

IGOR VILELA CRUZ

**EMIÇÃO DE CO₂ E QUALIDADE FÍSICA E QUÍMICA DO SOLO EM SISTEMA
INTEGRADO DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA COM OVINOS**

Botucatu

2020

IGOR VILELA CRUZ

**EMISSÃO DE CO₂ E QUALIDADE FÍSICA E QUÍMICA DO SOLO EM SISTEMA
INTEGRADO DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA COM OVINOS**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da Unesp Campus de Botucatu,
para obtenção do título de Doutor em
Agronomia (Agricultura).

Orientador: Prof. Dr. Juliano Carlos Calonego

Coorientadora: Dr^a. Nídia Raquel Costa

Botucatu

2020

C957e Cruz, Igor Vilela
Emissão de co₂ e qualidade física e química do solo em sistema integrado de produção agropecuária com ovinos / Igor Vilela Cruz. -- Botucatu, 2020
96 p.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu
Orientador: Juliano Carlos Calonego
Coorientadora: Nídia Raquel Costa

1. Matéria orgânica do solo. 2. Semeadura direta. 3. Rotação de culturas. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: EMISSÃO DE CO₂ E QUALIDADE FÍSICA E QUÍMICA DO SOLO EM SISTEMA INTEGRADO DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA COM OVINOS

AUTOR: IGOR VILELA CRUZ

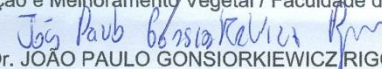
ORIENTADOR: JULIANO CARLOS CALONEGO

COORIENTADORA: NÍDIA RAQUEL COSTA

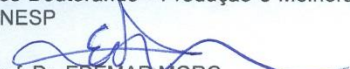
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA (AGRICULTURA) pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. JULIANO CARLOS CALONEGO

Produção e Melhoramento Vegetal / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu - UNESP


Prof. Dr. JOÃO PAULO GONSIORKIEWICZ RIGON

Pós-Doutorando - Produção e Melhoramento Vegetal / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu - UNESP


Prof. Dr. EDEMAR MORO

Agronomia / Universidade do Oeste Paulista


Pesquisador Dr. EMERSON BORGHI

Núcleo de Desenvolvimento de Sistemas de Produção / Embrapa Milho e Sorgo


Prof. Dr. DIRCEU MAXIMINO FERNANDES

Solos e Recursos Ambientais / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu - UNESP

Botucatu, 31 de janeiro de 2020

Dedico

Á minha avó Josefina (in memoriam)

Á minha Tia Sônia

Pelo incentivo de sempre buscar algo melhor para a vida

Ofereço

Aos meu pais Paulo e Lilia

A minha namorada Juslei

Por sempre estarem ao meu lado e pelo amor incondicional

AGRADECIMENTOS

À Deus, por ter saúde e disposição para realizar todos os meus objetivos.

Aos meus Pais, que não mediram esforços para a formação e educação dos filhos.

Aos meus irmãos Paulo e Caio pela ajuda e incentivo.

Ao Professor Dr. Juliano Carlos Calonego, por ter me dado a oportunidade de realização da pós-graduação em uma instituição de grande prestígio e respeito, pelos ensinamentos, pela paciência e companheirismo. E pelo exemplo de trabalho, educação e trato com as pessoas.

À Faculdade de Ciências Agrônômicas, e ao Departamento de Produção e Melhoramento Vegetal, pela acolhida e suporte para a realização do doutorado.

À Fundação Agrisus – Agricultura Sustentável, pelo financiamento concedido.

À Dr^a. Nídia Raquel Costa pela ajuda, ensinamentos, amizade e companheirismo.

Ao Dr. Cristiano Pariz e Prof. Dr. Ciniro Costa, por disponibilizarem o experimento e por toda a confiança.

À minha namorada Juslei Figueiredo, pelo grande companheirismo, amor e respeito, sempre ao meu lado me ajudando no que fosse preciso.

Ao Dr. João Paulo Gonsiorkiewicz, por toda sua boa vontade em ensinar, retirar dúvidas e pela ajuda com os cálculos e laboratório.

Aos amigos Hugo, Lydia e Douglas, por todo companheirismo e ajuda, e pelos bons momentos compartilhados ao longo do Doutorado.

À Tiara Guimarães e Michely Alves, pela ajuda e amizade ao longo dos cinco anos de pós-graduação.

Aos amigos Daniel Martins e Daniele Floriano pela ajuda na condução do experimento, pois foram muito importantes para a realização desse trabalho.

Aos funcionários do Departamento de Produção e Melhoramento Vegetal, em especial ao Casemiro, Dorival e Iara. E aos funcionários da FEPE, em especial ao Mário, Flávio, Zé Roberto e Dirceu, pela colaboração.

Aos amigos de Rondônia: Brenno Victor, Aldo Linhares, Luis Guilherme e Gustavo Torres, pelos mais de 16 anos de amizade verdadeira, que mesmo distantes se mantiveram leais e incentivadores.

Aos membros efetivos e suplentes da banca, por aceitarem participar e contribuir para a melhor síntese desta tese de doutorado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

A integração de cultivos agrícolas com a pecuária, em semeadura direta no Brasil, tem sido utilizada desde a década de 1970, sendo denominado atualmente de Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPAs). São sistemas intensivos de produção que promovem ganhos na eficiência da produção agrícola e pecuária, e geram diversidade e complexidade nos atributos químicos e físicos do solo, além de alterarem a dinâmica do carbono (C) no solo. Neste sentido, foi realizado um experimento em área de SIPA sob semeadura direta (SD), em um Latossolo vermelho distroférico, cultivando-se soja consorciada com capim aruana no verão (safra 2016/2017) em sucessão à duas modalidades de consórcio com milho realizadas desde 2011, sendo milho + capim marandu e milho + capim marandu + feijão guandu, com posterior sobressemeadura de aveia e pastejo por borregas no outono/inverno. No primeiro capítulo foi estudado as alterações nos atributos físicos e químicos do solo, a produção de raízes e a produção de silagem de soja + capim aruana. No segundo capítulo foram analisados os estoques de C e N do solo e resíduos vegetais, assim como a qualidade da MOS quantificada pelo fracionamento físico e a influência dos sistemas de produção nas emissões de CO₂ do solo. Observou-se que os sistemas de produção influenciaram nos atributos químicos e físicos do solo, na produção de raízes e nos teores de C e N do solo, com aumento de produtividade para o sistema de produção de silagem de soja + aruana em rotação com milho+marandu+guandu devido ao maior teor de N no solo, e a extração de material vegetal para a silagem e o pastejo reduziram os teores da fração lábil da MOS.

Palavras-chave: Matéria orgânica do solo. Semeadura direta. Rotação de culturas

ABSTRACT

The integration of agricultural crops with livestock, no-tillage in Brazil, has been used since the 1970s, being a current denomination of Integrated crop-livestock systems (ICSs). These are characterized by being intensive production systems, promoting gains in the efficiency of agricultural and livestock production, that generates a diversity and complexity in the chemical and physical attributes of the soil, changing the dynamics of soil organic matter (SOM), and soil CO₂ emissions. In this sense, an experiment was performed in an area of ICS under no-tillage, on a Rhodic hapludox soil, with 2 silage production systems evaluated in the 2016/2017 harvest. Soybean+guineagrass was cultivated in summer in succession to 2 intercropping modalities with maize, being corn+palisadegrass and corn+palisadegrass+pigeon pea, with subsequent oat overgrowth and lamb grazing in autumn/winter. In the first chapter, we studied the changes in the physical and chemical attributes of the soil, the root production and the silage production of soybean+guineagrass. In the second chapter were analyzed the stocks of C and N of soil and plant residues, as well as the quality of SOM quantified by physical fractionation and the influence of production systems on soil CO₂ emissions. It was observed that the production systems influenced the chemical and physical attributes of the soil, the root production and the soil C and N contents, with increased productivity for the soybean+guineagrass silage production system in rotation with corn+palisadegrass+pigeon pea due to the higher soil N content, and the extraction of plant material for silage and grazing reduced the SOM labile fraction content.

Keywords: Soil organic matter. No tillage. Crop rotation

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL.....	15
CAPÍTULO 1 – ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO EM SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA SOB SEMEADURA DIRETA E PRODUÇÃO DA CULTURA DA SOJA EM CONSÓRCIO COM CAPIM ARUANA PARA SILAGEM DE PLANTA INTEIRA	19
1.1 INTRODUÇÃO	21
1.2 MATERIAL E MÉTODOS	24
1.2.1 Caracterização da área experimental	24
1.2.2 Delineamento experimental e descrição dos tratamentos	24
1.2.3 Histórico e condução do experimento	24
1.2.4 Características climáticas da área experimental e dados meteorológicos.....	27
1.2.5 Coletas e análises de solo	29
1.2.5.1 Atributos químicos.....	29
1.2.5.2 Atributos físicos	29
1.2.5.3 Densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade	30
1.2.5.4 Estabilidade de agregados	30
1.2.5.5 Resistência do solo à penetração.....	31
1.2.6 Coleta e análise de raiz	32
1.2.7 Produtividade de massa de matéria seca de silagem (safra)	32
1.2.8 Análise estatística	33
1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
1.3.1 Atributos físicos do solo	34
1.3.2 Fertilidade do solo.....	44
1.3.3 Produção de raiz.....	49
1.3.4 Produtividade de grãos, produtividade de matéria seca para ensilagem e porcentagem de grãos na silagem.....	50
1.4 CONCLUSÕES	53
REFERÊNCIAS	54

CAPÍTULO 2- EMISSÃO DE CO₂ E QUALIDADE DA MATÉRIA ORGÂNICA EM SISTEMAS SITEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA COM OVINOS	60
2.1 INTRODUÇÃO.....	62
2.2 MATERIAL E MÉTODOS	64
2.2.1 Caracterização da área experimental	64
2.2.2 Delineamento experimental e descrição dos tratamentos	64
2.2.3 Histórico e condução do experimento	65
2.2.4 Fluxo de CO₂	69
2.2.5 Fracionamento físico da mos, estoques de C e N	70
2.2.6 Amostragens de plantas forrageiras e de palha para determinação da matéria seca e estoques de c e n na fitomassa	71
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	73
2.3.1 Produção de massa de matéria seca vegetal, teor de c, teor de n, relação c/n e estoques de c e n na palha.....	73
2.3.2 Fracionamento FÍSICO DA MOS	74
2.3.3 Estoque de C e N no solo.....	78
2.3.4 Fluxo de CO₂, fluxo acumulado de co₂ e emissão relativa.....	80
2.3.5 Emissões C-CO₂ acumulada e emissão relativa (yield-scaled)	84
2.4 CONCLUSÕES.....	87
REFERÊNCIAS	88
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	93
REFERÊNCIAS	95

INTRODUÇÃO GERAL

Como alternativa para recuperação das pastagens degradadas ou rotação de culturas em áreas sob sistema de semeadura direta (SSD) com fertilidade do solo corrigida, iniciou-se o consórcio de culturas graníferas (milho, sorgo, milheto, arroz e soja) com forrageiras tropicais, principalmente do gênero *Urochloa* (syn. *Brachiaria*), em sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA) (KLUTHCOUSKI; YOKOYAMA, 2003). Tal técnica antecipa a formação da pastagem para pastejo, silagem, silagem seguida de pastejo, fenação e, ainda formação de palhada para a continuidade do SSD.

O Brasil é o segundo maior produtor mundial de grãos de soja, com 86,1 milhões de toneladas (30,6% da produção mundial), 35 milhões de hectares cultivados na safra de 2016/2017 e produtividade média de 3.200 kg ha⁻¹ (CONAB, 2018). Porém, a irregularidade da ocorrência de chuvas tem inviabilizado economicamente muitas lavouras de soja para a produção de grãos pela redução da produtividade e aumento dos custos de produção, possibilitando a utilização da planta inteira de soja como silagem para a alimentação animal (GOBETTI et al., 2011), o que diminui os custos com concentrado proteico.

Destaca-se também a importância da inclusão da cultura da soja em áreas manejadas em SIPA e/ou SSD, principalmente em consórcio ou rotação com espécies forrageiras dos gêneros *Megathyrsus* (syn. *Panicum*) e *Urochloa*, utilizadas em muitos casos para produção de forragem do outono à primavera, com posterior dessecação para formação de palhada (CRUSCIOL et al., 2014). Nesse caso, busca-se aumentar o aporte de N no solo, via fixação biológica do N atmosférico, visto que SIPAs ainda são limitados pela carência de N, com alta dependência do uso de adubo nitrogenado para o sucesso da produção (ROSOLEM et al., 2011). Destaca-se também que em SIPA, as entradas de N são basicamente pela aplicação de fertilizantes nas lavouras ou pastagens, fixação biológica pelas leguminosas e deposição de dejetos dos animais (urina e fezes).

Ademais, o balanceamento de dietas para animais suplementados com silagens de gramíneas normalmente é feito com concentrados proteicos, elevando o custo de produção nas propriedades. Pelo exposto, a utilização de leguminosas em consórcio com gramíneas na forma de forragem também pode ser uma alternativa para elevar o teor de proteína bruta (PB) na alimentação de animais (EVANGELISTA et al.,

2003). Diante disso, uma das justificativas para o uso de leguminosa associada a uma gramínea para ensilagem é essa elevação do teor de PB da silagem.

Grandes extensões de área de agricultura e pecuária, principalmente na região do cerrado, encontram-se com pastos degradados e solos depauperados, tanto física como quimicamente, com baixas produtividades. Isso é resultado de escolhas inadequadas de práticas de manejo do solo e rotação de culturas, que reduzem a fertilidade dos solos e causam impedimentos físicos ao desenvolvimento de raízes. Justamente nessas áreas que o SIPA é considerado uma alternativa viável do ponto de vista econômico e ambiental, onde o dilema da produção agropecuária e conservação tem solução compatível com as demandas da sociedade atual, por ser um sistema que alterna na mesma área, o cultivo de grãos e pastagem anuais ou perenes, destinados a produção animal na entressafra e posterior formação de palha para continuação do SSD.

Os SIPAs proporcionam aumento da dinâmica de nutrientes e resultam em satisfatório rendimento de grãos das culturas subsequentes ao pastejo, pois melhoram os atributos químicos do solo através dos resíduos animais (fezes e urina), e também o perfilhamento causado pelo pastejo estimula a produção de novas raízes das forrageiras, aumentando aproveitamento de nutrientes presentes no perfil do solo, além de promover melhorias nos atributos físicos do solo, como porosidade e formação de agregados.

A maior produção de biomassa área e radicular de plantas em SIPAs, também proporciona incremento nos teores de matéria orgânica do solo, com a entrada de diferentes formas de resíduos animais e vegetais. Esses resultados contrapõe-se ao paradigma predominante de que a entrada de animais em rotação sob semeadura direta, afeta negativamente a cultura de grãos, pelo impacto negativo da retirada de material vegetal e nutrientes via pastejo e pela compactação do solo, sendo que cerca de 70-95% dos nutrientes retirados via pastejo retornam ao solo via dejetos animais (WHITEHEAD, 2000), e como já foram digeridos, apresentam-se de forma mais disponíveis para as plantas.

Todo esse conjunto de benefícios da utilização de SIPA sob SSD, melhora os incrementos de C e N no sistema produtivo, via aporte residuais de raízes mortas, fezes, urina e palhada com diferentes relações C/N, resultante da pastagem após o pastejo e das culturas anuais após a colheita. Com isso, ocorre menores perdas de C-CO₂ para a atmosfera devido a maior adição de resíduos, os quais influenciam na

agregação do solo, mantendo o C orgânico protegido da ação de micro-organismos decompositores (Six et al., 2000), ainda intensificam a ciclagem de nutrientes e proporcionam proteção física no solo, sendo assim, as perdas de C-CO₂ são compensadas pela maior produtividade do sistema (grãos, silagem ou carne) e adição de C orgânico via resíduos, que resultam em incremento nos teores de C do solo.

Contudo, o principal benefício da intensificação dos sistemas de pastagem na região de Cerrado, pelo uso de fertilizantes e forragens de melhor qualidade ou introdução de SIPAs, não residem apenas na remoção de CO₂ atmosférico e armazenamento deste no solo, e sim, na redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE) por kg de produto produzido (carne, grãos, forragem e madeira), bem como, na redução da área necessária para produzir a mesma quantidade de produto, melhorando, dessa forma, a eficiência por área.

Após a implantação de SIPA, ocorre alterações na dinâmica da matéria orgânica do solo (MOS), pela inclusão de diferentes formas de resíduos adicionados. Essas alterações podem ser avaliadas no curto prazo através do fracionamento físico da MOS, com reflexos diretos no carbono orgânico particulado (COP), que é fração mais lábil da matéria orgânica. Resultados de pesquisas demonstram efeitos positivos quando se insere no sistema de produção o consórcio de leguminosas como a soja com gramíneas forrageiras, visando aumentar e diversificar a entrada de material vegetal em superfície e em profundidade, principalmente para produção de silagem em função da grande exportação de material vegetal do sistema de produção, sendo as raízes de grande importância para a manutenção de MOS. Raízes de leguminosas possuem sistema radicular pivotante, enquanto que o das gramíneas é fasciculado, agressivo e vigoroso. Estas características peculiares podem resultar em mudanças distintas nos atributos físicos e químicos do solo, como aumento da retenção de água, da porosidade, da absorção de nutrientes em camadas mais profundas, processo esse fundamental para a ciclagem de nutrientes no sistema solo-planta e influência nas emissões de CO₂.

Nesse contexto, objetivou-se com esta pesquisa avaliar dois sistemas integrados de produção agropecuários (SIPA), sob sistema de semeadura direta para produção de silagem de planta inteira de soja + capim aruana, e sua influência na qualidade dos atributos físicos e químicos do solo, na produção de silagem e de matéria seca

para cobertura do solo, no desenvolvimento de raízes, na qualidade da MOS e nas emissões de CO₂ do solo.

CAPÍTULO 1 – ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO EM SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA SOB SEMEADURA DIRETA E PRODUÇÃO DA CULTURA DA SOJA EM CONSÓRCIO COM CAPIM ARUANA PARA SILAGEM DE PLANTA INTEIRA

RESUMO

Os sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA), apresentam inúmeras benefícios, com destaque para os incrementos na fertilidade e estruturação física do solos, promovido pela integração de diferentes famílias botânicas com o componente animal, promovendo melhoria da sustentabilidade do agroecossistema. Nesse sentido, o objetivo desta pesquisa foi avaliar a produtividade da cultura da soja para produção de silagem de planta inteira em consórcio simultâneo com capim aruana (*Megathyrsus maximus* cv. Aruana), em sucessão a sistemas de produção com duas modalidades de cultivo da cultura do milho para ensilagem: em consórcio simultâneo com capim marandu na safra e sobressemeadura da aveia na entressafra (MB/A/SA) e milho em consórcio simultâneo com capim marandu e feijão guandu cv. Fava Larga na safra e sobressemeadura da aveia na entressafra (MBG/A/SA), realizadas nas safras anteriores, com pastejo da aveia por borregas no inverno/primavera, formando assim dois sistemas de produção em SIPA. O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados em esquema fatorial 2 x 2 com 8 repetições, consistindo em dois sistemas de produção e duas épocas de avaliação, sendo a primeira em novembro de 2016 e a segunda em novembro de 2017. Além disso, buscou-se avaliar as alterações nos atributos físicos e químicos do solo, produção total de raízes e matéria orgânica no solo, durante o período de desenvolvimento das diferentes culturas na safra 2016/2017. Os resultados deste estudo indicam que os sistemas de produção de silagem em SIPA, mesmo com tráfego intenso de máquinas e com o pastejo na entressafra, foram eficientes em melhorar a macroporosidade, densidade e resistência mecânica a penetração de raízes e nos teores de K do solo, não interferindo na produção de grãos e massa seca de soja consorciada com capim aruana para ensilagem, onde o sistema MBG/A/SA produziu 11% mais silagem que o sistema MB/A/SA.

