014.

EAGLE, A. J.; OLANDER, L. P.; HENRY, L. R.; HAUGEN-KOZYRA, K.; MILLAR, N.; ROBERTSON, G. P. **Greenhouse gas mitigation potential of agricultural land management in the United States: a synthesis of the literature**. 3. ed. Durham, NC: Nicholas Institute for Environmental Policy Solutions - Duke University. 2012. (Report NI R 10-04).

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

FERREIRA, R. R. M.; TAVARES FILHO, J.; FERREIRA, V. M. Efeitos de sistemas de manejo de pastagens nas propriedades físicas do solo. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 31, n. 4, p. 913-932, 2010.

FIDALGO, E. C. C., BENITES, V. D. M., MACHADO, P. D. A., MADARI, B. E.; COELHO, M.; MOURA, I. B. **Estoque de carbono nos solos do Brasil**. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2007. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, n. 121).

FONTANA, A.; SILVA, C. F.; PEREIRA, M. G.; LOSS, A.; BRITO, R. J.; BENITES, V. M. Avaliação dos compartimentos da matéria orgânica em área de Mata Atlântica. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 33, n. 3, p. 545-550, 2011.

FREITAS, D. A. F.; SILVA, M. L. N.; CARDOSO, E. L.; CURI, N. Índices de qualidade do solo sob diferentes sistemas de uso e manejo florestal e cerrado nativo adjacente. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, n. 3, p. 417-428, 2012.

FREITAS, L.; CASAGRANDE, J. C.; OLIVEIRA, I. A.; MORETI, T. C. F.; CARMO, D. A. B. Avaliação de atributos químicos e físicos de solos com diferentes texturas cultivados com cana-de-açúcar. **Enciclopédia Biosfera**, v. 9, n. 17, p. 362-374, 2013.

GARNETT, T.; APPLEBY, M. C.; BALMFORD, A.; BATEMAN, I. J.; BENTON, T. G.; BLOOMER, P.; BURLINGAME, B.; DAWKINS, M.; DOLAN, L.; FRASER, D.; HERRERO, M.; HOFFMANN, L.; SMITH, P.; THORNTON, P. K.; TOULMIN, C.; VERMEULEN, S. J.; GODFRAY, H. C. J. Sustainable intensification in agriculture: premises and policies. **Science**, v. 341, p. 33-34, 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **BDMEP**: banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa. [2016]. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em: 20 ago. 2016.

JHA, P.; LAKARIA, B. L.; BISWAS, A. K.; SAHA, R.; MAHAPATRA, P.; AGRAWAL, B. K.; SAHI, D. K.; WANJARI, R. H.; LAL, R.; SINGH, M.; RAO, A. S. Effects of carbon input on soil carbon stability and nitrogen dynamics. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 189, p. 36-42, 2014.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 262 p.

KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregates. **Methods of soil analysis**: part 1: physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling. Madison: American Society of Agronomy, 1965. p. 499-510.

KLUTHCOUSKI, J.; CORDEIRO, L. A. M.; VILELA, L.; MARCHÃO, R. L.; SALTON, J. C.; MACEDO, M. C. M.; ZIMMER, A. H.; BALBINO, L. C.; PORFÍRIO-DA-SILVA, V.; MÜLLER, M. Conceitos e modalidades da estratégia de integração Lavoura-Pecuária-Floresta. In: CORDEIRO, L. A. M.; VILELA, L.; KLUTHCOUSKI, J.; MARCHÃO, R. L. (Eds.). **Integração Lavoura-Pecuária-Floresta: o produtor pergunta, a Embrapa responde**. Brasília, DF: Embrapa, 2015. p. 21-33. (Coleção 500 Perguntas, 500 Respostas).

KUNDE, R. J.; LIMA, C. L. R.; SILVA, S. D. A.; PILLON, C. N. Frações físicas da matéria orgânica em Latossolo cultivado com cana-de-açúcar no Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1520-1528, 2016.

LAL, R. Carbon sequestration. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 363, p. 815-830, 2008a.

_____. Forest soils and carbon sequestration. **Forest Ecology and Management**, v. 220, p. 242-258, 2005.

_____. Restoring soil quality to mitigate soil degradation. **Sustainability**, v. 7, p. 5875-5895, 2015.

_____. Soils and sustainable agriculture: a review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 38, p. 57-64, 2008b.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. **Solos sob cerrado**: manejo da fertilidade para a produção agropecuária. São Paulo: ANDA, 1994. 62 p. (Boletim técnico, n. 5).

