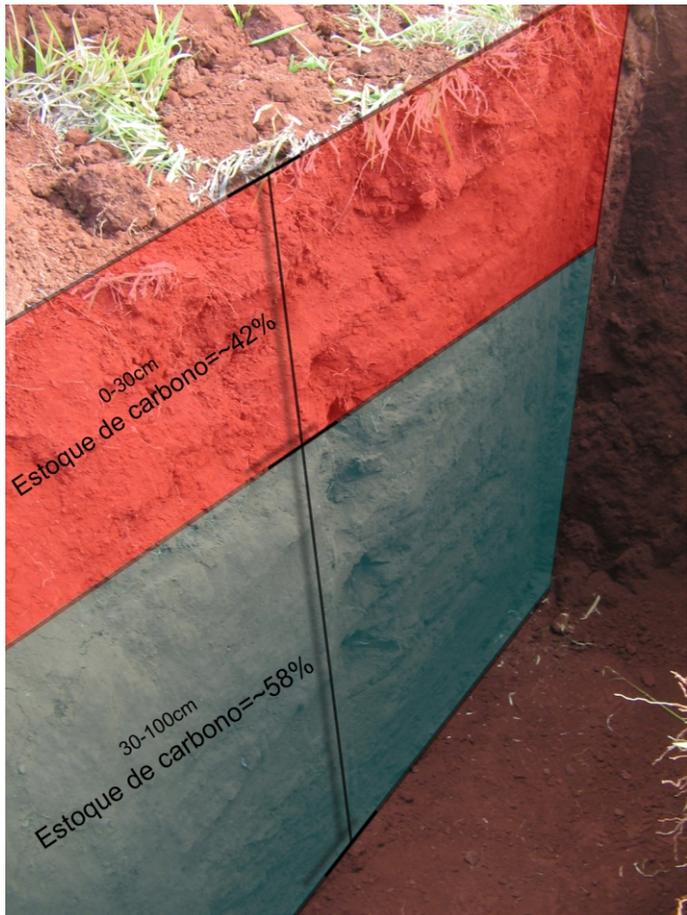


Avaliação de estoques de carbono e grau de humificação da matéria orgânica do solo em diferentes tipos de pastagens tropicais



*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Instrumentação
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 42

Avaliação de estoques de carbono e grau de humificação da matéria orgânica do solo em diferentes tipos de pastagens tropicais

Alfredo Augusto Pereira Xavier
Aline Segnini
Pedro Luis Otaviani-Junior
Patrícia Perondi Anchão Oliveira
André de Faria Pedroso
Maria Fernanda Ferreira Menegucci Praes
Paulo Henrique Mazza Rodrigues
Ladislau Martin-Neto
Débora Marcondes Bastos Pereira Milori

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Instrumentação

Rua XV de Novembro, 1452

Caixa Postal 741

CEP 13560-970 São Carlos, SP

Fone: (16) 2107 2800

Fax: (16) 2107 2902

www.embrapa.br

www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Unidade responsável pelo conteúdo e edição

Embrapa Instrumentação

Comitê de Publicações

Presidente

Wilson Tadeu Lopes da Silva

Secretária-executiva

Maria do Socorro Gonçalves de Souza Monzane

Membros

Carlos Renato Marmo

Cíntia Cabral da Costa

Cristiane Sanchez Farinas

Elaine Cristina Paris

Maria Alice Martins

Paulo Renato Orlandi Lasso

Normalização bibliográfica

Maria do Socorro Gonçalves de Souza Monzane

Imagem da capa

Alfredo Augusto Pereira Xavier

Capa, editoração eletrônica e

tratamento das ilustrações

Valentim Monzane

1ª edição

1ª impressão (2018): 100 exemplares

Todos os direitos reservados

A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados internacionais de Catalogação na publicação (CIP)

Embrapa Instrumentação

-
- X3bp&d Xavier, Alfredo Augusto Pereira
Avaliação de estoques de carbono e grau de humificação da matéria orgânica do solo em diferentes tipos de pastagens tropicais / Alfredo Augusto Pereira Xavier, Débora Marcondes Bastos Pereira Milori. São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação, 2018.
30 p. – (Embrapa Instrumentação. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, ISSN: 1678-0434; 42).
1. Bioma da floresta atlântica. 2. Sistemas de pecuária brasileiros. 3. Laser induced fluorescence spectroscopy. 4. Grau de humificação. 5. Matéria orgânica. I. Xavier, A. A. P. II. Milori, D. M. B. P. III. Título. IV. Série.

CDD 21 ED 631.4

© Embrapa 2018

Sumário

Resumo	5
Abstract	7
Introdução	9
Revisão da Literatura	11
Métodos e dados	12
Área de estudo e amostragem do solo	12
Preparação de amostras de solo e determinações	15
estoques de carbono	
Índice de humificação da Matéria Orgânica do Solo	15
Resultados e discussão	16
Densidade e teores de carbono do solo	16
Estoques de carbono no solo	19
Humificação da matéria orgânica do solo	21
Conclusões	23
Referências	24

Avaliação de estoques de carbono e grau de humificação da matéria orgânica do solo em diferentes tipos de pastagens tropicais

Alfredo Augusto Pereira Xavier¹

Aline Segnini²

Pedro Luis Otaviani-Junior³

Patrícia Perondi Anchão Oliveira⁴

André de Faria Pedroso⁵

Maria Fernanda Ferreira Menegucci Praes⁶

Paulo Henrique Mazza Rodrigues⁷

Ladislau Martin-Neto⁸

Débora Marcondes Bastos Pereira Milori⁹

Resumo

O manejo de pastagens tropicais tem mostrado potencial para a mitigação dos gases do efeito estufa (GEE) por conta da geração de um acúmulo de carbono (C) no solo. Este estudo teve como objetivo avaliar diferentes sistemas de manejo de pastagens do ponto de vista de estoques de carbono (ECs) e a humificação da matéria orgânica do solo (MOS). Pastagens em quatro sistemas de produção de bovinos de corte foram avaliadas: pastagem intensiva e irrigada com alta taxa de lotação (IHS); pastagem de sequeiro com alta taxa de lotação (DHS); pastagem de sequeiro com moderada taxa de lotação (DMS); pastagem degradada (DP). O solo sob a mata nativa também foi avaliado como sendo o tratamento de referência. Os ECs do solo dos 0-100 e camadas de 0-30 cm foram avaliadas. Os ECs (0-100 cm) variaram de 99,88 a 142,33 Mg ha⁻¹ em DP e DMS, respectivamente, e foram, respectivamente, 14% e 24% maiores em relação ao solo sob floresta o que indica capacidade de pastagens tropicais adequadamente manejadas mitigar as emissões de GEE da produção pecuária. Os índices de humificação indicaram a presença de C mais lábil em pastagens com maior acúmulo de C (DHS e DMS), principalmente nas camadas superiores

¹Embrapa Instrumentação, São Carlos, SP, Brasil. alfredoapxavier@gmail.com

²Embrapa Instrumentação, São Carlos, SP, Brasil

³Embrapa Instrumentação, São Carlos, SP, Brasil

⁴Embrapa Instrumentação, São Carlos, SP, Brasil

⁵Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos, SP – Brasil

⁶Universidade de São Paulo, Departamento de Nutrição e Produção Animal, Pirassununga, SP – Brasil

⁷Universidade de São Paulo, Departamento de Nutrição e Produção Animal, Pirassununga, SP – Brasil

⁸Física, Doutora em Física, pesquisadora na Embrapa Instrumentação, São Carlos, SP,

⁹Física, Doutora em Física, pesquisadora na Embrapa Instrumentação, São Carlos, SP, debora.milori@embrapa.br

do solo, indicando acúmulo recente de C resultante do manejo correto. No entanto, o C mais labial pode ser facilmente perdido para CO₂, dependendo do manejo das pastagens. Baixos ECs estão associados a altos índices de humificação foram característicos em DP, nos quais quantidades significativas de MOS foram perdidas. É necessário desenvolver tecnologias para melhorar o sequestro de C em IHS e os resultados indicam a importância de quantificar os ECs em associação com a estabilidade de C.

Palavras-chave: Bioma da floresta atlântica, Sistemas de pecuária brasileiros, Laser-Induced Fluorescence Spectroscopy, grau de humificação, matéria orgânica.

Evaluation of carbon stocks and humification degree of soil organic matter in different types of tropical pastures.

Abstract

Intensive management of tropical pastures has shown potential for greenhouse gas (GHG) mitigation due to high forage production and C accumulation in the soil. This study aimed to evaluate different pasture management options in relation to their effect on soil C stocks and soil organic matter (SOM) humification. Pastures in four beef cattle production systems were assessed: intensive and irrigated pasture with high stocking rate (IHS); dryland pasture with high stocking rate (DHS); dryland pasture with moderate stocking rate (DMS); degraded pasture (DP). The soil under the native forest was also evaluated and soil carbon stocks from the 0-100 and 0-30 cm layers were assessed. Carbon stocks (0-100 cm) ranged from 99.88 to 142.33 Mg ha⁻¹ in DP and DMS, respectively and were, respectively, 14 % and 24 % higher compared to the soil under the forest and indicate the capacity of adequately managed tropical pastures to mitigate GHG emissions from livestock production. Humification indexes indicated the presence of more labile C in pastures with greater C accumulation (DHS and DMS), mainly in the upper soil layers, indicating recent C accumulation resulting from correct management. However, more labile C can be easily lost to the atmosphere as CO₂, depending on pasture management. Low C stocks associated with high humification indexes are characteristics of DP in which significant amounts of SOM are lost. It is necessary to develop technologies to improve C sequestration in IHS and results indicate the importance of quantifying C stocks in association with C stability.