Palavras-chave: *Glycine max* (L. Merrill). *Megathyrsus maximus*. Consórcio de culturas.

CHAPTER 1- PHYSICAL AND CHEMICAL SOIL ATTRIBUTES IN INTEGRATED CROP-LIVESTOCK SYSTEMS UNDER NO-TILLAGE SYSTEM AND PRODUCTION OF SOY CULTURE IN CONSORTIUM WITH ARUANA GRASS FOR FULL PLANT SILAGE

ABSTRACT

In Integrated crop-livestock systems (ICS), present numerous benefits, highlighting the increases in fertility and physical soil structuring, promoted by the integration of different botanical families with the animal component, promoting the improvement of the sustainability of the agroecosystem. In this sense the objective of this research was to evaluate the productivity of soybean culture for production of whole plant silage in simultaneous intercrop with grass Aruana (*Megathyrsus maximus* cv. Aruana), in succession to production systems with two cultivation modalities maize for silage: in simultaneous intercropping with marandu grass in the harvest and oats overgrowth in the off season (MB/A/SA), and corn in simultaneous intercropping with marandu grass and guandu bean cv. Broad Bean in the crop, and overseeding of oats in the off season (MBG/A/SA), previous seasons, with grazing oats by lambs in winter/spring, thus forming two production systems in ICS. The experimental design used was randomized blocks in factorial 2 x 2 scheme, consisting of two production systems and two evaluation periods, being the first in november 2016 and the second in november 2017. Besides that, we sought to evaluate changes in soil physical and chemical attributes, total root production and soil organic matter during the development period of different crops in the 2016/2017 crop. The results of this study indicate that silage production systems in ICS, even with heavy machine traffic and grazing in the off season were efficient in improving macropority, density and mechanical resistance to root penetration and K contents of soil, not interfering with grain production and soybean dry mass intercropped with aruana grass for silage, where the MBG/A/SA system produced 11% more silage than the MB/A/ SA system.

Keywords: *Glycine max* (L. Merrill). *Megathyrsus maximus*. Crop intercropping.

1.1 INTRODUÇÃO

Os Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPAs) se destacam por serem sistemas produtivos de grãos, carne, leite, lã, e outros, realizados na mesma área, em plantio simultâneo, sequencial ou rotacionado, onde se objetiva maximizar a utilização, os ciclos biológicos das plantas, animais, e seus respectivos resíduos, aproveitar efeitos residuais de corretivos e fertilizantes, minimizar e otimizar a utilização de agroquímicos, aumentar a eficiência no uso de máquinas, equipamentos e mão de obra, gerar emprego e renda, melhorar as condições sociais no meio rural, diminuir impactos ao meio ambiente, visando a sustentabilidade. Tais sistemas são caracterizados por serem planejados para explorar sinergismos e propriedades emergentes, frutos de interações nos compartimentos solo-planta-animal-atmosfera de áreas que integram atividades de produção agrícola e pecuária (MORAES et al., 2014).

Essas interações devem ser planejadas em diferentes escalas espaço-temporais, abrangendo a exploração de cultivos agrícolas (grãos, floresta, etc.) e produção animal (ruminantes e monogástricos) na mesma área, de forma concomitante ou sequencial, e mesmo entre áreas distintas (ANGHINONI et al., 2013), favorecendo a diversificação da produção.

Contribuem assim com a sustentabilidade do Sistema de Semeadura Direta (SSD), através da adição de material vegetal na superfície do solo em quantidade e qualidade suficientes para garantir a ascensão do sistema de produção agropecuário, principalmente em regiões de clima tropical.

A utilização de gramíneas e leguminosas em consorciação para a produção de silagem em SIPA, pode ser uma estratégia interessante para melhorar a qualidade da silagem, pastagem e, conseqüentemente, da cobertura do solo (palhada), melhorando concomitantemente o desempenho zootécnico dos animais (OLIVEIRA et al., 2011). Uma das principais preocupações em áreas de SIPA em relação às propriedades físicas do solo consiste nos possíveis efeitos do pisoteio animal na compactação do solo, que pode interferir negativamente no potencial produtivo das culturas subsequentes (CARVALHO et al., 2005). O uso intensivo do solo, com tráfego de implementos agrícolas e pisoteio animal pode ser fator limitante principalmente em solos argilosos, quando não se adotam o manejo adequado de

pastejo, como: altura adequada de pastejo e capacidade de suporte animal da área a ser pastejada, podendo causar impactos negativos nos atributos do solo, na produtividade de fitomassa aérea e radicular (CARVALHO et al., 2011). Porém, se o manejo do pastejo for correto, não há grandes problemas com degradação das propriedades físicas e químicas do solo.

Além das mudanças na física do solo impostas pelo pastejo, podem ocorrer mudanças na dinâmica de nutrientes desses sistemas, pois durante o pastejo pelos animais, ocorre a retirada de grande quantidade de material vegetal que contém nutrientes. A ciclagem destes nutrientes se dá, principalmente, por meio dos resíduos produzidos pelos animais (urina e fezes), fazendo com que os SIPAs apresentem uma dinâmica de nutrientes diferente dos cultivos tradicionais, sem a inclusão de animais sob pastejo (ASSMANN et al., 2018). O pastejo constante e adequado, faz com que haja um estímulo ao perfilhamento e, conseqüentemente, maior produção de raízes, ocasionando maior ciclagem de nutrientes por estas, já que ao morrerem durante o ciclo de pastejo vão liberando nutrientes, os quais serão absorvidos pelas novas raízes que também absorvem nutrientes em diferentes camadas, melhorando assim a física do solo (SOUZA et al., 2018).

Destaca-se também a importância da inclusão da cultura da soja em áreas manejadas em SIPA e/ou SSD, principalmente em consórcio ou rotação com espécies forrageiras dos gêneros *Megathyrus* e *Urochloa*, utilizadas em muitos casos para produção de forragem do outono à primavera, com posterior dessecação para formação de palhada (CRUSCIOL et al., 2014). O cultivo da soja tem ainda como objetivo, quebrar o ciclo de gramíneas na área e aumentar o aporte de N no solo via fixação biológica do N atmosférico, visto que SIPA ainda são limitados pela carência de N, com alta dependência do uso de adubo nitrogenado para o sucesso da produção (ROSOLEM et al., 2011).

O aumento do aporte de material orgânico (restos vegetais, animais e palhada), permitem a redução das forças mecânicas atuantes sobre o solo e podem contribuir para redução da densidade do solo, resistência do solo a penetração de raízes e aumento na velocidade de infiltração de água no solo, demonstrando assim que o SSD, associado à adição de resíduos orgânicos, pode influenciar significativamente as propriedades mecânicas e hidrológicas do solo, o que promove uma melhoria nas condições para desenvolvimento das culturas, a qual pode resultar em aumento de produtividade.

Solos que possuem uma boa cobertura podem também ser mais eficientes no armazenamento de água por meio do equilíbrio da porosidade de retenção de água, que está relacionado com o movimento de muitos nutrientes essenciais para atingir altos níveis de produtividade de grãos das culturas em sucessão, como a soja, por exemplo. Além disso, obter informações quanto ao balanço dos estoques de carbono orgânico no solo se faz necessário, tendo em vista a grande necessidade por redução das perdas desse elemento nos diferentes sistemas de produção. (COSTA et al., 2008)

O impacto dos diferentes tipos de cobertura e manejos empregados no SSD e SIPA é decorrente das ações antrópicas que, muitas vezes, carecem de medidas mais conservacionistas e sustentáveis. A retirada de material vegetal para a produção de silagem e a ciclagem de nutrientes promovida pela alimentação e excreção dos animais, via pastejo, podem promover variações no balanço de estoque de nutrientes e alterar a dinâmica da física do solo, uma vez que em um sistema de produção intensivo, a ação antrópica historicamente promove aumento das taxas de perda de carbono, em detrimento das taxas de adição, resultando em decréscimo dos teores de matéria orgânica originais no solo, que vem acompanhado geralmente da degradação do mesmo (STEFANOSKI et al., 2013).

Nesse contexto, o objetivo desse trabalho foi avaliar o efeito do histórico de cinco anos do cultivo de milho para silagem em consórcio com capim marandu e em consórcio com capim marandu + feijão guandu, nos atributos físicos e químicos do solo, e na produção de raízes e silagem soja consorciada com capim aruana.

1.2 MATERIAL E MÉTODOS

1.2.1 Caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido na Fazenda Experimental Lageado, em área pertencente à Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia (FMVZ/UNESP) no município de Botucatu/SP (22°51'01"S e 48°25'28"W, com altitude de 777 metros), durante os anos de 2016 e 2017. De acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS et al., 2006), o solo da área experimental é um Latossolo Vermelho Distrófico com 280, 90 e 630 g kg⁻¹ de areia, silte e argila, respectivamente.

1.2.2 Delineamento experimental e Descrição dos Tratamentos

O delineamento experimental foi constituído por blocos casualizados em esquema fatorial duplo 2 x 2, sendo dois sistemas de produção e duas épocas de amostragem, com oito repetições. Os tratamentos consistiram em dois sistemas de produção em SIPA sendo o Tratamento 1: Cultura da soja para produção de silagem de planta inteira em consórcio simultâneo com capim aruana (*Megathyrus maximus* cv. Aruana), em sucessão ao cultivo da cultura do milho para ensilagem em consórcio simultâneo com capim marandu, com a sobressemeadura da aveia preta para pastejo por borregas no inverno/primavera (MB/A/SA); e Tratamento 2: Cultura da soja para produção de silagem de planta inteira em consórcio simultâneo com capim aruana (*Megathyrus maximus* cv. Aruana), em sucessão ao cultivo da cultura do milho para ensilagem em consórcio simultâneo com capim marandu e feijão guandu cv. Fava Larga, com a sobressemeadura da aveia preta para pastejo por borregas no inverno/primavera (MBG/A/SA). Cada parcela foi constituída por 4 m de largura e 12 m de comprimento (48 m²).

1.2.3 Histórico e Condução do Experimento

Até o ano de 2005, o solo da área foi utilizado para produção de silagem de milho e sorgo, sendo que até outubro/2010 se encontrava em pousio, com predominância de capim braquiaria (*Urochloa decumbens* cv. Basilisk [syn. *Brachiaria decumbens* cv. Basilisk]). Nos anos agrícolas 2010/2011 e 2011/2012, a área foi

utilizada para produção de silagem de milho em consórcio com braquiárias na safra, com posterior sobressemeadura de aveia amarela e pastejo por cordeiros entre os meses de agosto e novembro.

No ano agrícola 2012/2013, a área foi utilizada para produção de silagem de planta inteira de soja em consórcio com capim aruana, sendo a pastagem manejada em regime de corte entre os meses de agosto e outubro do mesmo ano. Nos anos agrícolas 2013/2014, 2014/2015, 2015/2016 a área foi utilizada para produção de silagem de milho em consórcio com capim marandu e feijão guandu, com posterior sobressemeadura de aveia preta e pastejo por cordeiros entre os meses de julho a setembro de cada ano.

O período de condução do experimento do referente trabalho, iniciou-se no dia 20 de setembro de 2016 com a realização de calagem superficial, utilizando-se 1500 kg ha⁻¹ de calcário dolomítico, seguindo recomendações de Raij et al. (1996).

Em 13 de novembro de 2016 foi realizada a dessecação das plantas presentes na área experimental (capim marandu) com a aplicação dos herbicidas Glyphosate [isopropylamine salt of N-(phosphonomethyl) glycine] e 2,4-D amine (2,4-Dichlorophenoxyacetic acid) nas doses de 2,44 kg ha⁻¹ do equivalente ácido e 0,67 kg ha⁻¹ do ingrediente ativo, respectivamente.

A cultivar de soja BMX Potência RR (Grupo de maturação: Semiprecoce – 6,6) com hábito de crescimento “indeterminado” foi semeada no dia 02 de dezembro de 2016 na profundidade de 0,03 m, utilizando semeadora-adubadora modelo PDGP Tatu Marchesan para SSD, com densidade de 350.000 sementes ha⁻¹ e espaçamento entrelinhas de 0,45 m. As sementes foram tratadas com fungicida à base de Carboxina + Tiram na dose de 0,06 kg dos i. a. por 100 kg de sementes e inseticida à base de Tiametoxam na dose de 0,12 kg do i. a. por 100 kg de sementes. Posteriormente, as sementes foram inoculadas com inoculante turfoso, contendo bactérias simbiotes da espécie *Bradyrhizobium japonicum* (SEMIA 5079 e SEMIA 5080 na concentração de 5 x 10⁹ rizóbios por grama), utilizando-se 0,5 kg por 100 kg de sementes. Também foi misturado às sementes fertilizante mineral líquido à base de P₂O₅, Mo e Co (0,426; 0,284 e 0,028 kg L⁻¹, respectivamente), na dose de 0,2 L do produto comercial ha⁻¹.

No estágio V4 foi feita aplicação de inseticida de contato, ingestão e sistêmico, à base de tiametoxam 141 g L⁻¹ + Lambda Cialotrina 106 g L⁻¹ (nome comercial Engio Pleno) na dose de 150 ml ha⁻¹ em 200 litros de volume de calda. No estágio R1, foi

realizada aplicação preventiva de fungicida mesostemico e sistêmico a base de Trifloxistrobina 150 g L^{-1} + Protiokonazol 175 g L^{-1} (nome comercial FOX) na dose 200 ml ha^{-1} e inseticida de contato, ingestão e sistêmico a base de tiametoxam 141 g L^{-1} + lambda cialotrina 106 g L^{-1} (nome comercial ENGEO PLENO) na dose de 200 ml ha^{-1} , combinados com óleo mineral adjuvante 428 g L^{-1} (nome comercial NIMBUS) na dose de 150 ml ha^{-1} . O controle do percevejo verde da soja e percevejo marrom, foi realizado no estágio R4, com aplicação de inseticida de contato à base de acefato 750 g (nome comercial AQUILA), na dose de 800 g ha^{-1} e aplicação com fungicida mesostemico e sistêmico à base de Trifloxistrobina 150 g L^{-1} + Protiokonazol 175 g L^{-1} (nome comercial FOX) na dose de 250 ml ha^{-1} , combinados com óleo mineral adjuvante 428 g L^{-1} (nome comercial NIMBUS) na dose de 150 ml ha^{-1} . A última aplicação ocorreu no estágio R6, com fungicida de contato e sistêmico à base de azoxistrobina 300 g kg^{-1} + Benzovindiflupir 150 g kg^{-1} (nome comercial ELATUS) na dose de 200 g ha^{-1} e inseticida de contato, ingestão e sistêmico à base de tiametoxam 141 g L^{-1} + lambda cialotrina 106 g L^{-1} (nome comercial ENGEO PLENO) na dose de 200 ml ha^{-1} , combinados com óleo mineral adjuvante 428 g L^{-1} (nome comercial NIMBUS) na dose de 150 ml ha^{-1} .

O capim aruana foi semeado na entrelinha da cultura da soja na profundidade de $0,06 \text{ m}$, na quantidade de $600 \text{ pontos de VC ha}^{-1}$, conforme recomendação de Kluthcouski; Yokoyama (2003). A adubação mineral de semeadura foi realizada de acordo com as recomendações de Ambrosano et al. (1997) para a cultura da soja, sendo $90 \text{ kg de P}_2\text{O}_5$ e $90 \text{ kg de K}_2\text{O}$ por hectare ($600 \text{ kg de 0-15-15}$). Por se tratar de colheita para ensilagem, aos 30 dias após a emergência (DAE) das plântulas de soja foi realizada adubação potássica de cobertura aplicando 60 kg ha^{-1} de K_2O (100 kg ha^{-1} do fertilizante mineral cloreto de potássio). A colheita mecânica da cultura da soja em consórcio com capim aruana para ensilagem ocorreu no dia 16 de março de 2017, quando as plantas de soja se encontravam no estágio fenológico R₇ (início da maturação dos grãos e 50% de folhas amareladas), de acordo com classificação de Fehr; Cavinness (1977) e recomendação de Leonel et al. (2008). A colheita foi realizada na altura de $0,15 \text{ m}$ utilizando colhedora de forragem de precisão modelo JF 1600 AT (12 facas). O material foi colhido, picado em partículas médias entre 3 e 6 mm e armazenado em silo tipo “bag” de $1,50 \text{ m}$ de diâmetro (embolsadora de forragem), com compactação de 600 kg m^{-3} de massa verde.

No dia 14 de abril de 2017, a aveia preta foi sobressemeada por meio de semeadora-adubadora modelo PDGP Tatu Marchesan para SSD, com espaçamento de 0,17 m entrelinhas, utilizando-se 65 kg ha⁻¹ de sementes puras viáveis (SPV), seguindo as recomendações de Adami; Pitta (2012). Não foi realizada adubação na aveia, uma vez que objetivou-se avaliar o efeito residual das adubações e cultivos anteriores.

Foram utilizadas 10 borregas Texel na fase de recria para cada tratamento, com idade média de 90 dias e peso vivo inicial médio de 25 kg, oriundas de uma criação comercial. O sistema de pastejo adotado foi o contínuo. Os piquetes foram delimitados com cerca elétrica de seis fios e os animais tinham livre acesso à água e foram disponibilizados sombrites para maior conforto térmico dos animais. À partir das 07:00h, as borregas eram alocadas em seus respectivos piquetes e recolhidas à partir das 17:00h em um galpão coberto. Após o recolhimento à tarde nas baias, as borregas eram suplementadas com concentrado + silagem proveniente do mesmo tratamento. O período de pastejo foi de aproximadamente 40 dias, nos meses de agosto e setembro de 2017.