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; GIÁCOMO, S. G.; PERIN, A.; ANJOS, L. H. C. Agregação, carbono e nitrogênio em agregados do solo sob plantio direto com integração Lavoura-Pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 10, p.1269-1276, 2011.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; SCHULTZ, N.; ANJOS, L. H. C.; SILVA, E. M. R. Atributos químicos e físicos de um Argissolo Vermelho-Amarelo em sistema integrado de produção agroecológica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, n. 1, p. 68-75, 2009.

LOSS, A.; RIBEIRO, E. C.; PEREIRA, M. G.; COSTA, E. M. Atributos físicos e químicos do solo em sistemas de consórcio e sucessão de lavoura, pastagem e silvipastoril em Santa Teresa, ES. **Bioscience Journal**, v. 30, n. 5, p. 1347-1357, 2014.

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

MACHADO, L. V.; RANGEL, O. J. P.; MENDONÇA, E. S.; MACHADO, R. V.; FERRARI, J. L. Fertilidade e compartimentos da matéria orgânica do solo sob diferentes sistemas de manejo. **Coffee Science**, v. 9, n. 3, p. 289-299, 2014.

MAIA, S. M. F.; XAVIER, F. A. S.; OLIVEIRA, T. S.; MENDONÇA, E. S.; ARAÚJO FILHO, J. A. Impactos de sistemas agroflorestais e convencional sobre a qualidade do solo no Semi-Árido Cearense. **Revista Árvore**, v. 30, n. 5, p. 837-848, 2006.

MELLONI, R.; MELLONI, E. G. P.; ALVARENGA, M. I. N.; VIEIRA, F. B. M. V. Avaliação da qualidade de solos sob diferentes coberturas florestais e de pastagem no sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 6, p. 2461-2470, 2008.

MIELNICZUK, J. Matéria orgânica e a sustentabilidade de sistemas agrícolas. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CAMELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2. ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008.

MORAES, M. H.; MÜLLER, M. M. L.; FOLONI, J. S. S. **Qualidade física do solo: métodos de estudo: sistemas de preparo e manejo do solo**. Jaboticabal: Funep, 2002. 225 p.

MOREIRA, F. M.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras: Ed. UFLA, 2006. 729 p.

NAIR, P. K. R.; TONUCCI, R. G.; GARCIA, R.; NAIR, V. D. Silvopasture and carbono sequestration with special reference to the Brazilian Savanna (Cerrado). In: KUMAR, B. M.; NAIR, P. K. R. (Eds.). **Carbon sequestration potential of agroforestry systems: opportunities and challenges**. London: Springer, 2011. p. 145-162.

NEVES, C. M. N.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; MACEDO, R. L. G.; TOKURA, A. M. Estoque de carbono em sistemas agrossilvopastoril, pastagem e eucalipto sob cultivo convencional na região noroeste do Estado de Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 28, n. 5, p. 1038-1046, 2004.

OADES, J. M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. **Plant and Soil**, v. 76, p. 319-337, 1984.

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

PINHEIRO, É. F. M. **Fracionamento físico e caracterização da matéria orgânica do solo sob diferentes coberturas vegetais**. 2007. 98 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Instituto de Agronomia, Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2007.

PORTUGAL, A. F.; JUNCKSH, I.; SCHAEFER, C. E. R. G.; NEVES, J. C. L. Estabilidade de agregados em Argissolo sob diferentes usos, comparado com mata. **Revista Ceres**, v. 57, n. 4, p. 545-553, 2010.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, 2016. Versão 3.3.0. (URL <https://www.R-project.org/>).

RANGEL, O. J. P.; SILVA, C. A. Estoques de carbono e nitrogênio e frações orgânicas de Latossolo submetido a diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 6, p. 1609-1623, 2007.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência e Ambiente**, v. 26, p. 26-48, 2003.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. **Tópicos em Ciência do Solo**, v. 5, p. 49-134, 2007.

REINERT, D. J.; ALBUQUERQUE, J. A.; REICHERT, J. M.; AITA, C.; ANDRADA, M. M. C. Limites críticos para densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 5, p. 1805-1816, 2008.