Keywords: Atlantic Forest biome, Brazilian livestock systems, Laser-Induced Fluorescence Spectroscopy, humification index, organic matter

Introdução

Em 1988, a Organização Meteorológica Mundial (World Meteorological Organization - WMO) e o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (United Nations Environment Programme - UNEP) criaram o IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), cuja função é avaliar as mudanças climáticas, fornecer ao mundo uma visão científica clara sobre a atual situação climática do planeta, bem como os potenciais impactos ambientais e socioeconômicos, visando criar mecanismos para a adaptação e mitigação dos efeitos das mudanças climáticas globais (IPCC, 1988)

A atmosfera terrestre é composta por vários gases tais como o metano (CH₄), o óxido nitroso (N₂O) e o gás carbônico (CO₂) sendo alguns deles, como o CO₂, capazes de absorver parte da radiação infravermelha resultante do aquecimento da superfície terrestre pelo sol. Em seguida esses gases emitem a radiação infravermelha de volta para a superfície terrestre. O resultado deste processo é um confinamento dessa radiação na atmosfera da Terra, o que eleva a temperatura média do planeta.

O efeito estufa é um fenômeno climático natural responsável pela manutenção da temperatura no planeta e sem os gases do efeito estufa (GEE) a temperatura da Terra seria da ordem de -14 °C. Porém esse efeito vem sendo intensificado devido ao aumento dos GEE na atmosfera os quais impedem que a radiação infravermelha se dissipe para a estratosfera e seja refletida de volta para a Terra.

O aquecimento global é um evento climático de larga extensão, responsável pelo aumento da temperatura média superficial global ocorrido nos últimos 150 anos e por outras Mudanças Climáticas Globais (MCG). A razão deste aumento de temperatura ainda é objeto de muitos debates na comunidade científica. Segundo a maioria dos cientistas uma das hipóteses para o aumento da temperatura global que vem sendo registrado é o aumento da concentração de GEE.

A Revolução Industrial, iniciada em meados do século XVIII, levou a um aumento drástico na concentração atmosférica de dióxido de carbono (CO₂) devido à queima de combustíveis fósseis, ao desmatamento das florestas e a expansão da agricultura. Foi registrado a maior taxa de crescimento anual médio da concentração de 1,9 ppm por ano (1995 a 2005) desde o início das medições atmosféricas diretas contínuas (média de 1,4 ppm por ano entre 1960 a 2005). Nos dias de hoje a concentração de CO₂ na atmosfera atinge a marca de 400 ppm segundo os últimos relatórios, 40% maior do que a concentração na era pré-industrial (AVILA, 2007).

Além do CO₂, também vem ocorrendo o aumento significativo na concentração de outros GEE como o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O) os quais estão vinculados às práticas agrícolas.

Em 2001, o Terceiro Relatório de Avaliação do IPCC divulgou um aumento de mais de 0,6 °C na temperatura média global. Também foi constatado o aumento da temperatura dos oceanos devido ao calor absorvido da atmosfera, promovendo o derretimento das geleiras, bem como a expansão da água do mar, o que resulta na elevação de seu nível. Em fevereiro de 2007 o IPCC divulgou os resultados do seu Quarto Relatório de Avaliação das Mudanças Climáticas do planeta e nele foi estimado que a temperatura média do planeta poderá ter um aumento médio entre 1,4 °C e 5,8 °C até o ano de 2100, a menos que medidas enérgicas sejam tomadas (AVILA, 2007). Em setembro de 2013, o IPCC publicou o último relatório (Assessment Report - AR5) mostrando que o nível do mar subiu 19 cm entre 1901 e 2010 e, em previsão extrema, podendo ficar 82 cm mais alto até 2100 se o aquecimento continuar (CHANGE, 2013).

O carbono do planeta está distribuído em cinco principais reservatórios. São eles: a biota, compreendendo toda a parte de carbono presente na biomassa terrestre, o carbono geológico formado carvão mineral, petróleo e gás, o solo (carbono orgânico e inorgânico), a atmosfera e os oceanos. Logo, o setor agropecuário pode ser uma aliada importante para a mitigação da concentração de CO₂ na atmosfera. Pela fotossíntese os vegetais podem-se converter o CO₂ da atmosfera em massa vegetal e, além disso, por meio de um manejo adequado desta massa pode-se reter parte do carbono no solo. Esse mecanismo é classificado como "sequestro de carbono" da atmosfera pelo solo (LAL, 2004a; c; b; 2008), sendo assim os solos são os principais absorventes, depositários e liberadores de carbono orgânico e podem atuar como fonte ou dreno de carbono para a atmosfera, dependendo das condições naturais e, sobretudo, do tipo de manejo adotado (ZANATTA, BAYER *et al.*, 2007).

No cenário mundial, o Brasil é um dos países mais importantes na pecuária. Em termos de quantidade de cabeças de gado, encontra-se na liderança. Desta forma, atento ao cenário de mudanças climáticas, o Brasil firmou um compromisso internacional de melhorar este sistema produtivo através da redução da emissão dos GEE e através do sequestro de carbono pelo solo resultando num balanço de carbono positivo, tornando a pecuária brasileira mais sustentável ambientalmente. Segundo a Organização das Nações Unidas (ONU), a pecuária é responsável por 14,5% das emissões de GEE provocadas pelo homem (RURAL, 2014).

Sendo assim, há necessidade de se avaliar o balanço entre carbono e nitrogênio em pastagens degradadas vs pastagens recuperadas (OLIVEIRA, 2008) e intensificadas em diferentes intensidades de uso, no sentido de verificar o melhor equilíbrio entre os malefícios ambientais das perdas nitrogenadas decorrentes do uso de fertilizantes e os benefícios do efeito de mitigação dos gases de efeito estufa. Mais que isso, estudos de variabilidade espacial, verticalização e caracterizações do solo em profundidades de até 1 metro têm mostrado resultados interessantes, principalmente quando se trata de espécies de gramíneas com sistema radicular abundante, com incorporação de carbono em profundidade (JANTALIA, TARRÉ *et al.*, 2006; SEGNINI, 2007; BODDEY, JANTALIA *et al.*, 2010).

O enfoque principal desse trabalho está relacionado à sustentabilidade da pecuária brasileira e à avaliação de pastagens bem manejadas pelo entendimento do acúmulo e da estabilidade de carbono em diferentes situações de pastagens. A recuperação direta e a adoção do manejo intensivo das pastagens têm apresentado potencial de mitigação dos gases de efeito estufa devido à elevada produção de massa de forragem das gramíneas tropicais com eficiência de uso de fertilizantes nitrogenados e ao acúmulo de matéria orgânica no solo.

Revisão da Literatura

O governo brasileiro se comprometeu a implementar políticas para reduzir as emissões dos gases do efeito estufa (GEE) no setor pecuário até 2020 (NEPSTAD, SOARES-FILHO *et al.*, 2009). O manejo intensivo de gramíneas tropicais tem mostrado potencial de mitigação de GEE como consequência da alta produtividade dessas pastagens quando fertilizadas, o que resulta em acúmulo de carbono (C) no solo (OLIVEIRA, BERCHIELLI *et al.*, 2007a; BUSTAMANTE, NOBRE *et al.*, 2012; ONTL e SCHULTE, 2012; RUVIARO, DE LÉIS *et al.*, 2015). Além disso, o manejo fisiológico adequado de gramíneas tropicais (CONANT, PAUSTIAN *et al.*, 2001) e a manutenção da fertilidade do solo são práticas agrônomicas essenciais para restaurar e intensificar pastagens degradadas (OLIVEIRA, BOARETTO *et al.*, 2003; OLIVEIRA e CORSI, 2005; OLIVEIRA, 2008; SANTOS e CORRÊA, 2009).

O governo brasileiro se comprometeu a implementar políticas para reduzir as emissões dos gases do efeito estufa (GEE) no setor pecuário até 2020 (NEPSTAD, SOARES-FILHO *et al.*, 2009). O manejo intensivo de gramíneas tropicais tem mostrado potencial de mitigação de GEE como consequência da alta produtividade dessas pastagens quando fertilizadas, o que resulta em acúmulo de carbono (C) no solo (OLIVEIRA, BERCHIELLI *et al.*, 2007a; BUSTAMANTE, NOBRE *et al.*, 2012; ONTL e SCHULTE, 2012; RUVIARO, DE LÉIS *et al.*, 2015). Além disso, o manejo fisiológico adequado de gramíneas tropicais (CONANT, PAUSTIAN *et al.*, 2001) e a manutenção da fertilidade do solo são práticas agrônomicas essenciais para restaurar e intensificar pastagens degradadas (OLIVEIRA, BOARETTO *et al.*, 2003; OLIVEIRA e CORSI, 2005; OLIVEIRA, 2008; SANTOS e CORRÊA, 2009).

A determinação do teor de C é imperativa para qualquer avaliação do impacto do manejo de pastagens nos solos. Segundo (BRAZ, URQUIAGA *et al.*, 2013), as pastagens bem manejadas podem aumentar os estoques de C (ECs) no solo, enquanto os solos sob pastagens mal manejadas ou degradadas podem perder C em comparação aos solos sob a vegetação original. Estudos da variabilidade espacial do C na profundidade de 1m mostraram incorporação profunda em pastagens sob manejo adequado (FISHER, RAO *et al.*, 1994; BODDEY, JANTALIA *et al.*, 2010). Espécies de gramíneas com abundantes sistemas radiculares durante os processos de recuperação e intensificação de pastagens parecem ser a razão desse comportamento (OLIVEIRA, TRIVELIN *et al.*, 2007b).