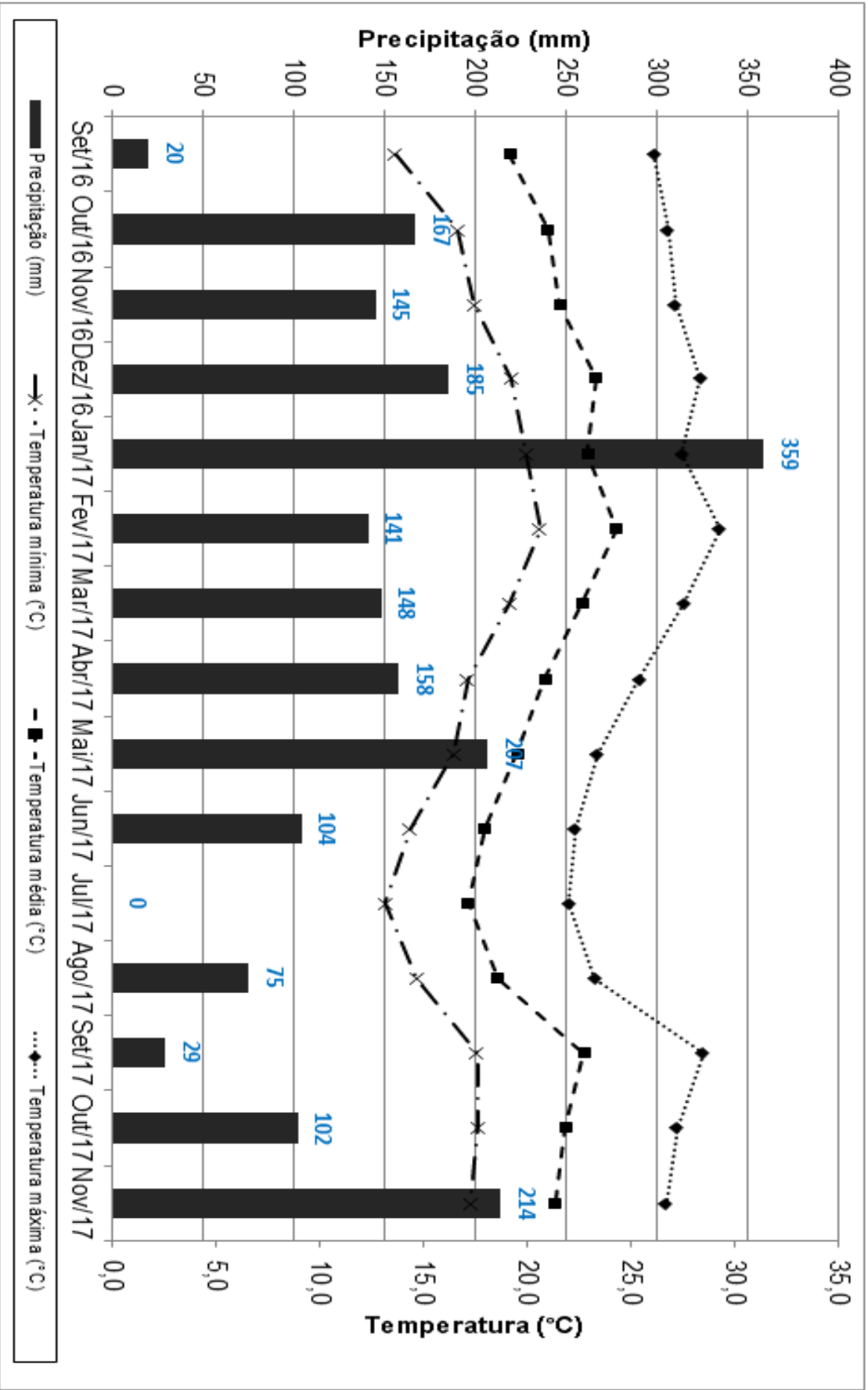
1.2.4 Características climáticas da área experimental e dados meteorológicos

De acordo com a classificação de Köppen, o clima predominante na região é do tipo Cwa, que se caracteriza pelo clima tropical de altitude, com inverno seco e verão quente e chuvoso (ALVARES et al., 2013).

Os dados climáticos foram obtidos na estação meteorológica do Departamento de Solos e Recursos Ambientais situado nas coordenadas geográficas 22°50'48" S e 48°26'06" W com altitude de 817,74 m e localizada a 1142 m de distância da área experimental. A precipitação anual histórica (média de 35 anos) para Botucatu é de 1501 mm, sendo que as médias históricas de outubro a março correspondem a 74,8% do total anual, com 1123 mm e, os meses de abril a setembro correspondem a 25,2% do total anual, com 379 mm.

Os valores mensais acumulados registrados para precipitação pluviométrica, temperaturas máxima e mínima durante o presente experimento estão apresentados na Figura 1.

Figura 1. Dados climáticos durante a condução do experimento em 2016 e 2017, Botucatu-SP



1.2.5 Coletas e Análises de solo

1.2.5.1 Atributos químicos

As coletas de solo foram realizadas nos meses de novembro de 2016 e 2017, após o pastejo dos animais. Utilizou-se trado tubular e fez-se retiradas em três pontos amostrais por parcela, nas camadas de 0,0 a 0,05 m; 0,05 a 0,10 m; 0,10 a 0,20 m; 0,20 a 0,40 m.

Essas amostras foram secas ao ar, destorroadas, passadas em peneira de 2 mm e acondicionadas em sacos plásticos devidamente identificados. A análise química foi realizada no laboratório de Relações Solo-Planta do Departamento de Produção e Melhoramento Vegetal e Agricultura da FCA/UNESP, Botucatu (SP). Determinou-se pH (CaCl_2), H+Al, fósforo (resina), cálcio, magnésio, potássio e enxofre conforme metodologia proposta por Raij et al. (2001).

Os teores de carbono (C) e nitrogênio (N) foram obtidos por meio de analisador elementar automático (Modelo TruSpec™ CHNS, da LECO®).

1.2.5.2 Atributos físicos

A coleta indeformada de solo também foi realizada nos meses de novembro de 2016 e 2017, após o pastejo dos animais. Coletou-se o solo em trincheiras abertas em cada parcela experimental, totalizando 16 trincheiras em cada época. As trincheiras foram abertas com auxílio de mini retroescavadeira, enxada e pá de ponta. As amostras foram retiradas na parede da trincheira nas camadas de 0,0 a 0,05 m; 0,05 a 0,10 m; 0,10 a 0,20 m; 0,20 a 0,40 m.

Foram retirados aproximadamente 2 kg de torrões indeformados, totalizando 64 amostras por época de avaliação, para análise estabilidade de agregados.

Também foram coletadas amostras indeformadas, com auxílio de cilindros de inox, com 0,05 m de altura e 0,05 m de diâmetro, em duplicata, totalizando 128 amostras, para análises de densidade do solo, porosidade total, macroporosidade, microporosidade e resistência do solo à penetração. Os anéis foram envoltos em plástico filme e acondicionados em geladeira, objetivando-se preservar ao máximo a estrutura e umidade do solo até a realização das análises. As amostras foram coletadas de acordo com metodologia descrita em EMBRAPA (1997).

1.2.5.3 Densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade

As amostras de anéis volumétricos foram saturadas em água por 48 horas, pesadas em balança para verificação do peso saturado, e posteriormente foram submetidas ao potencial matricial de 0,006 MPa em aparelho extrator de Richards (KLUTE, 1986) com placas porosas de cerâmica para suportar pressão de 1 bar. Após atingirem o equilíbrio nesta pressão, retirou-se as mostras do aparelho e procedeu-se a pesagem e secagem das amostras em estufa de aeração forçada a 105° C por 48 horas. Desta forma, foi possível calcular a densidade do solo (DS), pelo quociente da massa das amostras secas e o volume do anel volumétrico; a porosidade total (PT), pela diferença de massa do solo saturado e seco; a macroporosidade (MA), considerando que a tensão de 0,006 MPa é suficiente para retirar toda a água retida nos macroporos (MA) e que a água restante representa o volume de microporos (MI), sendo a microporosidade (MI) obtida pela diferença entre PT e MA, de acordo com metodologia descrita em EMBRAPA (1997).

1.2.5.4 Estabilidade de agregados

As amostras de solo (torrões) foram acondicionadas em sacos plásticos e posteriormente pré-selecionadas em um jogo de peneiras sobrepostas, tendo as peneiras superior e inferior, malhas de 8 e 4 mm, respectivamente. Para a avaliação da estabilidade dos agregados utilizou-se a porção que passou pela malha de 8 mm e ficou retida na de 4 mm.

Os agregados do solo pré-selecionados foram avaliados quanto à estabilidade de agregados via úmida, conforme metodologia sugerida por Kemper; Chepil (1965), utilizando o aparelho de oscilação vertical (YODER, 1936).

Cada conjunto foi composto por 5 peneiras com as seguintes malhas: 2,0, 1,0, 0,5, 0,25 e 0,105 mm. A análise de agregados foi realizada em duplicata, sendo que o tamisamento mecânico em água foi realizado por 15 minutos.

Com o peso do solo seco de cada classe de agregados, bem como o peso seco total das amostras, os valores de diâmetro médio ponderado (DMP) e diâmetro médio geométrico (DMG) foram calculados através das equações 1 e 2, respectivamente. Calculou-se, também, o índice de estabilidade dos agregados

(IEA) utilizando a equação 3 (CASTRO FILHO et al., 1998) e a porcentagem de agregados retidos na peneira de 2,0 mm.

$$DMP = \sum_{i=1}^n (x_i \cdot w_i) \quad (1)$$

$$DMG = \frac{\exp \sum_{i=1}^n (w_p \cdot \ln w_i)}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (2)$$

Onde:

x_i = diâmetro médio das classes;

w_i = proporção de cada classe em relação ao total;

w_p = peso dos agregados de cada classe (g).

$$IEA = ((PAS - wp_{25}) / PAS) \times 100 \quad (3)$$

Onde:

PAS= peso da amostra seca;

wp_{25} = peso dos agregados menores que 0,25 mm.

1.2.5.5 Resistência do solo à penetração

A resistência do solo à penetração foi obtida após as amostras serem submetidas à pressão de 0,006 MPa no parêntese extrator de Richards (EMBRAPA,1997).

Em seguida, essas amostras foram submetidas ao teste de resistência mecânica à penetração (RP), utilizando-se um penetrômetro de bancada da marca Marconi,

modelo MA 933. Esse aparelho é composto por uma célula de carga com capacidade nominal de 20 kg, acoplada na extremidade de um braço mecânico movimentado verticalmente por uma rosca-sem-fim. Uma haste metálica, com diâmetro de 6 mm e com ponteira cônica com semiângulo de 30° e área da base de 0,1256 cm², foi utilizada para penetrar nas amostras.

A velocidade de deslocamento vertical da haste foi de 1,0 cm min⁻¹, até a profundidade de 4,0 cm do anel metálico, com taxa de amostragem de 1 ponto s⁻¹, obtendo-se um total de 180 valores. As leituras foram obtidas por meio de software automatizado de aquisição de dados e armazenados em arquivos de extensão “txt”. Os valores de leitura utilizados para cálculo da resistência do solo à penetração, são provenientes da porção intermediária longitudinal do anel, ou seja, foram desconsiderados 0,01 m do extremo superior e 0,01 m do extremo inferior.

1.2.6 Coleta e análise de raiz

Foram retiradas em duplicata amostras de raízes contidas na linha e entrelinha da soja visando obter uma amostra homogênea dentro da parcela. As coletas foram realizadas quando a soja atingiu seu pleno florescimento (estádio R2). Retirou-se amostras das camadas de 0,0 a 0,05 m; 0,05 a 0,10 m; 0,10 a 0,20 m; 0,20 a 0,40 m.

As raízes foram coletadas com auxílio de trados tubulares de 0,05 m de diâmetro, os quais foram introduzidos no solo com auxílio de marreta. As amostras com porção de solo e as raízes foram acondicionadas em sacos plásticos e armazenadas em geladeira até que fossem processadas. No processamento, essas amostras foram lavadas em água corrente para obtenção das raízes, às quais foram armazenadas em potes plásticos com solução de álcool a 50% e acondicionadas em geladeira a 5° C até o momento da análise. Posteriormente, as raízes secas e levadas a estufa de circulação forçada até atingirem peso constante, para determinação de massa de matéria seca de raízes.

1.2.7 Produtividade de massa de matéria seca de silagem (safra)

Foram coletadas as plantas de soja e capim aruana contidas em cinco linhas centrais espaçadas em 0,45 m com 5 m de comprimento por parcela (11,25 m²),

para tal realizou-se o corte manualmente com auxílio de tesoura de poda. As plantas foram divididas em parte residual da colheita da silagem (da base da planta até 0,15 m de altura, ou seja, altura de colheita da plataforma da colhedora) e em parte aérea ensilada (acima de 0,15 m de altura).

O material vegetal de cada parcela foi pesado e uma amostra representativa foi retirada e colocada em estufa de ventilação forçada de ar a 65°C por 72h para determinação do teor de matéria seca de cada fração. O somatório da massa de matéria seca dessas frações resultou na produtividade de matéria seca total ensilada e residual do processo de colheita, que foram extrapoladas para kg ha^{-1} .

Os grãos de soja foram debulhados de forma manual para determinação da produtividade de grãos, transformando-se a massa de grãos para kg ha^{-1} a 13% de umidade (13% base úmida). A massa de grãos constituiu a parte ensilada.

1.2.8 Análise Estatística

Todos os dados foram inicialmente testados quanto à normalidade através do teste de Shapiro-Wilk (1965). Todos os dados foram distribuídos normalmente ($W \geq 0,90$). Em seguida, os dados foram submetidos à análise de variância (teste F), e a comparação entre as médias foi realizada pelo teste de t LSD ($p \leq 0,05$), utilizando o software SISVAR (FERREIRA, 2011).

1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

1.3.1 Atributos físicos do solo

Apenas a variável densidade do solo (DS) teve efeito significativo para a interação de sistemas de produção e épocas de avaliação nas camadas de solo 0,0 - 0,05 a 0,05 - 0,10 m (Tabela 1). De modo geral, observou-se redução dos valores da densidade ao longo do tempo, principalmente na camada de 0,0 - 0,05 a 0,05 - 0,10 m, tendo o sistema MBG/A/SA apresentado os menores valores.

De acordo com Reichert et al. (2003) o valor de densidade ideal para o bom desenvolvimento das culturas varia de 1,4 a 1,6 kg dm⁻³ em solos argilosos, corroborando com os valores encontrados no presente experimento (Tabela 1). Provavelmente, a redução nos valores da densidade (DS) que ocorreu durante os cultivos foi devido à exploração do solo por sistemas radiculares distintos (gramíneas e leguminosas), tanto do consórcio milho, capim marandu e feijão guandu, quanto do consórcio da cultura da soja com o capim aruana, uma vez que após a decomposição da massa radicular do feijão guandu, capim marandu e aveia preta, estas podem contribuir para formação de uma arquitetura de poros, conferindo ao solo maior macroporos (MA) e, conseqüentemente, menor DS.

Efeito semelhante foi observado por Costa et al. (2015), em condições ambientais semelhantes às do presente estudo, que ao longo do tempo de cultivo com consórcio de culturas houve redução da DS com incremento da MA e porosidade total (PT), tanto nas camadas superficiais (0,0 - 0,10 m) como nas subsuperficiais (0,10 - 0,20 m), demonstrando a importância da rotação e consórcio de culturas visando a melhoria da estrutura do solo, o que pode conferir maior produtividade das culturas.

Tabela 1. Agregados maiores que 2,0 mm (AGR>2), diâmetro médio geométrico (DMG), diâmetro médio ponderado (DMP), índice de estabilidade de agregados (IEA), densidade do solo (DS), macroporosidade (MA), microporosidade (MI), porosidade total (PT) e resistência do solo à penetração (RP) nas camadas do solo de 0,0 - 0,05 e 0,05 - 0,10 m, 0,10 - 0,20 e 0,20 - 0,40 m de profundidade.

Fonte de variação	AGR>2 (%)	DMG -----(mm)-----	DMP (%)	IEA (%)	DS (Mg m ⁻³)	MA -----(m ³ m ⁻³)-----	MI (m ³ m ⁻³)	PT (MPa)	RP (MPa)
<i>Camada 0,0 - 0,05 m</i>									
Sistema de produção									
MB/A/SA	73,85 a	2,89 a	3,89 a	93,69 a	1,44 a	0,12 b	0,38 a	0,50 a	2,08 a
MBG/A/SA	71,41 a	2,80 a	3,80 a	92,13 a	1,43 a	0,15 a	0,34 b	0,49 a	1,91 a
Época									
Novembro 2016	74,42 a	3,00 a	3,98 a	93,99 a	1,51 a	0,17 a	0,37 a	0,54 a	2,00 a
Novembro 2017	70,84 a	2,70 b	3,71 a	91,83 a	1,33 b	0,19 b	0,35 a	0,54 a	1,99 a
Probabilidade de F									
Sistema de produção	0,4947	0,5373	0,6384	0,4097	0,0911	0,0146	0,0010	0,0158	0,3370
Época	0,3189	0,0466	0,1615	0,2559	<0,0001	0,0001	0,1137	0,0910	0,9545
Sistema x Época	0,0359	0,7099	0,2394	0,8634	0,0302	0,2358	0,0108	0,2589	0,8640
<i>Camada 0,05 - 0,10 m</i>									
Sistema de produção									
MB/A/SA	70,10 a	2,87 a	3,64 a	90,67 a	1,51 a	0,12 a	0,36 a	0,47 a	2,50 a
MBG/A/SA	53,05 b	2,60 a	3,42 a	88,53 a	1,48 a	0,11 a	0,38 a	0,49 a	2,28 a
Época									
Novembro 2016	65,12 a	2,92 a	3,79 a	91,18 a	1,54 a	0,11 a	0,38 a	0,50 a	2,53 a
Novembro 2017	58,04 a	2,55 b	3,58 a	88,03 a	1,45 b	0,12 a	0,36 b	0,48 b	2,25 a
Probabilidade de F									
Sistema de produção	0,0027	0,1276	0,1563	0,3462	0,3918	0,5955	0,2137	0,0689	0,5844
Época	0,1729	0,0405	0,1027	0,1698	0,0089	0,3201	0,7076	0,0414	0,5103
Sistema x Época	0,2284	0,6930	0,1563	0,8543	0,0778	0,7675	0,8688	0,3810	0,6201

Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste t (LSD) (p≤0,05).

Continuação Tabela 1.

Fonte de variação	AGR>2 (%)	DMG ----- (mm) -----	DMP	IEA (%)	DS (Mg m ⁻³)	MA	MI (m ³ m ⁻³)	PT	RP (MPa)
<i>Camada 0,10 - 0,20 m</i>									
Sistema de produção									
MB/A/SA	51,84 a	2,33 a	2,82 a	87,65 a	1,53 a	0,10 a	0,36 a	0,46 a	2,52 a
MBG/A/SA	47,02 a	2,23 a	2,76 a	88,98 a	1,56 a	0,12 a	0,37 a	0,49 a	2,25 a
Época									
Novembro 2016	51,82 a	2,37 a	2,82 a	89,73 a	1,62 a	0,10 a	0,37 a	0,47 a	2,39 a
Novembro 2017	47,04 a	2,19 a	2,76 a	86,90 a	1,48 b	0,11 a	0,37 a	0,48 a	2,38 a
Probabilidade de F									
Sistema de produção	0,3496	0,5169	0,8150	0,3942	0,3734	0,5944	0,2216	0,3548	0,2602
Época	0,3542	0,2398	0,7872	0,0784	0,0002	0,3188	0,6415	0,4622	0,9766
Sistema x Época	0,9882	0,3114	0,6982	0,0634	0,1478	0,2666	0,0727	0,7118	0,2049
<i>Camada 0,20 - 0,40 m</i>									
Sistema de produção									
MB/A/SA	35,17 a	1,88 a	1,79 a	85,24 a	1,44 a	0,09 a	0,40 a	0,49 a	2,06 a
MBG/A/SA	38,40 a	1,95 a	2,10 a	85,69 a	1,48 a	0,08 a	0,39 a	0,47 a	2,03 a
Época									
Novembro 2016	41,03 a	1,89 a	1,86 a	85,29 a	1,50 a	0,08 a	0,40 b	0,48 a	2,21 a
Novembro 2017	32,55 a	1,95 a	2,03 a	85,64 a	1,42 b	0,09 a	0,41 b	0,50 a	1,87 a
Probabilidade de F									
Sistema de produção	0,5311	0,1140	0,0324	0,7022	0,3428	0,8989	0,5324	0,4598	0,8954
Época	0,1093	0,1403	0,2112	0,7701	0,0312	0,0134	0,3214	0,1153	0,1102
Sistema x Época	0,9746	0,0884	0,9963	0,1481	0,4697	0,5271	0,1426	0,8393	0,7122

Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste t (LSD) (p≤0,05).