ROSCOE, R.; MACHADO, P. L. O. A. **Fracionamento físico do solo em estudos da matéria orgânica**. Dourados: EMBRAPA Agropecuária Oeste; Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2002. 86 p.

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; BOENI, M.; CONCEIÇÃO, P. C.; FABRÍCIO, A. C.; MACEDO, M. C. M.; BROCH, D. L. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 1, p. 11-21, 2008.

SALTON, J. C.; OLIVEIRA, P.; TOMAZI, M.; RICHETTI, A.; BALBINO, L. C.; FLUMIGNAM, D.; MERCANTE, F. M.; MARCHÃO, R. L.; CONCENÇO, G.; SCORZA JUNIOR, R. P.; ASMUS, G. L. Benefícios da adoção da estratégia de integração Lavoura-Pecuária-Floresta. In: CORDEIRO, L. A. M.; VILELA, L.; KLUTHCOUSKI, J.; MARCHÃO, R. L. (Eds.). **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.; FARIAS, M. O.; LIMA, C. L. R.; KUNDE, R. J.; PILLON, C. N.; FLORES, C. A. Fracionamento químico e físico da matéria orgânica de um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso. **Ciência Rural**, v. 43, n. 5, p. 838-844, 2013.

SANTOS, D. C.; PILLON, C. N.; FLORES, C. A.; LIMA, C. L. R.; CARDOSO, E. M. C.; PEREIRA, B. F.; MANGRICH, A. S. Agregação e frações físicas da matéria orgânica de um argissolo vermelho sob sistemas de uso no Bioma Pampa. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 35, n. 5, p. 1735-1744, 2011a.

SANTOS, H. P.; FONTANELI, R. S.; SPERA, S. T.; DREON, G. Fertilidade e teor de matéria orgânica do solo em sistemas de produção com integração lavoura e pecuária sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 6, n. 3, p. 474-482, 2011b.

SANTOS, H. P.; FONTANELI, R. S.; TOMM, G. O. Efeito de sistemas de produção de grãos e de pastagens sob plantio direto sobre o nível de fertilidade do solo após cinco anos. **Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 3, p. 645-653, 2001.

SANTOS, R. S. M.; OLIVEIRA, I. P.; MORAIS, R. F.; URQUIAGA, S. C.; BODDEY, R. M.; ALVES, B. J. R. Componentes da parte aérea e raízes de pastagens de *Brachiaria* spp. em diferentes idades após a reforma, como indicadores de produtividade do ambiente cerrado. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 37, n. 2, p. 119-124, 2007.

SELLE, G. L. Ciclagem de nutrientes em Ecossistemas Florestais. **Bioscience Journal**, v. 23, n. 4, p. 29-39, 2007.

SIGNOR, D.; ZANI, C. F.; PALADINI, A. P.; DEON, M. D.; CERRI, C. E. P. Estoques e qualidade da matéria orgânica do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 5, p. 1402-1410, 2014.

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. **AGROTEC: Revista Agropecuária Técnica**, v. 37, n. 1, p. 96-104, 2016.

SILVA, A. S.; SILVA, I. F.; BANDEIRA, L. B.; DIAS, B. O.; SILVA NETO, L. F. Argila e matéria orgânica e seus efeitos na agregação em diferentes usos do solo. **Ciência Rural**, v. 44, n. 10, p.1783-1789, 2014.

SILVA, E. F.; LOURENTE, E. P. R.; MARCHETTI, M. E.; MERCANTE, F. M.; FERREIRA, A. K. T.; FUJII, G. C. Frações lábeis e recalcitrantes da matéria orgânica em solos sob integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 10, p. 1321-1331, 2011.

SILVA, I. R. S.; MENDONÇA, E. S. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Eds.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 275-374.

SILVA, L. B.; DICK, D. P.; INDA JUNIOR, A. V. Solos subtropicais de altitude: atributos químicos, teor de matéria orgânica e resistência à oxidação química. **Ciência Rural**, v. 38, n. 4, p. 1167-1171, 2008.

SILVA, M. A. S.; MAFRA, A. L.; ALBUQUERQUE, A.; ROSA, J. D.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Propriedades físicas e carbono orgânico de um Argissolo Vermelho sob distintos sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 2, p. 329-337, 2006.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Brasília, DF: EMBRAPA Informação Tecnológica, 2004. 416 p.