A irrigação é outro fator que deve ser avaliado em relação à dinâmica do solo C. O tipo de solo, a cultura e o método de preparo do solo estão entre os fatores que podem modificar o efeito da irrigação nos ECs do solo (BAYER, MARTIN-NETO *et al.*, 2006). O aumento do teor de água no solo, causado pela irrigação, propicia condições favoráveis à atividade microbiana, intensificando a decomposição da matéria orgânica (MO) microbiana e a mineralização do carbono (ANDRÉN, STEEN *et al.*, 1992). Embora as respostas das culturas à suplementação hídrica sejam bem conhecidas, informações sobre os efeitos da irrigação sobre a matéria orgânica do solo (MOS) e ECs em áreas tropicais quentes são escassas.

O potencial das pastagens reterem C envolvendo a estabilidade da MOS é um aspecto importante na identificação de alternativas de mitigação de GEE para o setor pecuário no Brasil. No entanto, poucos estudos avaliaram o potencial de mitigação de pastagens por meio do aumento do sequestro em sistemas de produção animal no bioma da Mata Atlântica (BODDEY, 2006; ASSAD, PINTO *et al.*, 2013).

O principal objetivo deste estudo foi avaliar os efeitos da degradação, recuperação e intensificação de pastagens de sistemas de produção de bovinos de corte sobre os ECs no solo e a humificação da MOS no bioma Mata Atlântica. Foi realizado um estudo comparativo dos ECs de C nas camadas 0-30 e 0-100 cm do solo com o objetivo de avaliar o potencial de sequestro de C em camadas mais profundas no solo, bem como a avaliação da estabilidade da MOS em ambos os perfis.

Métodos e dados

Área de estudo e amostragem do solo

O estudo foi realizado no Centro de Pesquisa Pecuária Sudeste da Embrapa, em São Carlos, SP, Brasil. O clima predominante é o Cwa, segundo a classificação de Koeppen, com temperatura média anual de 20°C e precipitação média anual de cerca de 1.360 mm.

As amostras de solo foram coletadas em sistemas de pastagens e na vegetação original (Mata Atlântica - Floresta Estacional Sem decidual) em uma zona de transição de dois tipos de solo: Latossolo Vermelho e Latossolo Amarelo, ambos Oxisols segundo o sistema de classificação da FAO.

Foram avaliados quatro sistemas de produção de bovinos de corte, contendo duas repetições por sistema (blocos), conforme descrito: Pastagem irrigada de *Megathyrus (Panicum) maximum Jacques* (Tanzânia) com alta taxa de lotação (IHS); Pastagem de sequeiro *Megathyrus (Panicum) maximum Jacques* (cv. Tanzânia) com alta taxa de lotação (DHS); Pastagem de sequeiro com uma mistura de gramíneas *Urochloa (Brachiaria) decumbens* Stapf (cv. Basilisk) and *Urochloa (Brachiaria)brizantha (Hochst ex A. Rich) Stapf* (cv. Marandu) com moderada taxa de lotação (DMS); Pastagem degradada de *Urochloa (Brachiaria) decumbens* sob manejo extensivo (DP) (Figura 1).

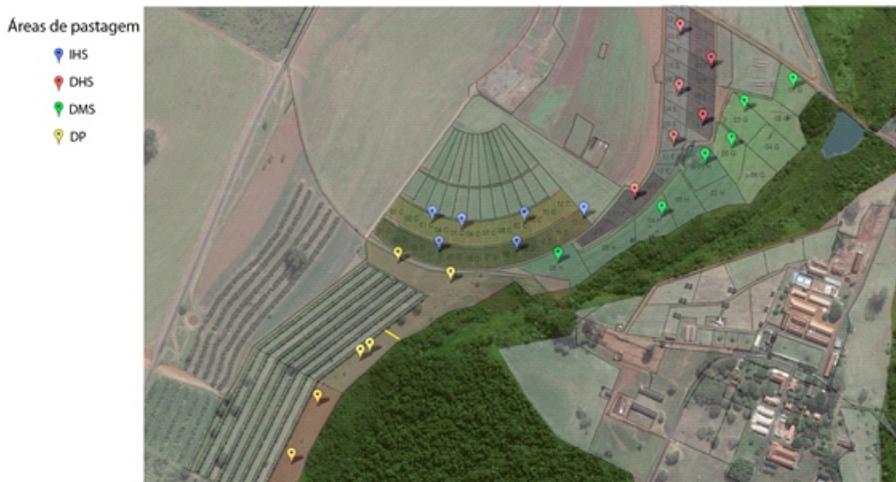


Figura 1 - Áreas de pastagens estudadas. IHS - Pastagem irrigada de *Megathyrus (Panicum) maximum Jacques* (cv. Tanzânia) com alta taxa de lotação; DHS - Pastagem de sequeiro de *Megathyrus (Panicum) maximum Jacques* (cv. Tanzânia) com alta taxa de lotação; DMS - Pastagem de sequeiro de *Urochloa (Brachiaria) decumbens Stapf* (cv. Basilisk) com moderada taxa de lotação; DP - Pastagem degradada de *Urochloa (Brachiaria) decumbens Stapf* (cv. Basilisk) sob manejo extensivo.

A pastagem tropical (*Panicum sp*) em IHS foi semeada com aveia (*Avena bysantina Koch*, cv. São Carlos) e azevém (*Lolium multiflorum Lam.*, Cv. BRS Ponteio) no outono. As pastagens intensivamente manejadas (estabelecidas em 2002) foram divididas em 12 piquetes (0,14 a 0,15 ha cada) que foram pastejados por três dias, em sistema de pastejo rotacionado com 36 dias de descanso. Cada pasto de DMS (estabelecido em 1996) foi dividido em seis piquetes (0,55 ha cada) que foram pastejados durante seis dias, também num sistema rotativo (30 dias de descanso). As pastagens degradadas (dois piquetes de 1,7 ha) foram mantidas sob pastejo contínuo. Os pastos foram manejados sob taxa de lotação variável ("put and take"). As taxas de lotação foram ajustadas de acordo com a disponibilidade de forragem visualmente estimada em cada piquete. Todas as pastagens (exceto DP) foram fertilizadas com superfosfato e cloreto de potássio para atingir 20 mg P.dm⁻³ e 4% K na CTC - capacidade de troca catiônica do solo. A adubação nitrogenada anual foi aplicada na dose de 600 kg N ha⁻¹ em IHS, 400 kg N ha⁻¹ em DHS e 200 kg N ha⁻¹ em DMS. As doses foram divididas em cinco aplicações durante a estação chuvosa em DHS e DMS e oito aplicações, quatro durante o período chuvoso e quatro no período seco no IHS. O pasto degradado não foi fertilizado ou calado.

Outros parâmetros relevantes de solo e manejo estão descritos na Tabela 1. O solo de mata nativa foi amostrado para representar as condições originais do solo nas áreas experimentais. A determinação da textura do solo foi realizada pelo método de pipeta e classificada no triângulo do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) (Figura 2).

Tabela 1- Manejo e características do solo de pastagens sob diferentes níveis de intensificação em quatro sistemas de pastejo de bovinos e a vegetação nativa.

Característica	IHS	DHS	DMS	DP	FO
Taxa de lotação (UA ha ⁻¹)*	5,9	4,9	3,4	1,1	-
Tempo de manejo (anos)	9	9	14	14	-
Areia (g kg ⁻¹)	676	434	322	768	568
Silte (g kg ⁻¹)	74	131	145	70	83
Argila (g kg ⁻¹)	251	434	533	162	349

*Unidade-Animal por hectare na estação chuvosa.

IHS - Pastagem irrigada de *Megathyrsus (Panicum) maximum* Jacques (cv. Tanzânia) com alta taxa de lotação; DHS

- Pastagem de sequeiro de *Megathyrsus (Panicum) maximum* Jacques (cv. Tanzânia) com alta taxa de lotação; DMS

- Pastagem de sequeiro de *Urochloa (Brachiaria) decumbens* Stapf (cv. Basilisk) com moderada taxa de lotação; DP

- Pastagem degradada de *Urochloa (Brachiaria) decumbens* Stapf (cv. Basilisk) sob manejo extensivo; FO = vegetação nativa ("floresta sazonal semidecidual").