Secco et al. (2004), avaliando níveis de compactação com cultivares de soja, em um Latossolo Vermelho distroférico, verificaram que os estados de compactação obtidos pela passagem de um rolo compressor, mesmo com valores de densidade do solo de $1,5 \text{ g dm}^{-3}$ não foram suficientes para alterar a produtividade de grãos das cultivares de soja testadas. Cabe ressaltar que os dados obtidos por estes autores são compatíveis com os encontrados nos sistemas de produção avaliados na presente pesquisa, com o efeito das leguminosas no sistema MBG/A/SA, que apresentou menores valores de DS entre a primeira e a segunda época de coleta de solo para todas as camadas estudadas, sendo que as camadas 0,0 - 0,05 m e 0,05 - 0,10 m apresentaram efeito significativo da interação de época e sistemas de produção (Tabela 2).

Tabela 2. Desdobramento da interação de sistemas de produção e épocas de avaliação para densidade do solo (DS, em Mg m^{-3})

Sistema de produção	Época	
	Novembro 2016	Novembro 2017
<i>Camada 0,0 – 0,05 m</i>		
MB/A/SA	1,56 aA	1,33 aB
MBG/A/SA	1,47 bA	1,34 aB
<i>Camada 0,05 - 0,10 m</i>		
MB/A/SA	1,59 aA	1,43 aB
MBG/A/SA	1,49 bA	1,47 aA

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste t LSD ($p \leq 0,05$). Letras minúsculas na coluna comparam os tratamentos e letras maiúsculas nas linhas comparam as épocas.

A densidade do solo é uma das propriedades físicas mais utilizadas para se avaliar as possíveis alterações proporcionadas pelo manejo do solo em SIPA (FIDALSKI & ALVES, 2015; ARAUJO-JUNIOR, 2017), uma vez que este atributo é diretamente influenciado pela quantidade de raízes, tráfego de máquinas, pastejo animal e manejo de adubação e calagem, além disso as condições climáticas durante a condução do experimento foram favoráveis ao bom desenvolvimento tanto do consórcio da soja com capim aruana cultivada no verão, quanto da aveia semeada no outono. Durante o período de pastejo nos meses de agosto e setembro de 2017, ocorreu uma precipitação média de 104 mm, favorecendo o perfilhamento e rebrota da pastagem de inverno e a produção de novas raízes, contribuindo para redução na densidade do solo.

Em trabalho realizado por Mendonça et al. (2013), com avaliação de alterações dos atributos físicos do solo em SIPA sob SSD, em condições edafoclimáticas semelhantes às do presente estudo, verificaram valores para MA, MI, PT e DS muito próximos dos observados nesta pesquisa (Tabela 1). De acordo com estes mesmos autores, a melhoria nos atributos físicos do solo, se dá pelos diferentes estádios de decomposição das raízes das forrageiras.

Avaliando a densidade do solo sob intensidades de pastejo e métodos de pastoreio com cordeiros, sob pastagem de azevém após o cultivo da soja no verão, em um Argissolo Vermelho distrófico, com duas épocas de avaliação, após a cultura de verão e após o pastejo no inverno, Carassai et al. (2011) não observaram diferenças entre as áreas com e sem pastejo tanto na fase após pastejo quanto na fase após a cultura de verão, e encontraram valores de densidade do solo para a camada 0,0 - 0,5 m menores que $1,46 \text{ Mg m}^{-3}$, concordando com os valores de DS encontrados nos SIPA estudados, onde ocorreu redução da DS nas duas épocas de avaliação. A redução na DS pode ser influenciada pelas raízes das culturas de verão e pela compressibilidade do solo, essa característica do solo permite que ele se recupere de deformações que lhe foram impostas por meio de pressões, no caso, pelo pisoteio dos cordeiros no inverno e pelo tráfego de máquinas, tal recuperação somente ocorre se a pressão aplicada sobre o solo não ultrapassar a pressão de pré-consolidação, que é o ponto que delimita as deformações (compactação) reversíveis e irreversíveis (DIAS JUNIOR & PIERCE, 1996).

Chioderoli et al. (2012), também confirmaram os benefícios dos sistemas integrados de produção, indicando que o sistema de consórcio de culturas pode melhorar as condições físicas contribuindo para diminuir o efeito compactador de solo que pode ser causado pelo intenso pisoteio animal e tráfego de máquinas agrícolas, principalmente em camadas superficiais, em razão da maior produção de palha proporcionada pelo consórcio, o que melhora a cobertura do solo, promove aporte de matéria orgânica, favorece a infiltração de água, proporciona maior exploração do perfil do solo pelas raízes, diminui o processo erosivo e consequentemente mantém a estabilidade do sistema.

Nesse sentido, menores valores de densidade do solo na camada superficial podem ser atribuídos à maior quantidade de matéria orgânica nesta camada. Braidá et al. (2006) ao determinarem a compactação do solo em um Argissolo Vermelho Amarelo arênico, com textura franco-arenosa e em um Nitossolo Vermelho distrófico

com textura argilosa, observaram que à medida que os teores de carbono orgânico no solo aumentaram, houve a diminuição da densidade. De acordo com Bortolini et al. (2013), teores mais elevados de matéria orgânica do solo (MOS) contribui para a redução da densidade média do solo, uma vez que a MOS é menos densa que a fração mineral, além de levar em consideração que o material orgânico acumulado na camada superficial contribui na redução das forças compactantes.

Em um Latossolo Vermelho distroférico típico, textura argilosa (540 g kg^{-1} de argila), no estado do Rio Grande do Sul, com cultivo da soja no verão e posterior pastejo por bovinos de corte no inverno, Bonetti et al. (2017) observou que a densidade do solo se mostrou eficiente na diferenciação de compactação por pisoteio animal em SIPA, onde a densidade do solo no pasto mantido à 10 e 20 cm de altura foram maiores em relação a densidade do solo de maiores alturas do pasto (30 e 40 cm de altura) e sem pastejo. De acordo com os mesmos autores, a macroporosidade foi reduzida na área de pastejo intensivo (pasto à 10 e 20 cm de altura) e mantidas em níveis adequados na altura de pastejo moderado (altura do pasto à 30 e 40 cm de altura) e sem pastejo. Tais resultados corroboram aos obtidos na presente pesquisa, sugerindo que a melhora na macroporosidade do solo dos dois sistemas de SIPA desse trabalho, nas camadas 0,00 - 0,05 e 0,05 - 0,10 (Tabela 1), está relacionada com o período de pastejo de 40 dias, considerado curto, fazendo com que as gramíneas remanescentes do período de pastejo (15 cm de altura), tivessem um período de aproximadamente 2 meses para se recuperar e produzir mais raízes e matéria seca.

Em todas as camadas de solo houve aumento de macroporosidade para o sistema MBG/A/SA, mas somente na camada 0,0 - 0,05 m esse efeito foi significativo entre os sistemas e entre as épocas de coleta (Tabela 1). Para esta camada, com a menor densidade do solo ocorreu incremento de macroporosidade, diminuição da microporosidade e aumento da porosidade total do solo. Secco et al. (2014) verificaram que valores de macroporosidade menores que $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ na camada de 0,05 – 0,10 m, não interferindo na produtividade de grãos de soja. Os valores de macroporosidade sob SIPA estão relacionados à condição de baixa umidade do solo durante o pastejo e ao alto aporte de biomassa da parte aérea e de raízes, que contribui para a proteção do solo (BONETTI et al., 2015).

Os valores para resistência do solo à penetração (RP) não apresentaram diferença estatística em função das épocas e sistemas de produção (Tabela 1).

Segundo Beutler et al. (2001), a RP aumenta com a compactação do solo, podendo ser restritiva ao crescimento radicular das culturas quando esses valores se encontram acima da faixa entre 1,5 a 3,0 MPa. Entretanto, tal fato não foi constatado na presente pesquisa, uma vez que não se observou reduções de produtividade da soja consorciada com capim aruana, mesmo com valores de RP mais altos, isto pode ser explicado pela redução da densidade do solo ao longo do perfil do solo.

A RP de raízes e a aeração do solo são parâmetros dinâmicos que são principalmente influenciados pela estrutura do solo, textura e teor de água. Interações do teor de água, densidade aparente e aeração tornam difícil caracterizar os efeitos da compactação do solo considerando propriedades individuais do mesmo (CHEN et al., 2014).

Observou-se menores valores de RP para o sistema MBG/A/SA (Tabela 1), isto demonstra que o feijão guandu incluído nesse sistema pode ser considerado como um excelente agente descompactador natural do solo, dispensando a adoção de operações mecanizadas de revolvimento. Nos sistemas produtivos com pastagem, o sistema radicular das plantas forrageiras deixa grandes quantidades de canais devido ao grande volume de raízes deixados pelas gramíneas (SILVA; ROSOLEM, 2001), aumentando a resistência à penetração limitante para o crescimento radicular, o que pode ter acontecido para os sistemas de SIPA estudados, que mantém gramíneas forrageiras durante todo o ano.

Outro fator importante é a boa produção de palhada, que aliada à produção de raízes contribui para diminuir o efeito compactador de solo pelo intenso pisoteio animal e do tráfego de máquinas agrícolas, principalmente em camadas superficiais. As culturas com sistemas radiculares fasciculados e agressivos, como das gramíneas forrageiras tropicais, ajudam na formação de agregados do solo, facilitando assim, o crescimento radicular das culturas no sistema de rotação, que, por sua vez, também atua favorecendo a agregação do solo. Isso reforça a hipótese de que a presença de culturas anuais em consórcio com forrageiras pode contribuir para atenuar os efeitos deletérios causados aos atributos físicos do solo com a intensificação do uso da terra.

Os sistemas de produção não diferiram entre si ($p < 0,05$) quantos aos resultados de estabilidade de agregados na camada 0,00 - 0,05 m, apresentando porcentagem de $AGR > 2mm$ e IEA acima de 70% e 90% (Tabela 1), respectivamente, comprovando que o consórcio da cultura da soja com capim aruana foi eficiente em

melhorar a agregação do solo, pela sua alta capacidade de formação de raízes. Porém, o sistema MB/A/SA, para todas as camadas, obteve as maiores médias de porcentagens de $AGR > 2\text{mm}$, fato que pode estar relacionado com o efeito residual do consórcio milho com braquiária, por se tratar de um consórcio com apenas duas espécies apresenta menor competição entre plantas, que favorece o crescimento e desenvolvimento das raízes de capim marandu e da aveia preta, consequentemente, proporcionando um aumento na porcentagem de $AGR > 2\text{mm}$, já que são espécies com raízes fasciculadas e volumosas, com importante função na agregação do solo.

Na camada 0,05 – 0,10 m observou diferença significativa ($p < 0,05$) para os resultados de $AGR > 2$, com menores valores no sistema MBG/A/AS. No entanto, constatou que esse foi um resultado isolado, já que não foi acompanhado pelos resultados de DMG, DMP e IEA, tão pouco pelos demais resultados de física do solo.

Para todas as camadas de solo estudadas o índice de estabilidade de agregados (IEA) se manteve acima de 85%. Na camada 0,00 - 0,05 m, para o sistema MB/A/SA, o IEA foi de 93%, é importante destacar que nesta camada é depositada toda a palhada dos restos culturais, forrageiras, fezes e urina dos animais durante o pastejo. A estabilidade dos agregados está intimamente relacionada com a capacidade da matéria orgânica de se aderir às partículas minerais do solo, formando as ligações argilo-metal-húmicas (EDWARDS; BREMNER, 1967). Segundo Oliveira et al. (2004), há correlação altamente significativa do aumento no teor de MOS e o aumento da estabilidade de agregados até 0,10 m de profundidade. A contribuição da MOS na formação de agregados é atribuída à processos como a formação de pontes catiônicas, à cimentação entre partículas e à maior estabilidade produzida por exsudatos radiculares e microbianos ao redor e dentro do agregado (CASTRO et al., 2015; CALONEGO et al., 2017).

Ademais o período de pastejo curto, favorece o perfilhamento e o crescimento de raízes das gramíneas pastejadas, e proporciona assim, um efeito benéfico pela melhor ocupação do perfil do solo e, consequentemente, na descompactação deste, visto que as raízes podem apresentar maior densidade e melhor distribuição no solo, tendo assim grande influência sobre a formação e a estabilidade dos agregados.

Houve efeito significativo para diâmetro médio geométrico (DMG) entre as épocas avaliadas, nas camadas de solo 0,0 - 0,05 e 0,05 - 0,10 m (Tabela 1). Em pesquisa realizada por Loss et al. (2011), em SIPA, de braquiária em consórcio com

milho safrinha sob SSD há 17 anos, em um Latossolo Vermelho distroférico típico textura argilosa, os valores de DMG foram de 3,83 e 4,85 mm para as camadas de 0,0 - 0,05 e 0,05 - 0,10 m, respectivamente. No entanto, os menores valores de DMG encontrados neste estudo (Tabela 1) pode ser devido ao menor tempo de adoção do sistema de SIPA (aproximadamente 9 anos), quando comparado ao estudo realizado por Loss et al (2011). De acordo com Maciel (2008), valores baixos de DMG pode ser um indicativo de que a área pode estar passando por um possível período de estabilização da estrutura do solo em relação à condição natural. Assim, tal fato pode indicar que o DMG do solo da presente pesquisa ainda possa estar passando por um processo de estabilização sob o efeito do pisoteio animal durante o pastejo em meio aos sistemas produção empregados.

Paier (2015) estudou SIPA com pastejo de ovinos no inverno com 2 anos de implantação, em condições edafoclimáticas semelhantes às verificadas no presente experimento, e concluiu que o pastejo reduziu o DMG dos agregados do solo na camada de 0,0 - 0,05 m em relação à área sem pastejo, o que pode estar relacionado com a maior pressão que os cascos dos ovinos exercem sobre o solo, por concentrarem toda a força em pequenos pontos do solo, comparados aos rodados dos tratores agrícolas.

Entretanto, resultados diferentes foram encontrados por Scapini et al. (1997) em estudo de SIPA com bovinos. Os autores avaliaram a agregação do solo, após a colheita do milho, antes do pastejo em pastagem consorciada de azevém com aveia, e após a saída dos animais. Os autores observaram DMG de 2,33 mm para a área com pastejo após a saída dos animais e DMG de 1,77 mm para a área não pastejada, considerando a mesma situação para ambas as áreas. Em pesquisa desenvolvida por Lanza Nova (2005), analisando os efeitos do DMG em diferentes intensidades de pastejo e área sem pastejo, foi verificado que o pisoteio não apresentou efeito negativo na estabilidade de agregados do solo avaliada através do DMG, sendo que a área com pastejo intenso não diferiu estatisticamente da área que não foi pastejada.

Conforme Trein et al. (1991) e Albuquerque et al. (2001), em sistemas de produção onde há apenas lavouras anuais, pode ocorrer menor alteração nos atributos físicos do solo do que em sistemas onde há integração de lavoura anuais com pecuária. Para Silva (1993), o processo de melhoramento da estrutura do solo é governado pelo volume, pela extensão e pela agressividade do sistema radicular das

espécies componentes dos sistemas de produção, e pastagens têm maior potencial para reestruturar solos do que plantas anuais. Fato constatado nesta pesquisa, onde os valores de IEA ultrapassaram 85% (Tabela 1), ocorreu redução da DS e, os valores de RP não foram limitantes para a produtividade e desenvolvimento das culturas anuais e forrageiras.

Com isso, os efeitos da compactação do solo dos sistemas utilizados neste trabalho podem estar sendo atenuados e melhorados pela ação das raízes das gramíneas utilizados nos consórcios (milho x capim marandu), aveia preta na entressafra e o capim aruana consorciado com a cultura da soja, pois essas gramíneas permanecem na área experimental durante todo o ano, sendo dessecadas somente em novembro para o plantio da próxima safra.

Em sistemas de produção intensivos, ao contrário do que ocorre com a colheita de grãos, na qual a colhedora colhe uma ampla faixa em cada passada pela área (tamanho variável em função da plataforma da colhedora), a colheita para silagem com colhedoras de forragem de linha dupla 0,40 m, acopladas ao trator, eleva enormemente o trânsito na área, inclusive com o rodado do trator passando sobre quase todas as linhas de semeadura. Além disso, o peso da carreta carregada de material para ensilagem também não pode ser desconsiderado. O trânsito excessivo de máquinas na área, uma vez que há o cultivo de culturas durante todos os meses do ano, considerando-se inclusive as operações de semeadura, adubação, além das várias aplicações de inseticidas na cultura da soja, ao longo do tempo, podem prejudicar o desenvolvimento das culturas em sucessão, proporcionando alterações nos atributos físicos do solo, causando compactação. Essas consequências dependem ainda do clima da região e do tipo de solo.

Assim, fica evidente os efeitos benéficos dos SIPA na melhoria da qualidade física do solo, atenuando o processo de compactação de sistemas intensivos. Diversos trabalhos de pesquisa demonstraram o aspecto positivo nos atributos físicos do solo quando se adota o SIPA sob SSD (FLORES et al., 2007; MENDONÇA et al., 2013; COSTA et al., 2015; PARIZ et al., 2017), como a redução da compactação do solo, refletindo no incremento da macroporosidade e porosidade total e diminuição da resistência mecânica à penetração e densidade do solo, assim como o verificado na presente pesquisa.

1.3.2 Fertilidade do solo

De modo geral, pode-se notar que os teores de Ca, Mg, P, S e K são considerados de médio a alto segundo Raij et al. (1996) (Figura 2). Na camada de 0,20 a 0,40 m houve redução dos teores de Ca, Mg e K com valores considerados de baixo a médio. O pH variou de 4,53 a 5,12 que é considerado como alta acidez. Os teores de P abaixo da camada de 0,20 m são considerados muito baixos (RAIJ et al., 1996), o que já era esperado devido à baixa mobilidade desse elemento no solo, resultando em maiores teores em camadas superficiais onde há adição desse elemento na forma mineral e orgânica (MALAVOLTA, 2006).

Observa-se que na camada 0,05 - 0,10 m houve influência das épocas de avaliação no pH do solo (Figura 2), sendo que o menor valor de pH do solo ocorreu na segunda época de avaliação, antes do plantio da safra de verão. Esses valores de pH estão abaixo do recomendado para a cultura da soja, porém não interferiram na produção e desenvolvimento da cultura da soja em consórcio com o capim aruana. Martins et al. (2014) verificaram que áreas com pastejo necessitam de um pH menor (4,8 a 4,9) do que as áreas sem pastejo (5,2), para atingir a saturação de bases recomendada para a cultura da soja, isso ocorre pela maior ciclagem de nutrientes proporcionada pela inserção do componente animal. Infere-se assim o pH menor não limitou a produtividade da soja.

Verificou-se que a acidez potencial ($H+Al$) teve comportamento inverso, ou seja, menores valores foram obtidos à medida que o pH aumentou. Este comportamento é esperado, tendo em vista que o maior valor de pH significa menor quantidade de íons H^+ em detrimento dos íons OH^- na solução do solo, diminuindo assim os valores da acidez potencial.

É importante enfatizar que os SIPAs são caracterizados pela maior complexidade e por serem sistemas mais intensivos de produção quando comparados aos normalmente utilizados para agricultura e pecuária. Na presente pesquisa, com a produção de silagem, o solo fica mais sujeito à acidificação devido à elevada extração de nutrientes, que promove a liberação de sítios de adsorção, podendo ocorrer maior concentração de íons H^+ , consequentemente aumentando a acidez, como o observado para a avaliação em novembro de 2017 (Figura 2).