SOUSA, D. M. G.; MARTHA JÚNIOR, G. B.; VILELA, L. Adubação fosfatada. In: MARTHA JÚNIOR, G. B.; VILELA, L.; SOUSA, D. M. G. (Eds.). **Cerrado: uso eficiente de corretivos e fertilizantes em pastagens**. Planaltina: EMBRAPA Cerrados. 2007. p.145-178.

SOUSA NETO, E. L.; ANDRIOLI, I.; ALMEIDA, R. G.; MACEDO, M. C. M.; LAL, R. Physical quality of an Oxisol under an integrated crop-livestock-forest system in the Brazilian Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 2, p. 608-618, 2014.

SOUTO, P. C.; SOUTO, J. S.; SANTOS, R. V.; ARAÚJO, G. T.; SOUTO, L. S. Decomposição de esterco dispostos em diferentes profundidades em área degradada no Semi-Árido da Paraíba. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 1, p. 125-130, 2005.

SPERA, S. T.; SANTOS, H. P.; FONTANELI, R. S.; TOMM, G. O. Atributos físicos de um Hapludox em função de sistemas de produção integração lavoura-pecuária (ILP), sob plantio direto. **Maringá**, v. 32, n. 1, p. 37-44, 2010.

STEFANOSKI, D. C.; SANTOS, G. G.; MARCHÃO, R. L.; PETTER, F. A.; PACHECO, L. P. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 12, p. 1301-1309, 2013.

STOCKMANN, U.; ADAMS, M. A.; CRAWFORDA, J. W.; FIELDA, D. J.; HENAKAARCHCHI, N.; JENKINS, M.; MINASNYA, B.; MCBRATNEYA, A. B.; COURCELLES, V. R.; SINGHA, K.; WHEELER, I.; ABBOTT, L.; ANGERS, D. A.; BALDOCK, J.; BIRDE, M.; BROOKES, P. C.; CHENUG, C.; JASTROWH, J. D.; LAL, R.; LEHMANN, J.; O'DONNELL, A. G.; PARTON, W. J.; WHITEHEAD, D.; ZIMMERMANN, M. The knowns, know nunknowns and of sequestration of soil organic carbon. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 164, p. 80-99, 2013.

STONE, L. F.; DIDONET, A. D.; ALCÂNTARA, F.; FERREIRA, E. P. B. Qualidade física de um Latossolo Vermelho ácrico sob sistemas silviagrícolas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 10, p. 953-960, 2015.

TONUCCI, R. G.; NAIR, P. K. R.; NAIR, V. D.; GARCIA, R.; BERNARDINO, F. S. Soil carbon storage in silvopasture and related land-use systems in the brazilian cerrado. **Journal of Environmental Quality**, v. 40, p. 833-841, 2011.

TORRES, C. M. M. E.; JACOVINE, L. A. G.; NETO, S. M. O.; BRIANEZI, D.; ALVES, E. B. B. M. Sistemas agroflorestais no Brasil: uma abordagem sobre a estocagem de carbono. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 34, n. 79, p. 235-244, 2014.

USUGA, J. C. L.; TORO, J. A. R.; ALZATE, M. V. R.; TAPIAS, A. J. L. Estimation of biomass and carbon stocks in plants, soil and forest floor in different tropical forests. **Forest Ecology and Management**, v. 260, p. 1906-1913, 2010.

VERGUTZ, L.; NOVAIS, R. F.; SILVA, I. R.; BARROS, N. F.; NUNES, T. N.; PIAU, A. A. M. Mudanças na matéria orgânica do solo causadas pelo tempo de adoção de um sistema agrossilvopastoril com eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 1, p. 43-57, 2010.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Agregação e estoques de carbono em Argissolo submetido a diferentes práticas de manejo agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 1, p. 213-223, 2011.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 4, p. 743-755, 2009.

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

WAUTERS, J. B.; COUDERT, S.; GRALLIEN, E.; JONARD, M.; PONETTE, Q. Carbon stock in rubber tree plantations in Western Ghana and Mato Grosso (Brazil). **Forest Ecology and Management**, v. 255, p. 2347-2361, 2008.

WENDLING, B.; JUCKSCH, I.; MENDONÇA, E. S.; VINHAL-FREITAS, I. C. Mudanças no carbono e nitrogênio em diferentes compartimentos da matéria orgânica sob sistema agrossilvopastoril. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 4, p. 641-653, 2011.