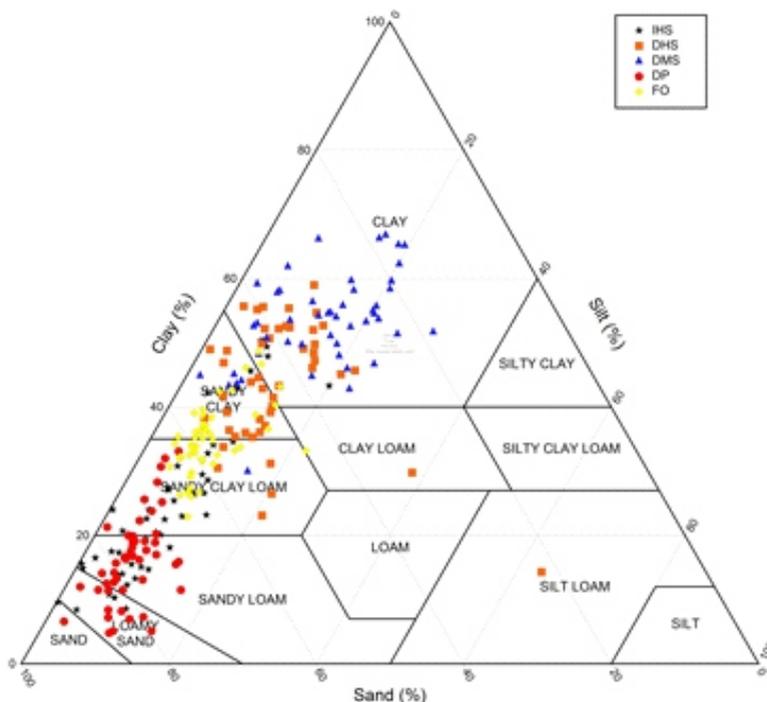


Figura 2 - Classificação textural do solo a partir da classificação da USDA

Amostras de solo foram coletadas nas seguintes profundidades: 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm, com seis repetições de campo (três repetições por bloco). Em cada réplica, duas sub amostras foram coletadas nos dois lados da trincheira, para cada intervalo de profundidade, utilizando anel de alumínio de volume conhecido, para posterior avaliação do peso seco do solo (a 110 °C) e determinação da densidade do solo. Os valores da densidade do solo foram obtidos usando a média de duas sub amostras.

Preparação de amostras de solo e determinações estoques de carbono

As amostras de solo foram secas ao ar a aproximadamente 25° C (até atingir uma massa constante), maceradas com almofariz e pistilo e foram passadas em peneira de 100 mesh (tamanho de partícula menor que 0,150 mm) para todos análises. A análise de C total foi realizada utilizando análise elementar (CHNS), em duplicata utilizando aproximadamente 10 mg de solo. Os ECs foram estimados utilizando densidade do solo em cada intervalo de profundidade e o correspondente teor de C (VELDKAMP, 1994). Posteriormente, os dados de EC foram corrigidos para compactação do solo, à equação proposta por (SISTI, DOS SANTOS *et al.*, 2004), usando dados do solo sob a vegetação natural como referência. O cálculo da massa equivalente do solo foi realizado para as camadas 0-30 e 0-100 cm de acordo (ELLERT e BETTANY, 1995), também utilizando a floresta nativa solo como referência.

Em um estudo anterior, (XAVIER, 2014) comparou dois métodos para o cálculo do estoque de C no solo (VELDKAMP, 1994): Estimativa baseada em uma massa fixa do solo, para corrigir diferenças causadas na densidade do solo por mudanças no uso da terra (ELLERT e BETTANY, 1995; SISTI, DOS SANTOS *et al.*, 2004); Estimativa utilizando o teor de C normalizado de cada camada de solo com base no teor de argila, uma vez que o teor de C no solo pode estar intimamente relacionado com a textura do solo (MORAES, VOLKOFF *et al.*, 1996). Confrontando essas metodologias, após combinar os resultados estimados com os dados agrônômicos e físicos reais do solo, o autor concluiu que, se a correção dos ECs no solo não for feita usando o equivalente em massa, os resultados podem subestimar os ECs. Porém, considerando isso e a recomendação do protocolo PECUS (FERNANDES, FERNANDES *et al.*, 2014), os ECs do solo neste estudo foram estimados por massa de solo equivalente.

Índice de humificação da Matéria Orgânica do Solo

A análise da humificação da MOS foi realizada utilizando a espectroscopia de fluorescência induzida por laser (LIFS) e é importante porque complementa os dados de estoque do solo C. A técnica LIFS mede a fluorescência do C recalcitrante, que pode ser um indicador sensível de mudanças causadas pelo uso da terra e manejo do solo (MILORI, SEGNINI *et al.*, 2011; SEGNINI, 2013; MARTINS, ARAUJO-JUNIOR *et al.*, 2015; BORDONAL, LAL *et al.*, 2017). Para as medidas de LIFS, as amostras de solo homogêneas primeiramente foram submetidas a uma prensa hidráulica (8 toneladas) com o intuito da confecção de pastilhas (dimensões próximas a 1 cm x 2 mm de aproximadamente 0,5g).

Para as análises de LIFS, foi utilizado um sistema portátil, projetado para compactar todo o aparato de detecção e análise de MOS e permitir a utilização do equipamento fora das condições do laboratório. O sistema utiliza um laser contínuo (cw) de diodo emitindo em 405 nm, com potência máxima de 50 mW, acoplado a um cabo óptico composto por seis fibras ópticas que excitam a amostra e uma fibra óptica central que coleta o sinal de fluorescência do solo.

Procedimentos experimentais foram conduzidos de acordo com (SEGNINI, XAVIER et al., 2019). O intervalo de medição foi de 475 nm a 800 nm, o tempo de integração 500 ms, a média e o boxcar cinco e quatro, respectivamente, para todas as avaliações. Cinco espectros foram obtidos para cada amostra e os resultados aqui apresentados correspondem às médias das cinco medidas e das réplicas de campo. A relação da área de fluorescência e o teor total de C orgânico (g kg⁻¹) foram definidos como o índice de humificação da MOS (HFIL) (MILORI, GALETI et al., 2006).

Resultados e discussão

Densidade e teores de carbono do solo

Houve diferenças na densidade do solo em vários intervalos de profundidade, entre sistemas de pastagens e entre algumas pastagens e a floresta (Tabela 2).

Tabela 2 - Densidade do solo, teor de carbono e índice de humificação da matéria orgânica de pastagens em quatro sistemas de pastejo de gado de corte e vegetação nativa.

* *D: Densidade; C: porcentagem de carbono; HFIL: índice de humificação; IHS - Pastagem irrigada de *Megathyrus (Panicum) maximum* Jacques (cv. Tanzânia) com alta taxa de lotação; DHS - Pastagem de sequeiro de *Megathyrus (Panicum) maximum* Jacques (cv. Tanzânia) com alta taxa de lotação; DMS - Pastagem de sequeiro de *Urochloa (Brachiaria) decumbens* Stapf (cv. Basilisk) com moderada taxa de lotação; DP - Pastagem degradada de *Urochloa (Brachiaria) decumbens* Stapf (cv. Basilisk) sob manejo extensivo; FO = vegetação nativa ("floresta sazonal semidecidual"); SEM: Desvio padrão das médias; Trat * Prof = Interação do sistema de pastagem vs profundidade do solo; a-h: médias seguidas por letras diferentes dentro de uma linha são diferentes (p ≤ 0,05) pelo teste de Tukey.

Item *	Tratamento (Sistemas)										Profundidade (cm)				Probabilidade		
	IHS	DHS	DMS	DP	FO	0-5	5-10	10-20	20-30	30-40	40-60	60-80	80-100	SEM	Tratamento	Profundidade	Trat * Prof
D (Mg.m ⁻³)	1,36 ^a	1,13 ^b	1,09 ^b	1,36 ^a	1,17 ^b	1,21 ^{bc}	1,25 ^{ab}	1,26 ^a	1,23 ^{bc}	1,22 ^{bc}	1,21 ^{bc}	1,19 ^c	1,20 ^{bc}	0,0098	<0,0001	0,0005	0,1884
C (%)	1,09 ^b	1,37 ^a	1,50 ^a	0,95 ^b	1,24 ^{ab}	2,04 ^a	1,71 ^b	1,40 ^c	1,19 ^d	1,03 ^e	0,90 ^f	0,81 ^f	0,73 ^h	0,035	0,0002	<0,0001	0,0236
HFIL(a.u.) × 10 ³	80,38 ^b	30,54 ^c	26,25 ^c	107,08 ^a	58,78 ^b	29,15 ^c	37,03 ^c	45,60 ^c	52,08 ^d	62,58 ^d	78,12 ^d	87,54 ^d	92,76 ^d	3,3172	<0,0001	<0,0001	<0,0001

Os solos em DHS e em DMS apresentaram densidades aparentes semelhantes ao solo da floresta. Na IHS, a maior compactação do solo pode ter ocorrido devido à irrigação frequente e também, possivelmente, intenso pisoteio animal. Segundo (SILVA, IMHOFF *et al.*, 2003), a compactação do solo é maior em solos com alto teor de água. No sistema DP, com maior exposição ao solo e sem irrigação, ocorreu também maior compactação e maior densidade do solo. Em geral, a densidade do solo depende da estrutura do solo, quantidade de água, textura do solo, MOS, manejo, uso da terra, compactação do solo e cobertura do tipo de vegetação (RAMOS, 2009; RAMOS, FAVARETTO *et al.*, 2015). Normalmente, os solos sob vegetações nativas apresentam menores densidades, principalmente porque não há compactação no solo não perturbado. No entanto, neste experimento, a densidade do solo na floresta não foi diferente em comparação com os solos nos sistemas DHS e DMS. A distribuição do tamanho dos poros e a resistência à penetração das raízes são algumas propriedades físicas alteradas pela compactação do solo.

Segundo (RAMOS, 2009; RAMOS, FAVARETTO *et al.*, 2015), a densidade do solo tem um grande efeito no crescimento das raízes, mas isso depende de outros fatores, como o teor de água no solo. Apesar da diferença estatística observada, a variação na densidade do solo entre os diversos perfis de solo neste experimento foi pequena (Tabela 2) e pode ser explicada pela influência das raízes nos sistemas de pastagem (SILVA, IMHOFF *et al.*, 2003). A presença de *Panicum maximum* e *Brachiaria decumbens*, que possuem abundantes sistemas radiculares, pode ter influenciado a estrutura do solo nas pastagens avaliadas. A calagem e adubação também tiveram impacto, causando aumento na produção de forragem e raízes, principalmente no segundo ano após a recuperação das pastagens degradadas de *Brachiaria decumbens* (OLIVEIRA, BOARETTO *et al.*, 2003).