Figura 2. Acidez do solo (pH), hidrogênio + alumínio (H+Al), fósforo (P) e enxofre (S) nas camadas de solo de 0,0 - 0,05, 0,05 - 0,10, 0,10 - 0,20 e 0,20 - 0,40 m de profundidade

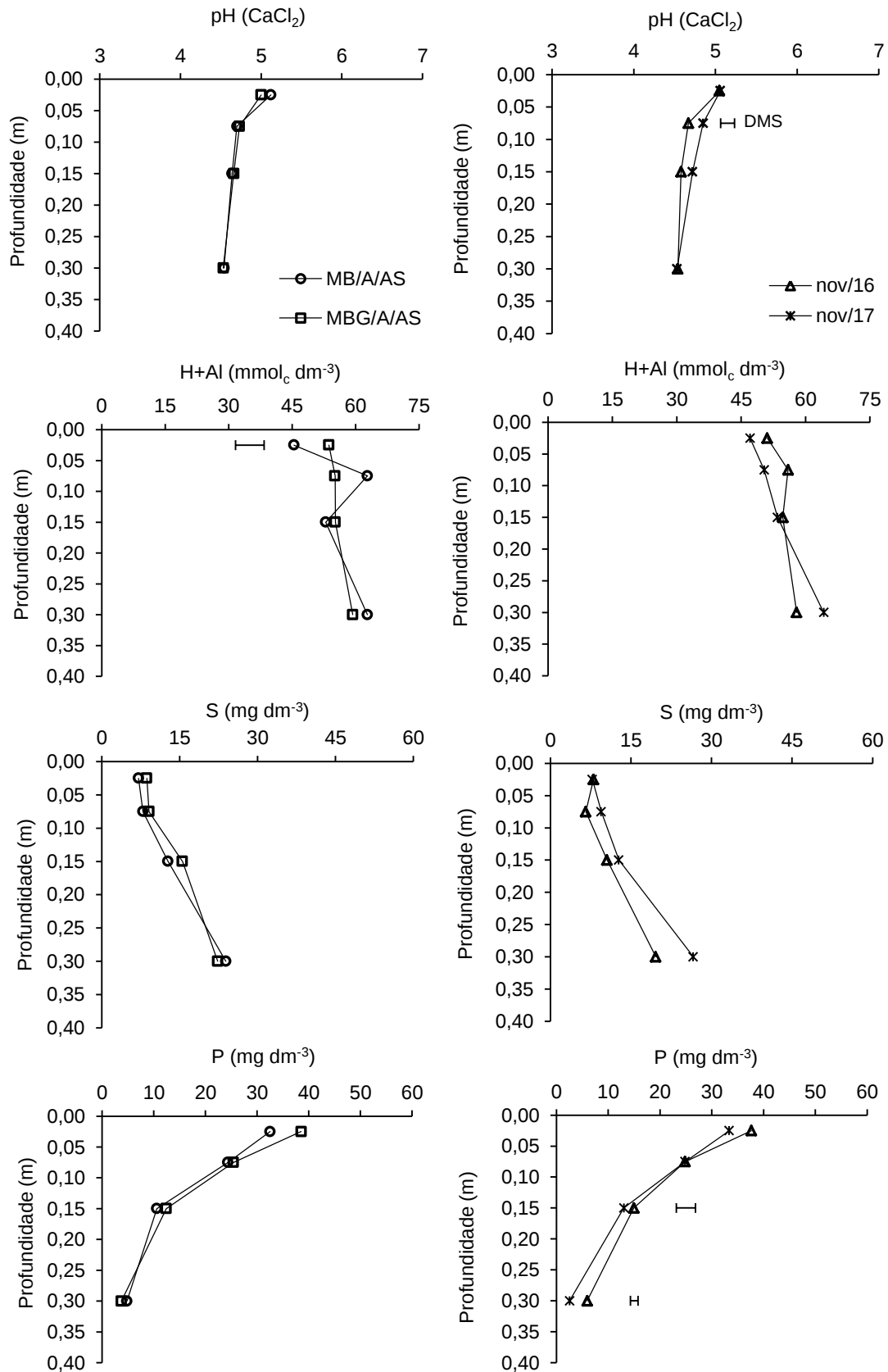
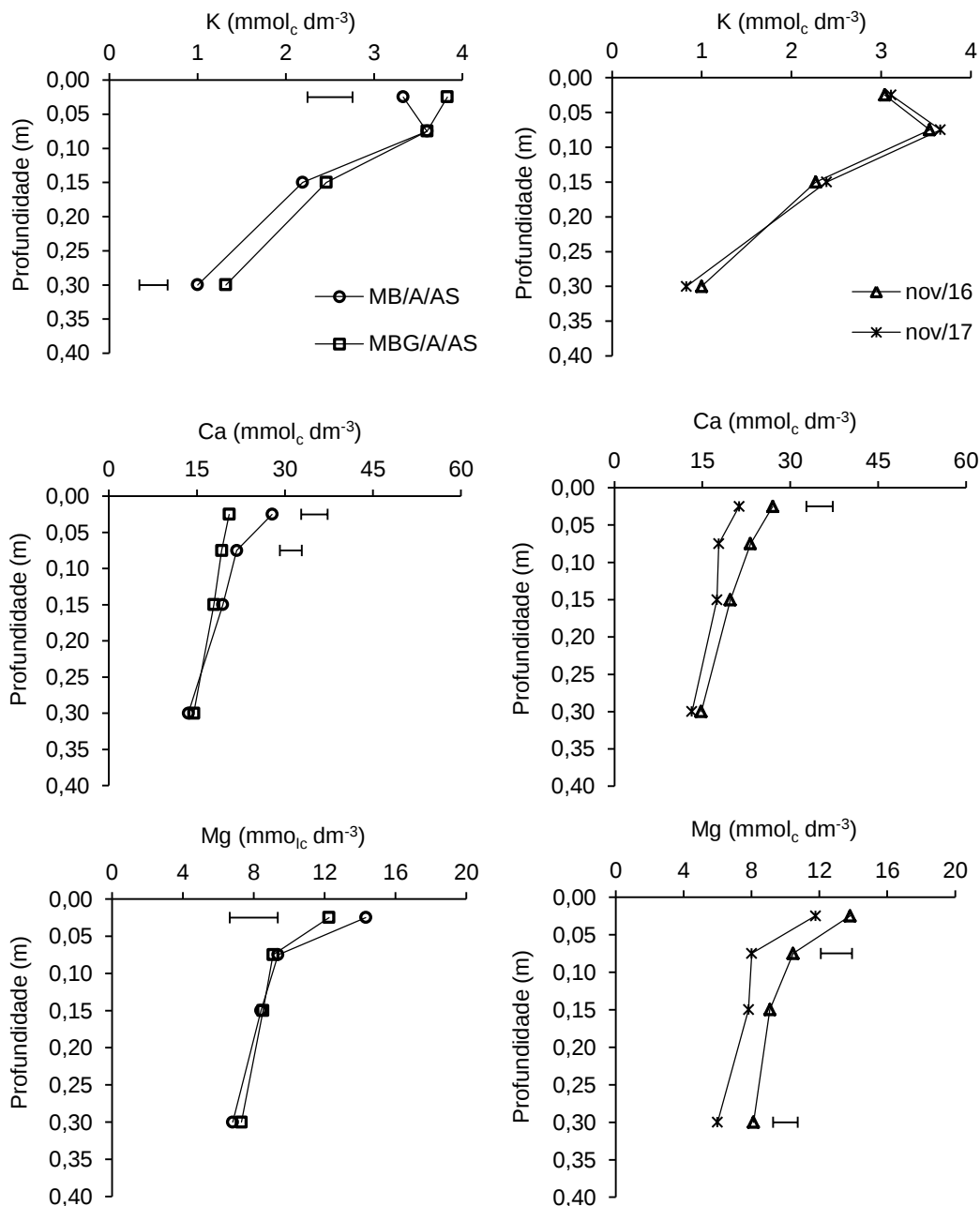


Figura 3. Potássio (K), Cálcio (Ca) e magnésio (Mg) nas camadas de solo de 0,0 - 0,05, 0,05 - 0,10, 0,10 - 0,20 e 0,20 - 0,40 m de profundidade



Na camada 0 - 0,05 cm, os teores de K, Ca e Mg foram maiores para o sistema de produção MB/A/SA, esses maiores valores podem estar relacionados com o maior aporte de resíduos vegetais deixados por este sistema. Vale destacar a elevada altura de corte da silagem de milho (0,45 m) nos anos anteriores durante os cultivos, e que os colmos de milho deixados na superfície do solo são responsáveis pela liberação de K para o solo. Cabe ressaltar também que o K é o nutriente liberado em maiores quantidades e em maior velocidade, quando comparado aos

demais nutrientes. Calonego et al. (2005) em trabalho com milho, demonstraram que à medida que a planta dessecada senesce e recebe chuvas, libera potássio, que é retornado ao solo. Dessa maneira, o aumento na produtividade de matéria seca das culturas, pela melhoria da fertilidade e pelo bom uso do solo, intensifica a ciclagem de K (FERREIRA et al., 2011).

Em SIPA não há período de pousio entre uma cultura e outra, ou seja, a área é cultivada durante praticamente todos os meses do ano (safra e entressafra). Por isso, o K absorvido pelas culturas permanece na maior parte do tempo no tecido vegetal, protegido de perdas por erosão e lixiviação. A reciclagem de K em SIPA tem sido elevada e diretamente relacionada com a intensidade de pastejo (MORAES et al., 2014). Cabe salientar que em áreas de remoção de forragem para capineiras ou silagem, a reposição de K é um fator primordial para não exaurir as reservas deste nutriente no solo, principalmente nos sistemas estudados nesse experimento, pois o K é um nutriente muito exportado pelos grãos da soja.

Todavia, a liberação de nutrientes para a cultura seguinte depende do manejo dos animais no pasto, pois enquanto as quantidades de esterco aumentam, as de resíduo vegetal diminuem com a intensidade de pastejo. Porém, no total, a liberação diminui com a intensidade de pastejo por sua maior quantidade no resíduo do pasto em relação ao esterco (ASSMAN et al., 2011). Isso pode ter acontecido nos sistemas avaliados na presente pesquisa, onde o pastejo somente por 40 dias, pode ter favorecido a rebrota das forrageiras, com maior presença de folhas, colmos e perfilho jovens, resultando em maior acúmulo de K, e sua posterior liberação com a decomposição desses resíduos (Figura 3).

Os maiores teores de Ca e Mg na camada de 0,0 a 0,05 m, podem ser decorrentes da calagem no mês de setembro de 2016 (Figura 3). Durante os processos de decomposição e mineralização dos resíduos vegetais, ocorre a liberação desses cátions. Além disso, à medida que o pH se eleva, menor concentração de íons H^+ ocorrem na solução do solo, permitindo que os sítios de troca do solo e a superfície dos minerais sejam ocupados pelos cátions Ca e Mg (MALAVOLTA, 2006). Este comportamento fica mais evidente principalmente para os teores de K, Ca e Mg, pois ocorre um rápido aumento conforme se adiciona resíduos vegetais provenientes de gramíneas forrageiras tropicais no período de entressafra. Isso se deve, provavelmente, ao elevado acúmulo destes nutrientes, principalmente do K pelos capins utilizados como palhada para o SSD.

Os teores de Ca e Mg considerados altos na camada 0,20 - 0,40 m (Tabela 3), podem ser resultado de uma maior quantidade e continuidade de bioporos no perfil do solo, oriundos da maior produção de raízes e da maior atividade da fauna edáfica, comum em solos com SIPA em SSD, propiciando a descida das partículas finas do calcário que foi aplicado em setembro de 2016.

Como o pastejo acarreta em maior produção de raízes da pastagem, deve haver também um aumento da proporção de solo rizosférico e da atividade microbiana, além do esterco depositado sobre o solo (SILVA et al., 2014), provavelmente aumentando os teores de C orgânico dissolvido na solução do solo, que por sua vez, contribui para a descida química dos compostos dissolvidos do calcário, aumento assim os teores de Ca e Mg. Estudos com essa temática realizados por Martins et al. (2015) avaliando a correção do solo em um SIPA no Rio Grande do Sul, que integra a produção de grãos de soja durante o período de verão, pastejo com bovinos de corte no inverno em uma pastagem mista de aveia preta + azevém, demonstraram que os SIPA não só não prejudicaram a descida de partículas de calcário, como também a maximizam, ou seja, a profundidade alcançada é muito maior nesses sistemas comparativamente àqueles sem introdução do componente animal. Tal fato se deve, portanto, ao maior desenvolvimento do sistema radicular das plantas pastejadas, posto que durante o pastejo há um estímulo do perfilhamento, consequentemente, maior produção de raízes.

Em geral, nota-se aumento dos teores de S em profundidade (Tabela 3), que pode estar associado à precipitação do sulfato ligado ao alumínio que desce no perfil devido ao maior peso molecular. Além disso, pode-se perceber que os maiores teores de S ocorrem à medida que os teores de P diminuem ao longo do perfil do solo (Figura 3). O P pode estar influenciando o deslocamento do sulfato em profundidade, pois há competição pelos sítios de adsorção, tendo em vista que o fosfato tem afinidade considerada forte, enquanto o sulfato moderado (HSU, 1989), resultando na redução dos teores de S em superfície. A energia com que os ânions são adsorvidos é função da valência e do grau de hidratação, obedecendo a seguinte ordem decrescente: $\text{H}_2\text{PO}_4 > \text{SO}_4^{-2} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}$ (MALAVOLTA, 2006). Deve-se considerar, também, que durante a condução das lavouras nesta pesquisa, houve adição de fosfato por conta da adubação na semeadura dos cultivos (milho e soja consorciados), portanto, há maior chance de ocorrer dessorção do sulfato onde a concentração de P é alta.

Os maiores teores de P ocorreram para o sistema de produção MBG/A/SA, para todas as camadas estudadas (Figura 2 e 3), o que pode estar associado com o efeito residual do consórcio milho braquiária e feijão guandu na safra anterior ao cultivo da soja. O feijão guandu se destaca por apresentar um sistema radicular profundo e possibilitar a reciclagem de nutrientes em camadas mais profundas do solo, proporcionando um caminho inverso à lixiviação de nutrientes. Além do seu sistema radicular profundo, o feijão guandu é uma leguminosa que exsuda ácido cítrico, faz simbiose com bactérias do grupo dos rizóbios e fungos micorrízicos, permitindo o processo de fixação biológica de N_2 e absorção de P (FARIAS et al., 2013). Essas características possibilitam que as culturas de sistema radicular fasciculado, as quais concentram raízes nas camadas menos profundas do solo, como as gramíneas, aproveitem os nutrientes que antes do cultivo do feijão guandu eram menos absorvidos. Dessa maneira, esses nutrientes são absorvidos e reciclados durante a fase de consórcios e, posteriormente pela fase de pastagem de aveia preta no outono/inverno. Logo após a entrada da primavera, o capim aruana cresce com mais vigor em função do início das chuvas e do aumento da temperatura, continuando esse processo de reciclagem dos nutrientes. Esse é um aspecto importante dentro do sistema de produção em SIPA, pois com o aumento na rotatividade dos nutrientes no sistema de produção evita-se as perdas por lixiviação.

1.3.3 Produção de Raiz

Apesar de não haver diferença estatística entre os dois sistemas de produção, o sistema MBG/A/SA apresentou maior produção de raízes nas primeiras camadas do solo, e maior matéria seca de raízes foi verificada também nas primeiras profundidades avaliadas em ambos os sistemas (Tabela 4).

Um dos fatores que podem ter influenciado a produção de matéria seca de raízes da cultura da soja, pode ter sido o efeito residual do feijão guandu, que, provavelmente, promoveu condições propícias para o desenvolvimento de raízes do capim marandu e aveia preta devido às características do seu sistema radicular. Raízes de leguminosas, como o feijão guandu, são pivotantes e de maior diâmetro, formando bioporos maiores, além de aumentar os conteúdos de N e P do solo.

Tabela 4. Produção de matéria seca de raiz (kg ha⁻¹) de soja + capim aruana e probabilidade de F

Fonte de variação	Matéria seca de raiz (kg ha ⁻¹)			
	Profundidade (m)			
	0,0-0,05	0,05-0,10	0,10-0,20	0,20-0,40
Sistema de produção				
MB/A/SA	1587 a	728 a	182 a	87 a
MBG/A/SA	1731 a	765 a	176 a	88 a
Probabilidade de F	0,1987	0,0625	0,1589	0,8043

Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste t (LSD) ($p \leq 0,05$).

Em pesquisa desenvolvida por Salton; Tomazi (2014), os autores ressaltam que quando a soja é cultivada após pastagem que foi utilizada para pastejo, mesmo que por alguns meses, o sistema radicular das forrageiras pode contribuir de forma marcante para o crescimento das raízes das plantas subsequentes quando introduzidas no SSD, ou seja, sem revolvimento do solo. Quando a soja é cultivada nessas condições, os efeitos benéficos tendem a ser mais pronunciados, pois geralmente a pastagem se desenvolve por maior período de tempo, e apresenta maior volume de raiz. O mesmo ocorreu para a presente pesquisa, onde o pastejo por ovinos ficou concentrado em 40 dias, tendo a pastagem um período de descanso de 60 dias. Pode ser que as melhores condições quanto à fertilidade do solo associada a alta disponibilidade de nutrientes como o Ca, Mg, P e K nas camadas que vão até 0,10 m de profundidade (Tabela 3) possa ter favorecido o crescimento de raízes no solo, pela menor necessidade de produção radicular para compensar a busca por condições mais favoráveis quanto à porosidade, disponibilidade hídrica e fertilidade do solo. Além do mais, o período de cultivo da cultura da soja, apresentou considerável abundância de chuva (Figura 1).

1.3.4 Produtividade de grãos, produtividade de matéria seca para ensilagem e porcentagem de grãos na silagem

Os dados de produtividade (PG), produtividade de matéria seca para ensilagem (PMS) e porcentagem de grãos na silagem (%G) constam na tabela 5.

Nos sistemas de SIPA estudados, verificou-se efeito significativo para todas as variáveis (Tabela 5). Esse efeito está relacionado, com as melhores características físico-químicas do solo no sistema de produção MBG/A/SA. O maior suprimento de

N e P no solo nesse sistema são fatores que podem ter influenciado positivamente a produtividade da soja.

Em SIPA, a eficiência de uso dos nutrientes é potencialmente aumentada em razão da melhor fertilidade do solo, do aumento do teor de MOS, da reciclagem de nutrientes e das boas condições físicas do solo, que promovem boa conservação do solo e da água, visto que o sistema radicular das gramíneas são mais agressivos e ocupam maior volume de solo, ocasionam melhorias a qualidade deste e favorecem o desenvolvimento das culturas na área agrícola (CALONEGO et al., 2017).

A alta produtividade de grãos e de silagem evidenciam que não houve competição entre o capim aruana e a soja, sendo a média nacional de produtividade de grãos de soja 3.206 kg ha⁻¹ (CONAB, 2018). No trabalho realizado por Machado et. al. (2017) consorciando a cultura da soja com capim aruana implantado simultaneamente, em condições edáficas semelhantes às do presente estudo, os autores verificaram que não houve diferenças numéricas e estatísticas para o rendimento de grãos de soja.

Tabela 5. Produtividade de grãos (PG), produtividade de matéria seca para ensilagem (PMS) e porcentagem de grãos na massa ensilada (%G)

Fonte de variação	PG ----- (kg ha ⁻¹) -----	PMS	%G (%)
MB/A/SA	4427 b	9432 b	47 b
MBG/A/SA	5475 a	11016 a	50 a
Probabilidade de F	0,0033	0,0060	0,0444

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste t LSD (p≤0,05).

De maneira geral, são muitos os benefícios da palhada sobre as culturas produtoras de grãos, quando estas são cultivadas após pastagem. A produtividade de grãos de soja ser de 15 a 25% maior após o cultivo de pastagens de capim marandu, quando comparado à áreas de pousio (CRUSCIOL et al., 2015). Desta forma, a implantação dos consórcios de soja e capim aruana, em palhada composta de capim marandu e aveia preta, pode ter favorecido a produtividade de grãos neste estudo (Tabela 5).

As melhores condições de solo propiciadas pelos SIPA estudados resultaram em alta proporção de grãos na silagem (Tabela 5), que garante melhor qualidade nutricional da matéria seca de silagem, sendo que a maior parte dos nutrientes estão

nos grãos de soja, diminuindo assim os custos de produção para o produtor rural que terá menor necessidade de aquisição de núcleos minerais.

Geralmente, para uma adequada nutrição animal, são adicionados às dietas concentrados proteicos para animais suplementados com silagens de milho, sorgo ou forrageiras perenes tropicas, aumentando conseqüentemente, os custos de produção. Em função disso, o objetivo de se utilizar espécies leguminosas consorciadas com gramíneas, deve-se também, pelo aumento na produção de matéria seca por hectare e no teor de proteína bruta da silagem.

Para se produzir silagem, faz-se necessário utilizar espécies vegetais com elevada produção de matéria seca e boa qualidade nutricional. Pode-se considerar que os consórcios de soja com capim aruana, da presente pesquisa, independente do sistema de produção adotado, apresentaram boa produtividade de matéria seca. Tal fato é de extrema relevância, já que alta produção de matéria seca de forragem pode diluir os custos necessários para a produção de silagem (COSTA et al., 2015).

Embora a produção de silagem de soja consorciada com capim aruana, apresente produção de matéria seca para ensilagem bem menores quando comparados com a matéria seca de culturas como milho e sorgo, que são mais utilizados pelo produtores rurais, tem-se o benefício da pastagem implantada na entressafra, que serve como alimento volumoso aos animais após a colheita do material para ensilagem e posterior formação de palha para a continuidade do sistema de semeadura direta.

Cabe ressaltar ainda que esses resultados podem ser obtidos desde que haja condições favoráveis ao estabelecimento e desenvolvimento das culturas em consórcio com forrageiras, e são influenciados por fatores como o tempo de adoção do SSD. Neste sentido, torna-se necessário a realização de mais pesquisas em diferentes regiões e por maior período de tempo, a fim de melhor validar essa tecnologia. Ainda não se sabe ao certo qual o melhor espaçamento, densidade populacional, profundidade de semeadura, dose de fertilizantes a serem utilizados, além das cultivares de soja mais adaptadas à este tipo de consórcio, tendo em vista que a maior parte das cultivares de soja disponíveis no mercado não são melhoradas visando características morfológicas para a produção de silagem, sendo comum, encontrar divergência no rendimento de grãos de soja em consórcio simultâneo com forrageiras.

1.4 CONCLUSÕES

O pisoteio pelas borregas e o tráfego de máquinas, nos sistemas de produção em SIPA estudados, não proporcionam compactação do solo em níveis considerados críticos à produção da soja para silagem.

A inserção de leguminosas no sistema MBG/A/SA, foi eficiente em aumentar o aporte de N no sistema solo-planta, resultando em maior massa de matéria seca de raízes e em melhoria nos atributos físicos do solo, refletindo assim, em maior produtividade de silagem.

Os sistemas de SIPA estudados, foram eficientes em manter os teores de MOS, mesmo com alta exportação de material vegetal para produção de silagem e pastejo.

Referências

- ADAMI, P.F.; PITTA, C.S.R. **Pastagem e bovinocultura de leite**. Curitiba: Instituto Federal do Paraná, 2012. 80p.
- ALBUQUERQUE, J. A.; SANGOI, L.; ENDER, M. Efeitos da integração lavoura-pecuária nas propriedades físicas do solo e características da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, n.3, p. 717-723, 2001.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SERNTTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- AMBROSANO, E. J.; TANAKA, R. T.; MASCARENHAS, H. A. A.; RAIJ, B. van; QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, H. Leguminosas. In: RAIJ, B. V.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (Eds.). **Boletim Técnico 100: Recomendação de Adubação e Calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed. Campinas: Instituto Agrônomo; IAC, 1997. p.187-202.
- ANGHINONI, I. Fertilidade do solo e seu manejo em sistema plantio direto. In: NOVAIS, R. F.; ALVARES, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: SBCS, 2007. p. 873-928.
- ANGHINONI, I.; CARVALHO, P.C.F.; COSTA, S.E.V.G.A. Abordagem sistêmica do solo em sistemas integrados de produção agrícola e pecuária no Subtropical brasileiro. In: ARAÚJO, A.P.; ALVES, B.J.R. (ed.). **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa, MG: SBCS, 2013. p.325-380.
- ARAÚJO-JUNIOR, C. F. Tensões-deformações do solo induzidas pelo pisoteio animal e tráfego de máquinas em Sistemas Integrados de Produção Agropecuária. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA, 1.; ENCONTRO DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA NO SUL DO BRASIL, 4.**, 2017, Cascavel. Palestras: intensificação com sustentabilidade. Pato Branco: UTFPR.
- ASSMANN, T. S.; RONZELLI JÚNIOR, P.; MORAES, A.; ASSMANN, A. L.; KOEHLER, H. S.; SANDINI, I. Rendimento de milho em área de integração lavoura-pecuária sob o sistema de plantio direto, em presença e ausência de trevo branco, pastejo e nitrogênio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo (Impresso)**, v. 27, n.4, p. 675-683, 2003.
- BARDUCCI, R. S.; COSTA, C.; CRUSCIOL, C. A. C.; BORGHI, E.; PUTAROV, C.; SARTI, L. M. N.; Produção de *Brachiaria brizantha* e *Megathyrsus maximum* com milho e adubação nitrogenada. **Revista Archivos de Zootecnia**, v. 58, n. 222, p. 211-222, 2009.
- BEUTLER, A. N.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; FERREIRA, M. M.; CRUZ, J. C.; PERREIRA FILHO, I. A. Resistência à penetração, permeabilidade de Latossolo

Vermelho distrófico típico sob sistemas de manejo na Região dos Cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 167-177, 2001.

BERTOL, I.; CIPRANDI, O.; CAMPOS, L. N. G.; BATISTELA, O. Propriedades físicas e químicas e produtividade de milho afetadas pelo manejo do solo com tração animal, numa Terra Bruna Estruturada. **Ciência Rural**, v. 30, n.6, p. 971-976, 2000.

BONETTI, J. A.; PAULINO, H. B.; SOUZA, E. D.; CARNEIRO, M. A. C.; SILVA, G. N. Influência do sistema integrado de produção agropecuária no solo e na produtividade de soja e braquiária. **Pesquisa Agropecuária Tropical** (Online), v. 45, p. 104-112, 2015.

BONETTI, J. A.; ANGHINONI, I.; ZULPO, L. Temperatura e umidade do solo em sistema de integração soja-bovinos de corte com diferentes manejos da altura do pasto. **Scientia Agraria** (Online), v. 18, p. 11-21, 2017.

BORTOLINI, Diego; BRAIDA, J. A.; CASSOL, L. C.; MIGLIORINI F. ; SILVA, M. R. ; FERRAZZA, J. . Altura de manejo de papuã e propriedades de solo em sistema de integração lavoura-pecuária. **Revista Ceres**, v. 60, p. 535-543, 2013.

BRAIDA, J. A.; REICHERT, J. M.; VEIGA, M.; REINERT, D. J. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio proctor. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 4, p. 605-614, 2006.

CALONEGO, J. C.; RAPHAEL, J. P. A.; RIGON, J. P. G.; OLIVEIRA NETO, L.; ROSOLEM, C. A. Soil compaction management and soybean yields with cover crops under no-till and occasional chiseling. **European Journal of Agronomy**, v. 85, p. 31-37, 2017.

CALONEGO, J. C.; FOLONI, J. S. S.; ROSOLEM, C. A. Lixiviação de potássio da palha de plantas de cobertura em diferentes estádios de senescência após a dessecação química. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 1, p. 99-108, 2005.

CARASSAI, I. J.; CARVALHO, P. C. F.; CARDOSO, R. R.; FLORES, J. P. C.; ANGHINONI, I.; NABINGER, C.; FREITAS, F. K.; MACARI, S.; TREIN, C. R. Atributos físicos do solo sob intensidades de pastejo e métodos de pastoreio com cordeiros em integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, n.10, p.1284-1290, 2011.

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A. L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo Roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo de amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 527-538, 1998.

CASTRO, G. S. A.; CRUSCIOL, C. A. C.; CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A. Management impacts on soil organic matter of tropical soils. **Vadose Zone Journal**, v. 14, n. 1, 2015.

CHEN, G.; WEIL, R. R.; HILL, R. L. Effects of compaction and cover crops on soil least limiting water range and air permeability. **Soil & Tillage Research**, v.136, p. 61-69, 2014.

CHIODEROLI, C. A.; MELLO, L. M. M.; GRIGOLLI, P. J.; FURLANI, C. E. A.; SILVA, J. O. R.; CESARIN, A. L. Atributos físicos do solo e produtividade de soja em sistema de consórcio milho e braquiária. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, p. 37-43, 2012.

COSTA, N. R.; ANDREOTTI M.; LOPES, K. S. M.; YOKOBATAKE, K. L.; FERREIRA, J. P.; PARIZ, C. M.; BONINI, C. 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, p. 852-863, 2015.

COSTA, F.S.; BAYER, C.; ZANATTA, J.A. & MIELNICZUK, J. Estoque de carbono orgânico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p. 323-332, 2008.

CRUSCIOL, C. A. C.; NASCENTE, A. S.; BORGHI, E.; SORATTO, R. P.; MARTINS, P. O. Improving Soil Fertility and Crop Yield in a Tropical Region with Palisadegrass Cover Crops. **Agronomy Journal**, v. 107, p. 2271-2280, 2015.

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

EDWARDS, A. P.; BREMNER, J. M. Dispersion of soil particles by sonic vibration. **Journal of Soil Science**, v. 18, p. 47-63, 1967.

EMBRAPA - **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS,1997. 212p.

FARIAS, L. N.; M.; PIETRO-SOUZA, W.; VILHARINHO, M. K. C.; SILVA, T. J. A.; GUIMARÃES, S. L. Características morfológicas e produtivas de feijão guandu anão cultivado em solo compactado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** (Online), v. 17, p. 497-503, 2013.

FEHR, W. R.; CAVINESS, C.E. Stage of soybean development. Iowa: Iowa State University, 1977. 12p. (Special Report 80). FERREIRA, E. V. O.; ANGHINONI, I.; ANDRIGHETTI, M. H.; MARTINS, A. P.; CARVALHO, P. C. F. Ciclagem e balanço de potássio e produtividade de soja na integração lavoura-pecuária sob semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 161-169, 2011.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, v.35, n.6, p.1039-1042, 2011.

FIDALSKI, J.; ALVES, S. J. Altura de pastejo de braquiária e carga animal limitada pelos atributos físicos do solo em Sistema Integração Lavoura-Pecuária com soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 39, n. 3 p. 864-870, 2015.

FLORES, J. P. C.; ANGHINONI, I.; CASSOL, L. C.; CARVALHO, P. C. F.; LEITE, J. G. D. B.; FRAGA, T. I. Atributos físicos do solo, rendimento de soja em sistema plantio direto em integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 771-80, 2007.

HSU, P. H. Aluminum hydroxides and oxyhydroxides. In: DIXON, J. B.; WEED, S. B. (Ed.). **Minerals in soil environments**. Madison: Soil Science Society of America, 1989. p. 331-378.

KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C. A., EVANS, D. D.; WHITE, J. L.; ENSMINGER, L. E.; CLARK, F. E.; (Ed.), **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. p. 499-510.

KLUTHCOUSKI, J.; YOKOYAMA, L. P. Opções de integração lavoura-pecuária. In: KLUTHCOUSKI, J.; STONE, L. F.; AIDAR, H. (Ed.). **Integração lavoura-pecuária**. 1.ed. Santo Antônio de Goiás: Embrapa, 2003. p.131-141.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: Klute, A. (ed.). **Methods of soil analysis**. 2.ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. Part. 1, p. 635-662.

LANZANOVA, M. E. **Atributos físicos do solo em sistema de culturas sob plantio direto na integração lavoura - pecuária**. 2005. 142 f. Dissertação de mestrado. Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria 2005.

LOSS, A.; PEREIRA, M. P.; 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.

MACHADO, L. A. Z.; CECATO, U.; COMUNELLO, E.; CONCENÇO, G.; CECCON, G. Establishment of perennial forages intercropped with soybean for integrated crop-livestock systems. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, p. 521-529, 2017.

MACIEL, G. A. **Integração lavoura – pecuária e a qualidade física do solo na região de Cerrado**. 2008. 83 f. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. 638 p.

MARTINS, A. P.; KUNRATH, T. R.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. F. **Integração soja-bovinos de corte no Sul do Brasil**. Porto Alegre: Gráfica RJR, 2015. 104 p.

MARTINS, A. P.; ANGHINONI, I.; COSTA, S. E. V. G. A.; CARLOS, F. S.; NICHEL, G. H.; SILVA, R. A. P.; CARVALHO, P. C. F. Amelioration of soil acidity and soybean yield after surface lime reapplication to a long-term no-till integrated crop-livestock system under varying grazing intensities. **Soil & Tillage Research**, v. 144, p. 141-149, 2014.

MENDONÇA, V. Z.; MELLO, L. M. M.; ANDREOTTI, M.; PEREIRA, F. C. B. L.; LIMA, R. C.; VALÉRIO FILHO, W. V.; YANO, E. H. Avaliação dos atributos físicos do solo em consórcio de forrageiras, milho em sucessão com soja em região de cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 251-259, 2013.

MORAES, A.; CARVALHO, P. C. F.; ANGHINONI, I.; LUSTOSA, S. B. C.; COSTA, S. E. V. G. A.; KUNRATH, T. R. Integrated crop-livestock systems in the Brazilian subtropics. **European Journal of Agronomy**, v. 57, p. 4-9, 2014.

OLIVEIRA, P.; KLUTHCOUSKI, J.; FAVARIN, J. L.; SANTOS, D.C. Consórcio de milho com braquiária e guandu-anão em sistema de dessecação parcial. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, n.10, p.1184-1192, 2011.

OLIVEIRA, G. C., DIAS JÚNIOR, M. S., RESCKN, D. V. S., CURI, N. Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo. **Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 327-336, 2004.

PAIR, C. D. **Qualidade física e matéria orgânica do solo em sistema de integração lavoura-pecuária submetido a doses de nitrogênio** / Cristiane Dalagua Paier. 2015. 74 f. Dissertação de mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2015.

PARIZ, C. M.; COSTA, C.; CRUSCIOL, C. A. C.; MEIRELLES, P. R. L.; CASTILHOS, A. M.; ANDREOTTI, M.; COSTA, N. R.; MARTELLO, J. M.; SOUZA, D. M.; PROTES, V. M.; LONGHINI, V. Z.; FRANZLUEBBERS, A. J. Production, nutrient cycling and soil compaction to grazing of grass companion cropping with corn and soybean. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 108, n. 1, p. 35-54, 2017.

RAIJ, B. V.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. rev. Campinas: IAC. 1996. 279 p. (Boletim Técnico, 100).

RAIJ, B. V.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 284p, 2001.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência e Ambiente**, n.27, p. 29-48, 2003.

SALTON, J. C.; TOMAZI, M. Sistema radicular de plantas e qualidade do solo. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2014 (Comunicado Técnico).

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. **An analysis of variance test for normality (complete samples)**. *Biometrika*, v. 52, p. 591-611, 1965.

SECCO, D.; REINERT, D.; REICHERT, J. M.; DA ROS, C. O. Produtividade de soja e propriedades físicas de um Latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 797-904, 2004.

SILVA, R. H.; ROSOLEM, C. A. Crescimento radicular de espécies utilizadas como cobertura decorrente da compactação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 2, p. 253- 260, 2001.

SCAPINI, C. A.; BOENI, M.; REINERT, D. J.; BUENO, M. B.; FONTINELLI, F. Efeito do pisoteio animal no terceiro ano consecutivo, sobre algumas propriedades físicas do solo e produtividade do milho em solo sob plantio direto e convencional. In: **XXVI Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**. Rio de Janeiro, 1997.

SEREIA, R. C. **Qualidade do solo em sistemas consorciados de milho, capim-marandu e feijão-guandu e sobressemeadura da aveia para pastejo de cordeiros** / Rodrigo César Sereia. 2017. 147 f. Tese de doutorado. Universidade Estadual Júlio de Mesquita Filho, Botucatu. 2017.

SILVA, I. F. **Formação, estabilidade e qualidade de agregados do solo afetados pelo uso agrícola**. 1993. 126f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SILVA, F. D.; AMADO, T. C.; BREDEMEIER, C.; BREMM, C. ; ANGHINONI, I. ; CARVALHO, P. C. de F. Pasture grazing intensity and presence or absence of cattle dung input and its relationships to soybean nutrition and yield in integrated crop-livestock systems under no-till. **European Journal of Agronomy**, v. 1, p. 84-91, 2014.

STEFANOSKI, DIANE C.; SANTOS, GLENIO G. ; MARCHÃO, ROBÉLIO L. ; PETTER, FABIANO A. ; PACHECO, LEANDRO P. . Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental (Online)* **JCR**, v. 17, p. 1301-1309, 2013.

SOUZA; E. D.; COSTA, S. E. V. G. A.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. F.; ANDRIGUETI, M. CAO, E. Estoques de carbono orgânico e de nitrogênio no solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto, submetido a intensidades de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** v.33, n.6, p.1829-1836, 2009.

TREIN, C. R.; COGO, N. P.; LEVIEN, R. Métodos de preparo do solo na cultura do milho e ressemeadura do trevo, na rotação aveia + trevo/milho, após pastejo intensivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.15, p.105-111, 1991.

YODER, R. E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. **Journal of American Society of Agronomy**, v. 28, p. 337-351, 1936.

CAPÍTULO 2- EMISSÃO DE CO₂ E QUALIDADE DA MATÉRIA ORGÂNICA EM SISTEMAS SITEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA COM OVINOS

RESUMO

Em sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA) a matéria orgânica do solo (MOS) apresenta alterações em sua dinâmica em comparação a sistemas puros de produção de grãos com ausência de animais em pastejo, podendo assim alterar as entradas de C e N no sistema solo-planta. O objetivo deste trabalho foi avaliar a emissão de CO₂, os estoques de C e N no solo e a qualidade da MOS, em sistemas de produção de silagem de soja consorciada com capim aruana (*Megathyrsus maximus* cv. Aruana) em área com histórico de consórcio de milho com capim marandu com e sem feijão guandu, com posterior pastejo de ovinos na entressafra. O experimento foi conduzido na Fazenda Experimental Lageado FMVZ/UNESP, Botucatu, SP, na safra 2016/2017. O delineamento experimental utilizado foi de esquema fatorial 2 x 2, sendo dois sistemas de produção e duas épocas de avaliação. Foram analisados os estoques de C e N do solo e dos restos culturais, fracionamento físico da MOS. Também foi analisado a emissão de CO₂ em quatro épocas, sendo após a aplicação de calcário no solo, após a semeadura da soja + aruana, após a semeadura da aveia e após o início do pastejo da aveia. Os resultados demonstram que a maior emissão acumulada de C-CO₂, ocorre no sistema que apresenta maior teor de N no solo e em resíduos vegetais. Embora ocorra menor produção de palhada pela alta retirada de biomassa para produção de silagem, os sistemas estudados foram eficientes em aumentar os teores de C_{Op} na camada 0,0 - 0,05 m, apresentando baixa emissão relativa de CO₂, ou seja, com menor emissão de CO₂ por kg de silagem produzida.