Os resultados dos teores de solo C indicam que houve interação entre o sistema de produção e a profundidade do solo. Maiores valores de C no solo foram obtidos nas camadas superficiais, em todos os sistemas de pastagem e na floresta (Tabela 2, Figura 3).

O teor de C diminuiu nas camadas inferiores em todos os sistemas. Camadas superficiais recebem uma entrada contínua de material fresco da vegetação e dos animais; essa tendência é comumente observada na maioria dos solos brasileiros, especialmente os Latossolos (SÁ, SÉGUY *et al.*, 2015). Resultados semelhantes são observados em florestas, principalmente devido à deposição de material deteriorado de raízes e partes aéreas vegetativas nas camadas superiores do solo.

Em camadas de solo abaixo de 10 cm de profundidade, o teor de C no solo foi maior nos sistemas de sequeiro (DHS e DMS) em comparação com IHS e DP. Apesar da irrigação, o teor de C no solo na camada de 0-5 cm foi menor na IHS em comparação com FO. Em camadas entre 10 e 30 cm de profundidade, o teor de C no solo foi maior no DHS e no DMS do que na floresta, IHS e DP (Tabela 3, Figura 3).

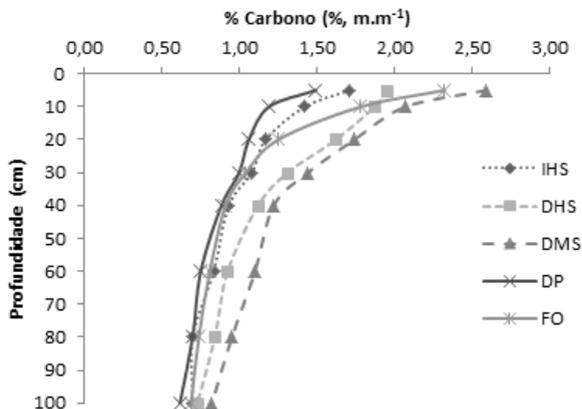


Figura 3 - Teor de carbono (% m.m⁻¹) nas diferentes camadas de solo nos sistemas de manejo e na vegetação nativa. IHS - Pastagem irrigada de *Megathyrus (Panicum) maximum* Jacques (cv. Tanzânia) com alta taxa de lotação; DHS - Pastagem de sequeiro de *Megathyrus (Panicum) maximum* Jacques (cv. Tanzânia) com alta taxa de lotação; DMS - Pastagem de sequeiro de *Urochloa (Brachiaria) decumbens* Stapf (cv. Basilisk) com moderada taxa de lotação; DP - Pastagem degradada de *Urochloa (Brachiaria) decumbens* Stapf (cv. Basilisk) sob manejo extensivo; FO = vegetação nativa ("floresta sazonal semidecidual").

Tabela 3 - Teor de carbono (% m.m⁻¹) nas diferentes camadas de solo nos sistemas de pastejo e na vegetação nativa

Profundidade (cm)	Tratamentos				
	IHS	DHS	DMS	DP	FO
0-5	1,71 ^{bc}	1,95 ^b	2,59 ^a	1,49 ^c	2,32 ^a
5-10	1,42 ^b	1,87 ^a	2,07 ^a	1,19 ^b	1,78 ^{ab}
10-20	1,17 ^b	1,62 ^a	1,74 ^a	1,06 ^b	1,25 ^b
20-30	1,08 ^b	1,31 ^{ab}	1,44 ^a	0,99 ^b	1,04 ^b
30-40	0,93	1,12	1,22	0,88	0,91
40-60	0,83 ^{ab}	0,92 ^{ab}	1,10 ^a	0,74 ^b	0,81 ^{ab}
60-80	0,70	0,84	0,95	0,70	0,74
80-100	0,70	0,73	0,82	0,62	0,69

*C: carbon; IHS - Pastagem irrigada de *Megathyrus (Panicum) maximum* Jacques (cv. Tanzânia) com alta taxa de lotação; DHS - Pastagem de sequeiro de *Megathyrus (Panicum) maximum* Jacques (cv. Tanzânia) com alta taxa de lotação; DMS - Pastagem de sequeiro de *Urochloa (Brachiaria) decumbens* Stapf (cv. Basilisk) com moderada taxa de lotação; DP - Pastagem degradada de *Urochloa (Brachiaria) decumbens* Stapf (cv. Basilisk) sob manejo extensivo; FO = vegetação nativa ("floresta sazonal semidecidual"); ^{a-c}: médias seguidas por diferentes letras na mesma linha são diferentes ($p \leq 0.05$) pelo teste Tukey.

Os solos do DHS e do DMS, além de se beneficiarem do bom manejo, apresentaram alto teor de argila (Tabela 1), conseqüentemente, acumularam quantidades consideráveis de C, bem acima das quantidades detectadas sob a vegetação nativa. Esses resultados corroboram os resultados de (FISHER, RAO *et al.*, 1994), que comparou solos em pastagens bem manejadas e savanas na América do Sul. Os autores mostraram a importância das gramíneas tropicais no sequestro de C em camadas mais profundas do solo.

Entre 40 e 60 cm de profundidade, o teor de C no solo foi maior no DMS, intermediário em IHS, DHS e na floresta e menor em DP. Nas demais camadas de solo avaliadas (60-100 cm), o teor de C foi semelhante para todos os sistemas (Tabela 3, Figura 3). Esses aspectos indicam que as pastagens, após alguns anos de manejo, têm um grande potencial para remover CO₂ da atmosfera e enriquecer o solo com MOS, conforme indica (CORAZZA, SILVA *et al.*, 1999; SEGNINI, 2007).

Estoques de carbono no solo

Os ECs foram corrigidos para uma massa igual de solo a 100 cm de profundidade sob a vegetação nativa, em que o estoque de C foi 114,72 Mg ha⁻¹. Os ECs dos primeiros 30 cm foram corrigidos para uma massa igual de solo a 30 cm de profundidade sob vegetação nativa, em que o estoque de C foi de 49,55 Mg ha⁻¹ (Tabela 4). Em média, os solos no DHS e no DMS apresentaram os maiores ECs, em compara

Tabela 4 - Estoques de carbono (Mg.ha⁻¹) em duas camadas de solo nos sistemas de pastejo e vegetação nativa.

Depths (cm)	Treatments				
	IHS	DHS	DMS	DP	FO
0-30	44,59 ^{ab}	53,79 ^{ab}	63,7 ^a	38,94 ^b	49,55 ^{ab}
0-100	109,86 ^b	129,63 ^{ab}	142,33 ^a	99,88 ^b	114,72 ^b

IHS - Pastagem irrigada de *Megathyrsus (Panicum) maximum* Jacques (cv. Tanzânia) com alta taxa de lotação; DHS - Pastagem de sequeiro de *Megathyrsus (Panicum) maximum* Jacques (cv. Tanzânia) com alta taxa de lotação; DMS - Pastagem de sequeiro de *Urochloa (Brachiaria) decumbens* Stapf (cv. Basilisk) com moderada taxa de lotação; DP - Pastagem degradada de *Urochloa (Brachiaria) decumbens* Stapf (cv. Basilisk) sob manejo extensivo; FO = vegetação nativa ("floresta sazonal semidecidual"); a^{-b}: médias seguidas por diferentes letras na mesma linha são diferentes (p ≤ 0.05) pelo teste Tukey.

Os valores de ECs encontrados na camada de 30 cm foram 64% maiores no DMS em relação ao sistema DP e os demais sistemas apresentaram valores intermediários (Tabela 4). Considerando todas as camadas (0-100 cm), os valores de ECs variaram de 99,88 Mg ha⁻¹ (no sistema degradado) a 142,33 Mg ha⁻¹ (no DMS), com maiores valores no DMS em relação ao DP, IHS e os valores florestais e intermediários no sistema DHS (Tabela 4).

Tabela 5- Estoque de carbono no solo ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) nos quatro sistemas de manejo de bovinos de corte e na vegetação nativa em duas camadas de solo (0-30 e 0-100 cm).

Item*	Tratamentos					Profundidade (cm)			Probabilidade		
	IHS	DHS	DMS	DP	FO	0-30	0-100	SEM	Tratamentos	Profundidades	Trat * Prof
Carbon Stocks (t/ha)	76,66 ^a	94,87 ^a	103,08 ^a	68,85 ^b	82,88 ^b	50,68	119,85	5,08	<0,0001	<0,0001	0,011

*C: carbono. IHS - Pastagem irrigada de *Megathyrus (Panicum) maximum* Jacques (cv. Tanzânia) com alta taxa de lotação; DHS - Pastagem de sequeiro de *Megathyrus (Panicum) maximum* Jacques (cv. Tanzânia) com alta taxa de lotação; DMS - Pastagem de sequeiro de *Urochloa (Brachiaria) decumbens* Stapf (cv. Basilisk) com moderada taxa de lotação; DP - Pastagem degradada de *Urochloa (Brachiaria) decumbens* Stapf (cv. Basilisk) sob manejo extensivo; FO = vegetação nativa ("floresta sazonal semidecidual"). SEM: Desvio padrão das médias; Trat * Prof = Interação do sistema de pastagem vs profundidade do solo; ^{a-b}: médias seguidas por diferentes letras na mesma linha são diferentes ($p \leq 0.05$) pelo teste Tukey.

Segundo (DE BONA, BAYER *et al.*, 2006), a irrigação pode aumentar a entrada de carbono no solo, mas às vezes não é suficiente para aumentar os ECs. O manejo do solo pode modificar o efeito da irrigação nos estoques de C do solo (BAYER, MARTIN-NETO *et al.*, 2006). Segundo (ANDRÉN, STEEN *et al.*, 1992) o aumento na água do solo causado pela irrigação fornece condições favoráveis para a atividade microbiana que intensificam a decomposição da matéria orgânica (MO) microbiana e a mineralização do carbono. Esses fatores podem ter contribuído para o menor C estoques detectados em IHS.

Neste estudo, os diferentes sistemas de pastagem com *Brachiaria* e *Panicum* apresentaram estoques de C do solo superior aos estoques no solo sob a mata nativa. No mesmo contexto, (BRAZ, URQUIAGA *et al.*, 2013) apontou o potencial de pastagens de *Brachiaria* bem manejadas para acumular mais C do solo do que pastagens degradadas. Neste trabalho, os diferentes sistemas de pastagens com *Brachiaria* e *Panicum* apresentaram ECs no solo semelhantes ou superiores aos ECs no solo sob a mata nativa.

A magnitude dos ECs encontrados neste trabalho (até $142,33 \text{ Mg ha}^{-1}$) foi comparável a outros resultados encontrados na literatura, considerando as avaliações de pastagens nas quais as amostras foram coletadas na mesma profundidade do perfil do solo (100 cm). A maioria dessas avaliações teve savana como a vegetação natural. (FISHER, RAO *et al.*, 1994) encontraram aproximadamente $200 \text{ Mg de C ha}^{-1}$ nas savanas colombianas e acima de 200 Mg ha^{-1} quando a *Brachiaria humidicola* foi introduzida. (CORAZZA, SILVA *et al.*, 1999) encontraram 150 Mg C ha^{-1} em pastagens *Brachiaria decumbens* na savana brasileira. (SILVA, IMHOFF *et al.*, 2003) encontraram em torno de 100 e 113 Mg C ha^{-1} em pastagem degradada com capim nativo e pastagem de *Panicum maximum*, respectivamente. (SEGNINI, 2007) avaliou o solo em uma pastagem de *Brachiaria decumbens* comparado ao solo sob cerradão, um tipo de savana brasileira, em uma zona de transição para a Mata Atlântica. Os ECs do solo variaram de 171 a 215 Mg ha^{-1} e 125 Mg ha^{-1} foram obtidos em solo sob vegetação de Cerradão. (FISHER, BRAZ *et al.*, 2007) relataram ECs na ordem de 165 e 138 Mg ha^{-1} para pastagens produtivas e degradadas, respectivamente, em solos com 80% de argila.

Espera-se que as principais mudanças nos ECs de carbono ocorram na camada 0-30 cm, como resultado do manejo agrícola e mudanças no uso da terra. O IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas) recomenda que os ECs sejam avaliados em camadas profundas do solo (até 1 m) quando se estuda o ecossistema ou os efeitos do manejo de solos de pastagens tropicais em que gramíneas apresentam sistemas radiculares profundos (BATJES, 2011). Segundo (BODDEY, JANTALIA *et al.*, 2010), na maioria dos estudos sobre as avaliações do estoque de C no solo foram feitas nas camadas superficiais do solo.

O aspecto interessante dos resultados deste ensaio foram as diferentes contribuições de diferentes camadas de solo para o estoque total de C. Considerando todos os sistemas de pastagem e floresta, os ECs calculados para as camadas 0-30 e 30-100 cm representaram, respectivamente, uma média de 42,3% e 57,7% dos ECs obtidos para as 0-100 camadas (Tabelas 4 e 5). Portanto, é importante enfatizar a importância da amostragem de camadas profundas do solo, especialmente quando se estabelecem pastagens estabelecidas com gramíneas que possuem abundantes sistemas radiculares como a *Brachiaria*. Sob pastagens produtivas, quantidades consideráveis de C podem ser armazenadas a até 100 cm de profundidade (DA SILVA, RESCK *et al.*, 2004; FISHER, BRAZ *et al.*, 2007).

Segundo (SCHMIDT, TORN *et al.*, 2011), camadas mais profundas do solo também contribuem para mais da metade dos ECs globais no solo. Este estudo mostra a contribuição do sistema radicular da *Brachiaria* no aumento de ECs. Mas de acordo com (FISHER, BRAZ *et al.*, 2007), os ECs totais podem diminuir ao longo do tempo, principalmente se a área não for bem manejada ou fertilizada.

Humificação da matéria orgânica do solo

Os menores H_{FIL} foram obtidos para as camadas superficiais de todos os solos avaliados (Tabela 2). O H_{FIL} foi maior para o solo sob pastagem de degradação, menor em DHS e DMS e intermediário em solos sob floresta e em IHS, com diferenças estatísticas variando de acordo com a profundidade da camada (Tabela 2 e 6; Figura 2). Os H_{FIL} de DHS e DMS foram menores em comparação com as demais pastagens e foram semelhantes ao H_{FIL} de floresta nativa para as camadas superficiais (Tabela 6). Nas camadas mais profundas, as diferenças entre o H_{FIL} foram maiores, com valores mais baixos no DHS e no DMS, em comparação com o IHS, DP e floresta (Tabela 6; Figura 6).

O menor H_{FIL} obtido para as camadas superiores de solo nas pastagens pode estar associado à ocorrência de C lábil derivado de um suprimento contínuo de material fresco da vegetação de cobertura e dos animais. Nas camadas mais profundas, há um aumento do H_{FIL} devido à presença de C mais recalcitrante,

proporcionado por compostos orgânicos insaturados contendo ligações duplas e anéis condensados. Uma maior humificação aumenta a resistência do solo contra a decomposição microbiana e, conseqüentemente, aumenta a estabilidade da MOS (SEGNINI, POSADAS et al., 2010).

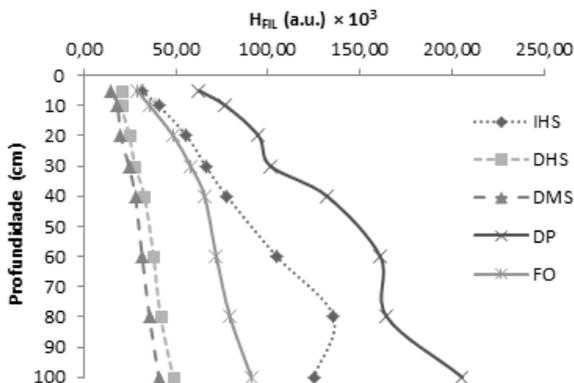


Figura 6 - Índice de humificação H_{FIL} (a.u.) $\times 10^3$ nas diferentes camadas de solo nos sistemas de pastejo e na vegetação nativa. IHS - Pastagem irrigada de *Megathyrus (Panicum) maximum* Jacques (cv. Tanzânia) com alta taxa de lotação; DHS - Pastagem de sequeiro de *Megathyrus (Panicum) maximum* Jacques (cv. Tanzânia) com alta taxa de lotação; DMS - Pastagem de sequeiro de *Urochloa (Brachiaria) decumbens* Stapf (cv. Basilisk) com moderada taxa de lotação; DP - Pastagem degradada de *Urochloa (Brachiaria) decumbens* Stapf (cv. Basilisk) sob manejo extensivo; FO = vegetação nativa ("floresta sazonal semidecidual").

Tabela 6 - Índice de humificação H_{FIL} (a.u.) $\times 10^3$ nas diferentes camadas de solo nos sistemas de pastoreio e vegetação nativa

Depths (cm)	Treatments				
	IHS	DHS	DMS	DP	FO
0-5	31.075 ^{ab}	20.011 ^b	14.798 ^b	62.516 ^a	28.798 ^{ab}
5-10	40.551 ^{ab}	20.149 ^b	18.068 ^b	76.949 ^a	35.600 ^b
10-20	55.674 ^b	24.526 ^b	19.829 ^b	94.760 ^a	48.449 ^b
20-30	66.059 ^{ab}	27.556 ^c	24.265 ^c	101.338 ^a	57.833 ^b
30-40	77.580 ^b	32.693 ^c	27.707 ^c	132.107 ^a	65.369 ^{bc}
40-60	104.741 ^b	37.662 ^d	31.464 ^d	161.023 ^a	71.857 ^{cd}
60-80	135.641 ^a	41.524 ^b	35.416 ^c	164.578 ^a	79.299 ^b
80-100	124.823 ^b	48.335 ^c	40.499 ^c	205.625 ^a	90.972 ^b

IHS - Pastagem irrigada de *Megathyrus (Panicum) maximum* Jacques (cv. Tanzânia) com alta taxa de lotação; DHS - Pastagem de sequeiro de *Megathyrus (Panicum) maximum* Jacques (cv. Tanzânia) com alta taxa de lotação; DMS - Pastagem de sequeiro de *Urochloa (Brachiaria) decumbens* Stapf (cv. Basilisk) com moderada taxa de lotação; DP - Pastagem degradada de *Urochloa (Brachiaria) decumbens* Stapf (cv. Basilisk) sob manejo extensivo; FO = vegetação nativa ("floresta sazonal semidecidual"); ^{a-d} médias seguidas por diferentes letras na mesma linha são diferentes ($p \leq 0.05$) pelo teste Tukey.