Palavras-chave: Estoque de Carbono. Carbono orgânico particulado. Silagem

CHAPTER 2- CO₂ EMISSION AND QUALITY OF ORGANIC MATTERS IN INTEGRATED SYSTEMS FOR AGRICULTURAL PRODUCTION WITH LAMBS

ABSTRACT

In Integrated crop-livestock systems, soil organic matter presents alternation in its dynamics, compared to pure systems grain production, in the absence of grazing animals, thus changing the entries of C and N in the system soil-plant. Therefore the aim of this study was to evaluate the emission of soil CO₂, stocks of C and N in the soil, soil organic matter physical fractionations and factors that interfere with soil organic matter quality, in two aruana grass (*Megathyrsus maximus* cv. Aruana) intercropped soybean silage production systems in succession to intercropping maize with marandu grass and maize with marandu grass and guandu beans, with subsequent grazing of sheep in the pre-harvest, with two evaluation periods. The experiment was conducted at Lageado FMVZ/UNESP Experimental Farm, Botucatu, SP, in the 2016/2017 harvest. C and N stocks of soil and crop residues, physical fractionation of MOS were analyzed. It was also analyzed the emission of CO₂ in four seasons and after the application of limestone in the soil, after sowing soybean + aruana, after sowing oats and after the beginning of oat grazing. The results demonstrate that the highest accumulated emission of C-CO₂ occurs in the system that presents higher N content in soil and plant residues. Although less straw production occurs by the high extraction for silage production the studied systems were efficient in increasing the COP contents in the layer 0-0.05m, presenting low relative emission, indicating lower CO₂ emission per kg of silage produced.

Keywords: Soil stored carbon. Particulate organic carbon. Silage

2.1 INTRODUÇÃO

A combinação dos componentes animal, pastagens e culturas anuais que ocorre nos SIPAs em sistema de semeadura direta (SSD), promovem maior eficiência na utilização de insumos, aumentando a fertilidade dos solos, sendo mais eficientes em aportar fitomassa em maior quantidade e qualidade, tendo os solos um incremento de C orgânico via aporte de resíduos vegetais e outras fontes, como fezes e urina.

Porém, em áreas manejadas com SIPAs, muitas vezes os animais iniciam o pastejo com baixa disponibilidade de forragem. No período de outono/inverno, o produtor tende a antecipar a entrada dos animais nas pastagens devido à falta de planejamento forrageiro; ou, após a entrada dos animais, o produtor trabalha com carga animal acima da capacidade de suporte da pastagem. Tal manejo inadequado faz com que a palhada deixada para a cultura agrícola em sucessão seja insuficiente para assegurar adequada cobertura do solo. Além disso, áreas com produção de silagem têm menor cobertura de solo até a forrageira se restabelecer, comprometendo o sequestro de C via resíduos vegetais e a sustentabilidade do SSD, expondo a MOS à maiores taxas de decomposição.

O menor aporte de palha da cultura de grãos em sistemas de produção de silagem pode acarretar em menor cobertura de solo, expondo o C e N orgânicos às condições climáticas, o que proporciona intensa atividade dos micro-organismos, favorecendo a subtração de MOS e propiciando o efluxo de CO₂ para a atmosfera, além de promover o aumento nas taxas de respiração do solo em condições de alta umidade e temperatura, sendo a respiração do solo uma das principais fontes de emissão de CO₂.

Em contrapartida, por serem sistemas intensivos de produção, os SIPAs apresentam alta produção de grãos, silagem, carne e madeira, tendo como benefício não apenas a remoção de CO₂ atmosférico e armazenamento deste em solo e palha, mas também na redução de CO₂ por kg de produto produzido, bem como na redução da área necessária para produzir a mesma quantidade de produto, melhorando assim a eficiência por área de produção, diminuindo a pressão por abertura de novas áreas.

SIPAs são sistemas dinâmicos, onde a inclusão de leguminosas como a soja e o feijão guandu, em consórcio ou rotação com espécies forrageiras, aumentam o aporte de N via fixação biológica de N atmosférico, que aliado ao pastejo na

entressafra, proporciona diferentes formas de resíduos no sistema de produção, os quais têm papel fundamental na estabilização e decomposição da MOS. Tem-se verificado que a rápida disponibilidade do N por meio de fontes minerais propicia menor eficiência do solo em acumular C, quando equiparado ao N proveniente de leguminosas. A utilização de fabáceas é mais eficiente em acumular C no solo quando comparado ao aporte via adubação nitrogenada (ZANATTA et al., 2007). Isto se deve à rápida disponibilidade do N mineral, podendo até estimular a decomposição da MOS onde o conteúdo de N encontra-se em déficit. Isso torna-se muito importante, pois o fornecimento de N por meio da MOS para as culturas pode representar até metade do N requerido pelas plantas, mesmo quando a aplicação de N excede a demanda das culturas (CASSMAN et al., 2002).

O processo de mineralização da MOS fornece nutrientes para a produtividade das culturas de grãos e das forrageiras, produz resíduos mais estáveis com maior teor de C e proporciona maior proteção física, que auxilia, dessa forma, na qualidade do solo.

Nesse contexto, o objetivo do trabalho foi avaliar o quanto os sistemas de SIPA para produção de silagem de soja, com e sem histórico de inclusão de feijão quando pode influenciar nos estoques de C e N do solo, na estabilização do C, no aporte de palha, na qualidade física da matéria orgânica e nas emissões de CO₂ para a atmosfera.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido na Fazenda Experimental Lageado, em área pertencente à Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia (FMVZ/UNESP) no município de Botucatu/SP (22°51'01"S e 48°25'28"W, com altitude de 777 metros), durante os anos agrícolas 2016/2017. De acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS et al., 2006), o solo da área experimental é um Latossolo Vermelho Distrófico com 280, 90 e 630 g kg⁻¹ de areia, silte e argila, respectivamente.

2.2.2 Delineamento experimental e descrição dos tratamentos

O delineamento experimental estabelecido foi de blocos ao acaso, com oito repetições, em esquema fatorial. Utilizou-se esquema fatorial duplo 2 x 4 para os dados de emissão de CO₂, sendo dois sistemas de produção e quatro épocas de amostragem; esquema fatorial 2 x 3 para as análises da matéria seca de planta, sendo dois tratamentos e três épocas de coleta; e esquema fatorial 2 x 2 para os dados de solo (C, N e fracionamento físico da MOS), sendo dois tratamentos e duas épocas de avaliação.

Cada parcela foi constituída por 4 m de largura e 12 m de comprimento (48 m²). Os sistemas de produção em SIPA utilizados consistiram: i) cultura da soja para produção de silagem de planta inteira em consórcio simultâneo com capim aruana (*Megathyrsus maximus* cv. Aruana), em sucessão ao cultivo de milho para ensilagem em consórcio simultâneo com capim marandu, com a sobressemeadura da aveia preta para pastejo por borregas no inverno/primavera (MB/A/SA); ii) cultura da soja para produção de silagem de planta inteira em consórcio simultâneo com capim aruana (*Megathyrsus maximus* cv. Aruana), em sucessão ao cultivo de milho para ensilagem em consórcio simultâneo com capim marandu e feijão guandu cv. Fava Larga, com a sobressemeadura da aveia preta para pastejo por borregas no inverno/primavera (MBG/A/SA).

2.2.3 Histórico e Condução do Experimento

Até o ano de 2005, o solo da área foi utilizado para produção de silagem de milho e sorgo, sendo que até outubro/2010 se encontrava em pousio, com predominância de capim braquiaria *{Urochloa decumbens* cv. Basilisk [syn. *Brachiaria decumbens* cv. Basilisk]}. Nos anos agrícolas 2010/2011 e 2011/2012, a área foi utilizada para produção de silagem de milho em consórcio com braquiárias na safra, com posterior sobressemeadura de aveia amarela e pastejo por cordeiros entre os meses de agosto e novembro.

Antes da instalação do experimento em agosto de 2010, as características do solo foram determinadas conforme as metodologias descritas por Raij et al. (2001). Os resultados estão apresentados no **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Quadro 1. Características químicas do solo em duas profundidades na área experimental, antes do início do experimento em agosto 2010

Prof. (m)	pH (CaCl ₂)	MOS ¹ (g dm ⁻³)	P _(resina) (mg dm ⁻³)	H+Al -----	K (mmol _c dm ⁻³)	Ca (mmol _c dm ⁻³)	Mg (mmol _c dm ⁻³)	CTC ² -----	V ³ (%)
0,0 - 0,20	4,7	46,5	8,2	45	0,8	21,4	11	79	42,2
0,20 - 0,40	4,3	36,3	6,8	64	0,6	12,1	6,5	83	23

¹Matéria orgânica do solo; ²Capacidade de troca catiônica; ³Saturação por bases.

Em novembro de 2015, antes das análises do presente experimento, foi realizada uma caracterização do estoque de C e N (Quadro 2) e dos teores de C e N (Quadro 3) do solo da área experimental.

Quadro 2. Estoques de C e N do solo na camada 0,0 - 0,40 m na área experimental, em novembro de 2015

Fonte de variação	Estoque C ----- (Mg ha ⁻¹) -----	Estoque N ----- (Mg ha ⁻¹) -----
Camada 0,0 - 0,40 m		
Sistema de produção		
MB/A/SA	87,22	5,73
MBG/A/SA	88,38	5,76

Quadro 3. Teores de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) do solo, nas camadas de 0,0 - 0,05; 0,05 - 0,10; 0,10 - 0,20; 0,20 - 0,40 m de profundidade da área experimental, em novembro de 2015

Fonte de variação	COT	NT
----- (g/kg) -----		
<i>Camada 0,0 - 0,05 m</i>		
Sistema de produção		
MB/A/SA	18,33	1,21
MBG/A/SA	18,84	1,24
<i>Camada 0,05 - 0,10 m</i>		
Sistema de produção		
MB/A/SA	16,21	1,08
MB/A/SA	16,23	1,09
<i>Camada 0,10 - 0,20 m</i>		
Sistema de produção		
MB/A/SA	14,14	1,03
MBG/A/SA	15,32	1,01
<i>Camada 0,20 - 0,40 m</i>		
Sistema de produção		
MB/A/SA	15,74	1,04
MBG/A/SA	14,93	1,08

Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste t (LSD) ($p \leq 0,05$).

No ano agrícola 2012/2013, a área foi utilizada para produção de silagem de planta inteira de soja em consórcio com capim aruana, sendo a pastagem manejada em regime de corte entre os meses de agosto e outubro do mesmo ano. Nos anos agrícolas 2013/2014, 2014/2015, 2015/2016 a área foi utilizada para produção de silagem de milho em consórcio com capim marandu e feijão guandu, com posterior sobressemeadura de aveia preta e pastejo por cordeiros entre os meses de julho a setembro de cada ano.

O período de condução do experimento objeto de estudo desta tese, iniciou-se no dia 20 de setembro de 2016 com a realização de calagem superficial, utilizando-se 1500 kg ha⁻¹ de calcário dolomítico, seguindo recomendações de Rajj et al. (1996).

Em 13 de novembro de 2016, foi realizada a dessecação das plantas presentes na área experimental (capim marandu) com aplicação dos herbicidas Glyphosate [isopropylamine salt of N-(phosphonomethyl) glycine] e 2,4-D amine (2,4-Dichlorophenoxyacetic acid) nas doses de 2,44 kg ha⁻¹ do equivalente ácido e 0,67 kg ha⁻¹ do ingrediente ativo, respectivamente.

A cultivar de soja BMX Potência RR (Grupo de maturação: Semiprecoce – 6,6) com hábito de crescimento “indeterminado” foi semeada no dia 02 de dezembro de

2016 na profundidade de 0,03 m, utilizando semeadora-adubadora modelo PDGP Tatu Marchesan para SSD, com densidade de 350.000 sementes ha^{-1} e espaçamento entrelinhas de 0,45 m. As sementes foram tratadas com fungicida à base de Carboxina + Tiram na dose de 0,06 kg dos i. a. por 100 kg de sementes e inseticida à base de Tiametoxam na dose de 0,12 kg do i.a. por 100 kg de sementes. Posteriormente, as sementes foram inoculadas com inoculante turfoso, contendo bactérias simbiotes da espécie *Bradyrhizobium japonicum* (SEMIA 5079 e SEMIA 5080 na concentração de 5×10^9 rizóbios por grama), utilizando-se 0,5 kg por 100 kg de sementes. Também foi misturado às sementes fertilizante mineral líquido à base de P_2O_5 , Mo e Co (0,426; 0,284 e 0,028 kg L^{-1} , respectivamente), na dose de 0,2 L do produto comercial ha^{-1} .

No estádio V4, foi feita aplicação de inseticida de contato, ingestão e sistêmico, à base de tiametoxam 141 g L^{-1} + Lambda Cialotrina 106 g L^{-1} (nome comercial Engeo Pleno) na dose de 150 ml ha^{-1} em 200 litros de volume de calda. No estádio R1, foi realizada aplicação preventiva de fungicida mesostemico e sistêmico a base de Trifloxistrobina 150 g L^{-1} + Protiocanazol 175 g L^{-1} (nome comercial FOX) na dose 200 ml ha^{-1} e inseticida de contato, ingestão e sistêmico a base de tiametoxam 141g L^{-1} + lambda cialotrina 106 g L^{-1} (nome comercial ENGEO PLENO) na dose de 200 ml ha^{-1} , combinados com óleo mineral adjuvante 428 g L^{-1} (nome comercial NIMBUS) na dose de 150 ml ha^{-1} . O controle do percevejo verde da soja e percevejo marrom, foi realizado no estádio R4, com aplicação de inseticida de contato à base de acefato 750 g (nome comercial AQUILA), na dose de 800 g ha^{-1} e aplicação com fungicida mesostemico e sistêmico à base de Trifloxistrobina 150 g L^{-1} + Protiocanazol 175 g L^{-1} (nome comercial FOX) na dose de 250 ml ha^{-1} , combinados com óleo mineral adjuvante 428 g L^{-1} (nome comercial NIMBUS) na dose de 150 ml ha^{-1} . A última aplicação ocorreu no estádio R6, com fungicida de contato e sistêmico à base de azoxistrobina 300 g kg^{-1} + Benzovindiflupir 150 g kg^{-1} (nome comercial ELATUS) na dose de 200 g ha^{-1} e inseticida de contato, ingestão e sistêmico à base de tiametoxam 141g L^{-1} + lambda cialotrina 106 g L^{-1} (nome comercial ENGEO PLENO) na dose de 200 ml ha^{-1} , combinados com óleo mineral adjuvante 428 g L^{-1} (nome comercial NIMBUS) na dose de 150 ml ha^{-1} .

O capim aruana foi semeado na entrelinha da cultura da soja na profundidade de 0,06 m, na quantidade de 600 pontos de VC ha^{-1} , conforme recomendação de Kluthcouski e Yokoyama (2003). A adubação mineral de semeadura foi realizada de

acordo com as recomendações de Ambrosano et al. (1997) para a cultura da soja, sendo 90 kg de P_2O_5 e 90 kg de K_2O por hectare (600 kg de 0-15-15). Por se tratar de colheita para ensilagem, aos 30 dias após a emergência (DAE) das plântulas de soja foi realizada adubação potássica de cobertura aplicando 60 kg ha^{-1} de K_2O (100 kg ha^{-1} do fertilizante mineral cloreto de potássio). A colheita mecânica da cultura da soja em consórcio com capim aruana para ensilagem ocorreu no dia 16 de março de 2017, quando as plantas de soja se encontravam no estágio fenológico R_7 (início da maturação dos grãos e 50% de folhas amareladas), de acordo com classificação de Fehr e Caviness (1977) e recomendação de Leonel et al. (2008). A colheita foi realizada na altura de 0,15 m utilizando colhedora de forragem de precisão modelo JF 1600 AT (12 facas). O material foi colhido, picado em partículas médias entre 3 e 6 mm e armazenado em silo tipo “bag” de 1,50 m de diâmetro (embolsadora de forragem), com compactação de 600 kg m^{-3} de massa verde.

No dia 14 de abril de 2017, a aveia preta foi sobressemeada por meio de semeadora-adubadora modelo PDCP Tatu Marchesan para SSD, com espaçamento de 0,17 m entrelinhas, utilizando-se 65 kg ha^{-1} de sementes puras viáveis (SPV), seguindo as recomendações de Adami e Pitta (2012). Não foi realizada adubação na aveia, uma vez que objetivou-se avaliar o efeito residual das adubações e cultivos anteriores.

Foram utilizadas 10 borregas Texel na fase de recria para cada tratamento, com idade média de 90 dias e peso vivo inicial médio de 25 kg, oriundas de uma criação comercial. O sistema de pastejo adotado foi o contínuo. Os piquetes foram delimitados com cerca elétrica de seis fios e os animais tinham livre acesso à água e foram disponibilizados sombrites para maior conforto térmico dos animais. À partir das 07:00h, as borregas eram alocadas em seus respectivos piquetes e recolhidas à partir das 17:00h em um galpão coberto. Após o recolhimento à tarde nas baias, as borregas eram suplementadas com concentrado + silagem proveniente do mesmo tratamento. O período de pastejo foi de aproximadamente 40 dias, nos meses de agosto e setembro de 2017.

2.2.4 Fluxo de CO₂

Foram instalados bases de PVC com 12 cm de altura e 20 cm de diâmetro, com as bordas inferiores aprofundadas à 3 cm no solo. Estas bases foram instaladas nas linhas de semeadura e entre linhas e permaneceram durante todo a condução do experimento, sendo retirados somente para operações de plantio e colheita, e instaladas novamente, no mesmo dia, após as operações. É válido enfatizar que as plantas emergidas foram retiradas do interior das bases.

As determinações do fluxo de CO₂ foram realizadas por meio do analisador portátil LI-8100A (Instruction Manual–LICOR, 2007). O aparelho monitora a cada segundo as variações da concentração de CO₂ no interior da câmara por espectroscopia de absorção óptica no infravermelho. Desta forma, foi configurado como leitura de 120 s, sendo 15 s para “limpeza” ou pré-purga e 15 s para pós-purga, resultando pela automática regressão o fluxo de CO₂ em $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Durante a leitura eram determinadas temperatura e umidade volumétrica do solo a 5 cm de profundidade por meio de TDR (Time Domain Reflectometry) 5TM[®] (Decagon Devices).

As determinações foram realizadas aos 1, 3, 5, 10, 15, 30 e 45 dias após a aplicação do calcário a partir do dia 20 de setembro de 2016 (DAC), 1, 3, 5, 10, 15, 30, 45, 60, 90 e 120 dias após a semeadura da soja (DAS) a partir do dia 02 de dezembro de 2016, 1, 3, 5, 10, 15, 30, 45, 60 dias após a semeadura da aveia a partir do dia 17 de abril de 2017(DAA) e 1, 3, 5, 10, 15, 30, 45 após a entrada das borregas para pastejo (DAP) a partir do dia 26 de setembro de 2017. As leituras foram realizadas no período da manhã.