As estruturas aromáticas presentes nas moléculas rígidas da MOS são consideradas mais recalcitrantes ou estáveis à decomposição biológica do que as estruturas derivadas de polissacarídeos e moléculas proteicas (BAYER, MARTIN-NETO *et al.*, 2006).

Os resultados aqui apresentados estão de acordo com estudos anteriores de (MILORI, GALETI *et al.*, 2006; MILORI, SEGNINI *et al.*, 2011) e (TIVET, DE MORAES SÁ *et al.*, 2013). Considerando a humificação em DP, é importante ressaltar que os níveis mais baixos de C e o alto índice de humificação obtidos podem indicar que, em seu estágio de degradação, as estruturas aromáticas rígidas e condensadas apresentadas na MOS são predominantes, já que não existe uma atividade microbiológica efetiva para metabolizar material adicional. Além disso, não há entrada C lábil no sistema, já degradada.

A análise do grau de humificação da MOS complementa os dados de ECs do solo porque a técnica LIFS mede C recalcitrante, o que pode ser um indicador sensível de variações causadas por mudanças no uso do solo e manejo do solo, em relação à mitigação das emissões de CO₂ (MILORI, SEGNINI *et al.*, 2011). A "vulnerabilidade" de C é verificada neste tipo de avaliação. Considerando os resultados deste estudo, é possível inferir que os sistemas DHS e DMS, que apresentaram os maiores valores de estoque de C, estão suscetíveis a perdas de CO₂ se o manejo não for adequado, principalmente devido à alta labilidade de C em seu solo, especialmente nas camadas superficiais. Em estudos de qualidade do solo, observou-se que o nível de ECs por si nem sempre é um indicador sensível de variações causadas por mudanças no uso da terra e no manejo do solo. A fração lábil C é mais afetada e mais sensível em comparação às frações recalcitrantes de C.

De acordo com (ONTL e SCHULTE, 2012), os efeitos do manejo da terra sobre os níveis orgânicos de C no solo, especialmente os impactos da gestão em ambientes agrícolas, são objeto de grande parte da pesquisa atual. Segundo esses autores, as principais mudanças no solo C levam um tempo relativamente longo para ocorrer, fazendo com que medições pontuais e de curto período de mudanças nos ECs não sejam muito significativas.

Conclusões

Os resultados indicam a capacidade de pastagens tropicais bem manejadas para mitigar as emissões de GEE dos sistemas de produção animal. Solos sob pastagens tropicais são adequados como dissipadores de C a longo prazo e a maior parte do C é armazenado abaixo de 30 cm de profundidade.

Os índices de estoque de carbono e humificação são ferramentas úteis para diagnosticar a degradação em pastagens. Baixos ECs associados a altos índices de humificação são características de pastagens de degradação, nas quais quantidades significativas de matéria orgânica foram perdidas. Sistemas de pastagens com alto estoque de C e baixos índices de humificação são frágeis e suscetíveis a perdas de CO₂ para a atmosfera, se a gestão não estiver correta, devido à alta labilidade do solo C. É necessário desenvolver tecnologias para melhorar o sequestro de C em pastagens irrigadas.

Agradecimentos

Para a FAPESP (projeto: 2010 / 09211-6); CNPq (projeto 562861-2010); CAPES e Embrapa por apoiar financeiramente a Rede de Pesquisa PECUS.

Referências

ANDRÉN, O.; STEEN, E.; RAJKAI, K. Modelling the effects of moisture on barley straw and root decomposition in the field. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 24, n. 8, p. 727-736, 1992.

ASSAD, E. D.; PINTO, H. S.; MARTINS, S. C.; GROppo, J. D.; SALGADO, P. R.; EVANGELISTA, B.; VASCONCELLOS, E.; SANO, E. E.; PAVAO, E.; LUNA, R.; CAMARGO, P. B.; MARTINELLI, L. A. Changes in soil carbon stocks in Brazil due to land use: paired site comparisons and a regional pasture soil survey. **Biogeosciences**, v. 10, n. 10, p. 6141-6160, 2013.

AVILA, A. M. H. D. Uma Síntese do Quarto Relatório do IPCC. Campinas, 2007.

BATJES, N. H. Soil organic carbon stocks under native vegetation – Revised estimates for use with the simple assessment option of the Carbon Benefits Project system. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 142, n. 3, p. 365-373, 2011.

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; DIECKOW, J.; AMADO, T. J. C. C and N stocks and the role of molecular recalcitrance and organomineral interaction in stabilizing soil organic matter in a subtropical Acrisol managed under no-tillage. **Geoderma**, v. 133, n. 3-4, p. 258-268, 2006.

BODDEY, R. M.; JANTALIA, C. P.; CONCEIÇÃO, P. C.; ZANATTA, J. A.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; DIECKOW, J.; DOS SANTOS, H. P.; DENARDIN, J. E.; AITA, C.; GIACOMINI, S. J.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S. Carbon accumulation at depth in Ferralsols under zero-till subtropical agriculture. **Global Change Biology**, v. 16, n. 2, p. 784-795, 2010.

BODDEY, R. M. J., C.P.; MACEDO, M.O.; OLIVEIRA, O.C. DE; RESENDE, A.S.; ALVES, B.J.R.; URQUIAGA, S. Potential of carbon sequestration in soils of the Atlantic Forest region of Brazil. In: LAL, R. C., C.C.; BERNOUX, M.; ETCHEVERS, J.; CERRI, E. (Ed.). **Carbon sequestration in soil of Latin America**. New York, Howarth, p.305-348, 2006.

BORDONAL, R. D. O.; LAL, R.; RONQUIM, C. C.; DE FIGUEIREDO, E. B.; CARVALHO, J. L. N.; MALDONADO, W.; MILORI, D. M. B. P.; LA SCALA, N. Changes in quantity and quality of soil carbon due to the land-use conversion to sugarcane (*Saccharum officinarum*) plantation in southern Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 240, p. 54-65, 2017.

BRAZ, S. P.; URQUIAGA, S.; ALVES, B. J. R.; JANTALIA, C. P.; GUIMARÃES, A. P.; DOS SANTOS, C. A.; DOS SANTOS, S. C.; MACHADO, É. F. P.; BODDEY, R. M. Soil Carbon Stocks under Productive and Degraded Brachiaria Pastures in the Brazilian Cerrado. **Soil Science Society of America Journal**, v. 77, n. 3, p. 914-928, 2013.

BUSTAMANTE, M. M. C.; NOBRE, C. A.; SMERALDI, R.; AGUIAR, A. P. D.; BARIONI, L. G.; FERREIRA, L. G.; LONGO, K.; MAY, P.; PINTO, A. S.; OMETTO, J. P. H. B. Estimating greenhouse gas emissions from cattle raising in Brazil. **Climatic Change**, v. 115, n. 3, p. 559-577, 2012.

CONANT, R. T.; PAUSTIAN, K.; ELLIOTT, E. T. GRASSLAND MANAGEMENT AND CONVERSION INTO GRASSLAND: EFFECTS ON SOIL CARBON. **Ecological Applications**, v. 11, n. 2, p. 343-355, 2001.

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, p. 425-432, 1999.

DA SILVA, J. E.; RESCK, D. V. S.; CORAZZA, E. J.; VIVALDI, L. Carbon storage in clayey Oxisol cultivated pastures in the "Cerrado" region, Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 103, n. 2, p. 357-363, 2004.

DE BONA, F. D.; BAYER, C.; BERGAMASCHI, H.; DIECKOW, J. Soil organic carbon in sprinkler irrigation systems under no-till and conventional tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 5, p. 911-919, 2006.

ELLERT, B. H.; BETTANY, J. R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 75, n. 4, p. 529-538, 1995.

FERNANDES, F.; FERNANDES, A. H. B. M.; ALVES, B. J. R.; BAYER, C.; BODDEY, R. M.; OLIVEIRA, P. P. A. **Protocolo para quantificação dos estoques de carbono do solo da Rede de Pesquisa Pecus**. São Carlos, SP: Embrapa Pecuária Sudeste, 2014. 20p. (Embrapa Pecuária Sudeste. Série Documento, 116)

FISHER, M. J.; BRAZ, S. P.; SANTOS, R. S. M. D.; URQUIAGA, S.; ALVES, B. J. R.; BODDEY, R. M. Another dimension to grazing systems: Soil carbon. **Tropical Grasslands**, v. 41, p. 65-83, 2007.

FISHER, M. J.; RAO, I. M.; AYARZA, M. A.; LASCANO, C. E.; SANZ, J. I.; THOMAS, R. J.; VERA, R. R. Carbon storage by introduced deep-rooted grasses in the south-american savannas. **Nature**, v. 371, n. 6494, p. 236-238, 1994.

IPCC. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. 1988.
Disponível em: < <http://www.ipcc.ch/organization/organization.shtml> > .

JANTALIA, C. P.; TARRÉ, R. M.; MACEDO, R. O.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Acumulação de carbono no solo em pastagens de Brachiaria. In: ALVES, B. J. R. U., S.; AITA, C.; BODDEY, R. M.; JANTALIA, C. P.; CAMARGO, F. O. (Ed.). **Manejo de sistemas agrícolas: Impacto no seqüestro de C e nas emissões de gases de efeito estufa**. Porto Alegre: Genesis, p.157-170, 2006.

LAL, R. Agricultural activities and the global carbon cycle. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 70, n. 2, p. 103-116, 2004.

LAL, R.. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. **Science**, v. 304, n. 5677, p. 1623-1627, 2004.

LAL, R.. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. **Geoderma**, v. 123, n. 1-2, p. 1-22, 2004.

LAL, R.. Carbon sequestration. **Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences**, v. 363, n. 1492, p. 815-830, 2008.

MARTINS, B. H.; ARAUJO-JUNIOR, C. F.; MIYAZAWA, M.; VIEIRA, K. M.; MILORI, D. M. B. P. Soil organic matter quality and weed diversity in coffee plantation area submitted to weed control and cover crops management. **Soil and Tillage Research**, v. 153, p. 169-174, 2015.

MILORI, D. M. B. P.; GALETI, H. V. A.; MARTIN-NETO, L.; DIECKOW, J.; GONZÁLEZ-PÉREZ, M.; BAYER, C.; SALTON, J. Organic Matter Study of Whole Soil Samples Using Laser-Induced Fluorescence Spectroscopy. **Soil Science Society of America Journal**, v. 70, n. 1, p. 57-63, 2006.

MILORI, D. M. P. B.; SEGNINI, A.; DA SILVA, W. T. L.; POSADAS, A.; MARES, V.; QUIROZ, R.; MARTIN-NETO, L. Emerging techniques for soil carbon measurements. In: WOLLENBERG, E.;NIHART, A., et al (Ed.). **Climate change mitigation and agriculture**. London, UK: Earthscan, v.2, p.1-30, 2011.

MORAES, J. F. L.; VOLKOFF, B.; CERRI, C. C.; BERNOUX, M. Soil properties under Amazon forest and changes due to pasture installation in Rondonia, Brazil. **Geoderma**, v. 70, n. 1, p. 63-81, 1996.

NEPSTAD, D.; SOARES-FILHO, B. S.; MERRY, F.; LIMA, A.; MOUTINHO, P.; CARTER, J.; BOWMAN, M.; CATTANEO, A.; RODRIGUES, H.; SCHWARTZMAN, S.; MCGRATH, D. G.; STICKLER, C. M.; LUBOWSKI, R.; PIRIS-CABEZAS, P.; RIVERO, S.; ALENCAR, A.; ALMEIDA, O.; STELLA, O. The End of Deforestation in the Brazilian Amazon. **Science**, v. 326, n. 5958, p. 1350-1351, 2009.

OLIVEIRA, P. P. A.; BOARETTO, A. E.; TRIVELIN, P. C. O.; OLIVEIRA, W. S. D.; CORSI, M. Liming and fertilization to restore degraded *Brachiaria decumbens* pastures grown on an entisol. **Scientia Agricola**, v. 60, p. 125-131, 2003.

OLIVEIRA, P. P. A.; CORSI, M. Recuperação de pastagens degradadas para sistemas intensivos de produção de bovinos. São Carlos, SP: Embrapa Pecuária Sudeste, 2005. (Embrapa Pecuária Sudeste. Circular Técnica, 38).

OLIVEIRA, P. P. A.; TRIVELIN, P. C. O.; OLIVEIRA, W. S. Urea N-15 balance in the fractions of a *Brachiaria brizantha* cv. Marandu pasture under recovery with different liming dates. **Revista Brasileira De Zootecnia-Brazilian Journal of Animal Science**, v. 36, n. 6, p. 1982-1989, 2007.

OLIVEIRA, P. P. A. P., M. A.; CORSI, M. Correção do solo e fertilização de pastagens em sistemas intensivos de produção de leite. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2008, 56 p. (Embrapa Pecuária Sudeste, Documento 86).

OLIVEIRA, S. G.; BERCHIELLI, T. T.; PEDREIRA, M. D. S.; PRIMAVESI, O.; FRIGHETTO, R.; LIMA, M. A. Effect of tannin levels in sorghum silage and concentrate supplementation on apparent digestibility and methane emission in beef cattle. **Animal Feed Science and Technology**, v. 135, n. 3-4, p. 236-248, 2007.

ONTL, T. A.; SCHULTE, L. A. Soil Carbon Storage. **Nature Education Knowledge**, v. 3(10):35, 2012.

RAMOS, M. R. **Atributos físicos e perda de solo, água e nutrientes em encostas sob sistema de produção de hortaliças convencional e orgânico**. 2009. 77f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

RAMOS, M. R.; FAVARETTO, N.; UHLMANN, A.; DIECKOW, J.; VEZZANI, F.; ALMEIDA, L. D. Vegetable production under the organic system: effects on soil physical attributes. **Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 58, n. 1, p. 45-51, 2015.

RURAL, C. ONU indica pecuária como responsável por 14,5% das emissões de gases de efeito estufa pelo homem. São Paulo, 2014. Disponível em: < <https://canalrural.uol.com.br/noticias/onu-indica-pecuaria-como-responsavel-por-145-das-emissoes-gases-efeito-estufa-pelo-homem-26769/> >.

RUVIARO, C. F.; DE LÉIS, C. M.; LAMPERT, V. D. N.; BARCELLOS, J. O. J.; DEWES, H. Carbon footprint in different beef production systems on a southern Brazilian farm: a case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 96, p. 435-443, 2015.

SÁ, J. C. D. M.; SÉGUY, L.; TIVET, F.; LAL, R.; BOUZINAC, S.; BORSZOWSKI, P. R.; BRIEDIS, C.; SANTOS, J. B. D.; HARTMAN, D. D. C.; BERTOLONI, C. G.; ROSA, J.; FRIEDRICH, T. Carbon depletion by plowing and its restoration by no-till cropping systems in oxisols of subtropical and tropical agro-ecoregions in Brazil. **Land Degradation & Development**, v. 26, n. 6, p. 531-543, 2015.

SANTOS, P. M.; CORRÊA, L. D. A. Manejo de pastagens tropicais. 2. ed. rev. São Carlos, SP: Embrapa Pecuária Sudeste, 2009. 28 p. (Embrapa Pecuária Sudeste. Documentos, 46).

SCHMIDT, M. W. I.; TORN, M. S.; ABIVEN, S.; DITTMAR, T.; GUGGENBERGER, G.; JANSSENS, I. A.; KLEBER, M.; KÖGEL-KNABNER, I.; LEHMANN, J.; MANNING, D. A. C.; NANNIPIERI, P.; RASSE, D. P.; WEINER, S.; TRUMBORE, S. E. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. **Nature**, v. 478, p. 49, 2011.

SEGNINI, A. **Estrutura e estabilidade da matéria orgânica em áreas com potencial de sequestro de carbono no solo**. 2007. 131 p. Tese (Doutorado em Química Analítica). Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

SEGNINI, A.; POSADAS, A.; QUIROZ, R.; MILORI, D. M. B. P.; SAAB, S. C.; NETO, L. M.; VAZ, C. M. P. Spectroscopic Assessment of Soil Organic Matter in Wetlands from the High Andes. **Soil Science Society of America Journal**, v. 74, n. 6, p. 2246-2253, 2010.

SEGNINI, A.; XAVIER, A. A. P.; JUNIOR, P. L. O.; OLIVEIRA, P. P. A.; PEDROSO, A. D. F.; PRAES, M. F. F. M.; RODRIGUES, P. H. M.; MILORI, D. M. B. P. Soil carbon stock and humification in pastures under different levels of intensification in Brazil. **Science Agricola**, v. 76, n. 1, 2019.

SEGNINI, A. O., P.P.A.; OTAVIANI JUNIOR, P. L.; XAVIER, A.A P.; FERREIRA, E.J.; SPERANÇA, M.A.; PEZZOPANE, J.R.M.; MILORI, D.M.B.P.; MARTIN-NETO, L. Assessing soil carbon stocks and accumulation rates in Brazilian livestock production systems. In: (Ed.). **Greenhouse Gas and Animal Agriculture**. Dublin, IE: Cambridge University Press, v.4, p.339-339, 2013.

SILVA, A. P.; IMHOFF, S.; CORSI, M. Evaluation of soil compaction in an irrigated short-duration grazing system. **Soil & Tillage Research**, v. 70, n. 1, p. 83-90, 2003.

SISTI, C. P. J.; DOS SANTOS, H. P.; KOHHANN, R.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, v. 76, n. 1, p. 39-58, 2004.

TIVET, F.; DE MORAES SÁ, J. C.; LAL, R.; MILORI, D. M. B. P.; BRIEDIS, C.; LETOURMY, P.; PINHEIRO, L. A.; BORSZOWSKI, P. R.; DA CRUZ HARTMAN, D. Assessing humification and organic C compounds by laser-induced fluorescence and FTIR spectroscopies under conventional and no-till management in Brazilian Oxisols. **Geoderma**, v. 207-208, p. 71-81, 2013.

VELDKAMP, E. Organic-carbon turnover in 3 tropical soils under pasture after deforestation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, n. 1, p. 175-180, 1994.

XAVIER, A. A. P. **Avaliação do acúmulo e emissão de carbono do solo sob sistemas produtivos de pastagem**. 2014. 101 p. Dissertação (Mestrado em Química Analítica). Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

ZANATTA, J. A.; BAYER, C.; DIECKOW, J.; VIEIRA, F. C. B.; MIELNICZUK, J. Soil organic carbon accumulation and carbon costs related to tillage, cropping systems and nitrogen fertilization in a subtropical Acrisol. **Soil & Tillage Research**, v. 94, n. 2, p. 510-519, 2007.



Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

Embrapa Instrumentação

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

Rua XV de Novembro, 1452 - Caixa Postal 741 - CEP 13560-970 - São Carlos - SP

Telefone: (16) 2107 2800 - Fax: (16) 2107 2902

www.embrapa.br/instrumentacao



MINISTÉRIO DA
**AGRICULTURA, PECUÁRIA
E ABASTECIMENTO**