Por meio da integração da área sob a curva dos picos de emissão de cada dia foram obtidas as emissões acumuladas em período de avaliação com auxílio do software Origin 8.6[®]. Os dados foram convertidos em kg ha^{-1} de equivalente carbono (C-CO₂), sendo apresentados os dados do total acumulado por cada período de avaliação. Também foram calculados a emissão relativa de C-CO₂ para cada kg de silagem produzido, expressos em C-CO₂ kg^{-1} de matéria seca de silagem de soja, sendo utilizado o total de C-CO₂ kg^{-1} em todos os períodos.

2.2.5 Fracionamento físico da MOS, estoques de C e N

Para realização do fracionamento físico da MOS, seguiu-se metodologia adaptada de Cambardella e Elliott (1992). Por essa metodologia obtém-se duas frações de carbono, o carbono orgânico particulado (COp), que consiste no material mais recentemente adicionado ao solo e pouco decomposto e, o carbono associado a minerais (COam), mais recalcitrante e humificado.

As coletas de solo foram realizadas nos meses de novembro de 2016 e 2017, após o pastejo dos animais, totalizando 2 coletas de solo ao longo do período de condução do experimento. Para essas coletas utilizou-se trado tubular e foram retiradas amostras em três pontos por parcela, nas camadas de 0,0 a 0,05 m; 0,05 a 0,10 m; 0,10 a 0,20 m; 0,20 a 0,40 m. Os teores de carbono (C) e nitrogênio (N) foram obtidos por meio de analisador elementar automático (Modelo TruSpec™ CHNS, da LECO®).

Foram pesados 20 gramas de solo seco ao ar, previamente peneirado em malha de 2 mm, em copos de polietileno de 250 mL e adicionados 80 mL de solução dispersante de hexametáfosfato de sódio 5 g L^{-1} . Em seguida, as amostras foram agitadas por 15 horas em agitador horizontal, passadas por peneira de malha de 0,053 mm (270 Mesh) e lavadas com água destilada até remoção total da argila. O material particulado retido na peneira, ou fração particulada (FP), foi transferido para potes de alumínio com auxílio de jatos de água da pisseta e, seco em estufa de circulação de ar forçada a 45°C até atingir massa constante.

Após a secagem, o material foi pesado, determinando-se assim a massa da fração particulada (MFP), moído e homogeneizado com auxílio de um bastão de vidro, e submetido a determinação de C em analisador elementar, obtendo-se o teor de carbono da fração particulada do solo (CFP), sendo possível calcular o teor de carbono orgânico particulado (COp) do solo, de acordo com a equação:

$$\text{COp} = \frac{\text{CFP} \cdot \text{MFP}}{\text{Ps}}$$

Equação 1. COp = teor de carbono orgânico particulado do solo, em g de C kg^{-1} de solo; CFP = teor de carbono da fração particulada, em g kg^{-1} ; MFP = massa da fração particulada, em gramas; Ps = massa da amostra inicial do solo (20 gramas).

O teor de carbono associado a minerais (COam) foi calculado pela diferença entre o carbono orgânico total e o carbono orgânico particulado:

$$\text{COam} = \text{COT} - \text{COp}$$

Equação 2. COam = teor de carbono orgânico associado a minerais no solo, em g kg⁻¹; COT= teor de carbono orgânico total do solo, em g kg⁻¹; COp = teor de carbono orgânico particulado do solo, em g kg⁻¹.

A partir dos dados de COT e de densidade do solo, foi calculado o estoque de COT de cada camada e das frações granulométricas, particulada (C-COp) e ligada a minerais (C-COam), conforme Veldkamp (1994), para o solo de cada parcela. O estoque de carbono foi calculado através da equação 3.

$$\text{EC}_{\text{COT, COp ou COam}} = (\text{C} \times \text{Ds} \times \text{e})/10$$

Equação 3. EC = carbono acumulado (Mg ha⁻¹) total (COT) ou nas frações (COp ou COam); C = teor de carbono na camada (g kg⁻¹); Ds, a densidade do solo (Mg m⁻³); e = espessura da camada em análise, em cm.

2.2.6 Amostragens de plantas forrageiras e de palha para determinação da matéria seca e estoques de C e N na fitomassa

As coletas foram realizadas em novembro de 2016, antes do plantio da soja consorciada com capim aruana, em abril de 2017, após a colheita para ensilagem e novembro de 2017, aproximadamente dois meses após o fim do pastejo, por meio um quadro de amostragem de dimensões 0,5 m x 0,5 m, sendo posteriormente acondicionadas em sacos de papel e secas em estufa de aeração forçada a 60° C até massa constante. Em seguida, procedeu-se a mensuração da massa de matéria

seca em balança com precisão de 0,01 g. As amostras foram moídas em moinhos elétricos tipo “Willey”, peneiradas (malha de 1 mm), acondicionadas em sacos de papel e armazenadas em sacos plásticos devidamente vedados. As determinações dos teores de C e N foram realizadas em analisador elementar (LECO-TruSpec® CHNS), obtendo-se a relação C/N da palha e, a partir da massa de palha, o acúmulo de N e C nos restos vegetais depositados sobre o solo, em seguida determinou-se os estoques em kg ha^{-1} de C e N na palha.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1 Produção de massa de matéria seca vegetal, teor de C, teor de N, relação C/N e estoques de C e N na palha

Na tabela 7 constam os resultados de produção de massa de matéria seca vegetal (MS), teor de N e C, relação C/N e acúmulo de C e N na palha em coletas em novembro de 2016, abril de 2017 e novembro de 2017.

Tabela 7. Acúmulo e teor de C e N na massa de matéria seca das plantas

Fonte de variação	MS (kg ha ⁻¹)	C ----- (g kg ⁻¹) -----	N ----- (g kg ⁻¹) -----	C/N	C ----- (kg ha ⁻¹) -----	N ----- (kg ha ⁻¹) -----
Sistema de produção						
MB/A/SA	4091 a	42,7 a	2,10 a	26,32 a	1769 a	73,39 a
MBG/A/SA	3915 a	42,8 a	2,15 a	24,08 a	1707 a	67,47 a
Época						
Novembro 2016	6101 a	44,7 a	1,43 b	31,64 a	2723 a	87,18 a
Abril 2017	2172 c	40,6 c	3,37 a	12,41 b	881 c	74,40 a
Novembro 2017	3737 b	43,0 b	1,48 b	31,56 a	1611 b	49,71 b
Probabilidade de F						
Sistema de produção	0,5585	0,7983	0,8885	0,1843	0,6352	0,2931
Época	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Sistema x Época	0,3592	0,3022	0,7169	0,3862	0,5282	0,0949

Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste t (LSD) (p≤0,05).

Os sistemas de produção não apresentaram diferença significativa para as variáveis estudadas, havendo diferenças apenas para as épocas de amostragem.

Na amostragem realizada em novembro de 2016, a MS foi de 6101 kg ha⁻¹, sendo a planta predominante nesse período o capim marandu remanescente do consórcio com milho da safra anterior. A maior MS nesse período é decorrente da altura de colheita do milho, aos 40 cm, deixando na área maior quantidade de colmos de milho e capim marandú, após o pastejo a gramínea tem melhores condições de rebrotar, perfilhar e aumentar área foliar com início das chuvas que ocorre em setembro.

A menor MS ocorreu na amostragem de abril de 2017 após a colheita da soja em consórcio com capim aruana, fato ocasionada pela altura de colheita da soja, realizada aos 15 cm do solo, tendo grande exportação de MS. Essa alta exportação de MS das plantas do consórcio soja + capim aruana na colheita para ensilagem em

uma época do ano com temperatura e pluviosidade reduzida prejudica a retomada do crescimento vegetativo, principalmente das gramíneas tropicais. Além da exportação pela colheita para ensilagem, o capim aruana é exportado pelo pastejo, resultando em menor produção de MS em novembro de 2017.

Os menores teores de C e os maiores teores de N ocorreram na amostragem de abril de 2017, resultando consequentemente em menor relação C/N da palhada após a colheita da soja consorciada com capim aruana. A menor persistência da palha de plantas leguminosas (CALONEGO et al., 2012) sugere que estas não são as ideais para manter o solo constantemente coberto. De acordo com Cantarella (2007), a quantidade de N na matéria seca e a relação C/N se destacam dentre os fatores mais importantes para rápida disponibilização do N proveniente de resíduos vegetais.

Porém, na avaliação de novembro de 2016, obteve-se os maiores acúmulos de C e N na palha, sendo o sistema MB/A/SA com maior MS, acúmulo de C e N na palha e maior relação C/N. A persistência do resíduo como cobertura do solo é outro fator importante no SSD (RIGON et al., 2018), tal comportamento está diretamente relacionado à relação entre C e N e a composição bioquímica das espécies (BUTTERLY et al., 2013), mantendo o C protegido na palhada por mais tempo.

De acordo com Bayer et al. (2006), no SSD torna-se necessária a entrada de cerca de 4 t ha^{-1} ano de C ao sistema para compensar a quantidade perdida na decomposição dos resíduos orgânicos, o que dificilmente é obtido apenas com culturas anuais, para que o sistema seja considerado eficiente e sustentável, portanto, na referida pesquisa, a quantidade total acumulado de C na palha foi de 5215 kg ha^{-1} evidenciando que os sistemas adotados são eficientes em manter a entrada de C.

2.3.2 Fracionamento Físico da MOS

Os resultados de teor de carbono orgânico total (COT), carbono orgânico particulado (COp), carbono orgânico ligado a minerais (COam) e relação COp/COT, em diferentes camadas de solo estão na Tabela 8. De maneira geral, não houve interação significativa entre os sistemas de produção e épocas de avaliação independente da camada de solo avaliada. Apenas a época de amostragem influenciou os resultados.

Os maiores valores de COp e COT na camada 0,0 - 0,05 m e o aumento destes ao longo das épocas é relacionado com o aporte dos resíduos da parte aérea e de raízes, pois com o pastejo as plantas são estimuladas a perfilhar e consequentemente emitem mais raízes, soma-se à isso os resíduos animais (esterco e urina). Os valores altos de COT e COp não foram suficientes para aumentar a relação COp/COT, que é um indicador de labilidade da MOS, em que maiores valores significam maior proporção de carbono orgânico particulado, de maior labilidade, no carbono orgânico total.

Na camada 0,05 - 0,10, verificou-se efeito significativo de épocas para as variáveis COT e COp. Houve redução de 6% no COT entre novembro de 2016 e novembro de 2017, reduzindo o COp em 9% e COp/COT em 3%. Não ocorreram diferenças significativas para as camadas 0,10 - 0,20 e 0,20 - 0,40 m.

Estes resultados sugerem que o aporte de palha das espécies cultivadas não esteja sendo suficiente para aumentar a matéria orgânica do solo e os estoques de COT no perfil do solo, entre novembro de 2016 e novembro de 2017, entretanto, há a possibilidade de uma saturação de C no solo (SIX et al., 2006), que possivelmente em anos subsequentes os objetivos sejam a manutenção e a estabilização da MOS.

Souza et al. (2018) destacam que nem sempre SIPA em SSD, podem ocasionar aumento de MOS, podendo o incremento de COT ser entre 1,1 e 13,1% maior em SSD em relação a SIPA. Por outro lado, a maioria dos resultados de pesquisa relatam que os incrementos de COT em SIPA variam desde muito baixo (5%) até altíssimos (52%) em relação a semeadura direta.

Tabela 8. Carbono orgânico total (COT), carbono orgânico particulado (COp), carbono orgânico ligado a minerais (COam) e relação COp/COT, em diferentes camadas de solo

Fonte de variação	COT	COp (g kg ⁻¹)	COam	COp/COT (%)
<i>Camada 0,0 - 0,05 m</i>				
Sistema de produção				
MB/A/SA	19,50 a	7,07 a	12,43 a	36,34 a
MBG/A/SA	19,25 a	6,96 a	12,29 a	36,31 a
Época				
Novembro 2016	19,31 a	7,07 a	12,23 a	36,78 a
Novembro 2017	19,45 a	7,96 a	12,49 a	35,89 a
Probabilidade de F				
Sistema de produção	0,6251	0,7742	0,6974	0,9904
Época	0,7765	0,7539	0,4890	0,5538
Sistema x Época	0,4789	0,6554	0,5925	0,7285
<i>Camada 0,05 - 0,10 m</i>				
Sistema de produção				
MB/A/SA	17,40 a	6,01 a	11,38 a	34,76 a
MBG/A/SA	17,67 a	6,12 a	11,56 a	34,65 a
Época				
Novembro 2016	18,08 a	6,35 a	11,73 a	35,23 a
Novembro 2017	16,99 b	5,78 b	11,21 a	34,18 a
Probabilidade de F				
Sistema de produção	0,4693	0,6339	0,5733	0,9073
Época	0,0076	0,0140	0,0917	0,2854
Sistema x Época	0,5760	0,5280	0,8085	0,8324
<i>Camada 0,10 - 0,20 m</i>				
Sistema de produção				
MB/A/SA	15,51 a	4,97 a	10,55 a	32,30 a
MBG/A/SA	15,96 a	5,29 a	10,68 a	33,21 a
Época				
Novembro 2016	15,90 a	5,20 a	10,70 a	32,94 a
Novembro 2017	15,57 a	5,06 a	10,52 a	32,57 a
Probabilidade de F				
Sistema de produção	0,1545	0,1534	0,6318	0,4596
Época	0,2922	0,5238	0,4864	0,7625
Sistema x Época	0,1545	0,9250	0,1223	0,4311
<i>Camada 0,20 - 0,40 m</i>				
Sistema de produção				
MB/A/SA	15,20 a	4,74 a	10,46 a	31,45 a
MBG/A/SA	14,53 a	4,51 a	10,02 a	31,06 a
Época				
Novembro 2016	14,79 a	4,80 a	10,00 a	32,76 a
Novembro 2017	14,94 a	4,45 a	10,49 a	29,76 a
Probabilidade de F				
Sistema de produção	0,1166	0,2453	0,2260	0,7291
Época	0,7255	0,0777	0,1731	0,0148
Sistema x Época	0,8723	0,8098	0,9554	0,7196

Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste t (LSD) (p≤0,05).

Os teores de COT encontrados na presente pesquisa são semelhantes aos relatados por Gazolla et al.(2015), sendo que todos esses autores estudaram SIPA com cultivo de soja no verão e posterior pastejo de bovinos na entressafra, com teores de argila no solo variando de 54 a 60%. Demonstrando assim que SIPA, por se tratarem de sistemas intensivos, precisam de estudos de longo prazo e mais detalhados para o entendimento da dinâmica da MOS. Ademais, é necessário avaliar o efeito das diferentes combinações de SIPA sobre as variações da MOS, uma vez que, tanto a escolha das culturas a serem utilizadas bem como o manejo adotado e condições climáticas, são responsáveis por alterações no teor COT e COp do solo.

Não ocorreram alterações significativas no teor de COam. O teor de COam normalmente é menos alterado pelas diferentes formas de manejo adotado, principalmente a curto prazo (BAYER et al., 2004).

Cruz (2016) ao estudar teor de COT na mesma área experimental desta pesquisa, também não verificou variações nos teores de COT. Embora não ocorreram aumento nos teores de COT, nas avaliações entre novembro de 2016 e 2017, os teores de COT se mantiveram acima dos encontrados por Cruz (2016), com um incremento médio nos teores de COT de 4%. A área deste experimento ficou em pousio com predominância de capim braquiariinha (*Urochloa decumbens*) por um período de 5 anos (2005 – 2010), e na safra 2010/2011 iniciou-se a instalação do SIPA com pastejo, ou seja, a área do experimento recebeu constante aportes de C por um longo período, que pode explicar o baixo incremento no teor de COT para as avaliações em novembro de 2016 e 2017, pois máximos acúmulos de C provavelmente ocorreram nos anos de pousio e nos primeiros anos de instalação do SIPA.

2.3.3 Estoque de C e N no solo

O estoque de C e N foram superiores no tratamento MB/A/SA (Tabela 9), neste também ocorreu a maior produção de palha e aportes de C e N (Tabela 8). Demonstrando a importância, mais uma vez, do incremento de resíduos vegetais no solo, com intuito de melhorar a sua qualidade.

A partir da fitomassa adicionada no solo é produzida a matéria orgânica, sendo necessário um aporte satisfatório de resíduos para aumentar ou evitar perdas no estoque de C e N do solo. Bayer et al. (2000), demonstraram a importância da produção de fitomassa das plantas constituintes dos sistemas na definição dos estoques de carbono orgânico total (COT) em SSD. Em um solo descoberto, com adição anual de $0,66 \text{ Mg ha}^{-1}$ de C via resíduo vegetal de plantas espontâneas (invasoras), os autores estimaram, para um período de 100 anos, que após uma perda de $22,55 \text{ Mg ha}^{-1}$ de C desde o início da adoção deste manejo, o estoque de COT se estabilizaria em 10 Mg ha^{-1} na camada de 0,0 - 17,5 cm.

Já em um sistema de culturas constituído de guandu + milho, com adição anual de $8,89 \text{ Mg ha}^{-1}$ de C, o estoque estável de C nesta camada foi estimado para $61,38 \text{ Mg ha}^{-1}$ para esta mesma simulação de 100 anos, representando um acúmulo de $28,83 \text{ Mg ha}^{-1}$ em relação ao estoque no início do manejo conservacionista, comprovando assim que a adoção do SSD de forma isolada, sem levar em consideração a adoção de sistemas de culturas com satisfatório aporte de resíduos, não é solução para eliminar perdas de C do solo.

Tabela 9. Estoques de C e N no perfil do solo (0,0 – 0,40 m)

Fonte de variação	Estoque C	Estoque N
	----- (Mg ha^{-1}) ----- Camada 0,0 - 0,40 m	
Sistema de produção		
MB/A/SA	98,03 a	6,03 a
MBG/A/SA	90,47 b	5,90 a
Época ¹		
Novembro 2016	94,33 a	6,38 a
Novembro 2017	94,22 a	6,00 a
Probabilidade de F		
Sistema de produção	0,0002	0,2312
Época	0,9518	0,6063
Sistema x Época	0,6006	0,2462

Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste t (LSD) ($p \leq 0,05$).

Assim como a quantidade de fitomassa adicionada, a qualidade dos resíduos das plantas em rotação influencia o estoque e a qualidade da MOS (JOHNSON et al., 2007). Embora a palha produzida após a colheita da soja para ensilagem tenha maiores teores de N, a baixa quantidade de palha (2172 kg ha^{-1}) tem influência na redução dos estoques de N, aliado à isso não é realizada adubação com N mineral durante a fase de pastejo, fazendo com que as gramíneas utilizem o N do solo contribuindo para redução dos estoques de N.

Os micro-organismos do solo em condições de estresse consomem mais carbono oxidável para sua manutenção (PARTELLI et al., 2012). Isto tem implicações práticas importantes na agricultura, pois se mais C é respirado, maior quantidade de C pode estar sendo liberado do solo, acarretando diminuição dos teores de C no solo (INSAM et al., 1991) e alteração nos estoques de C do solo. Fato que ocorreu para o sistema MBG/A/SA, onde a maior emissão pode ter sido provocada pela maior exposição do solo aliado ao maior estoque de N nesse tratamento, potencializando com isso as emissões de CO_2 , conseqüentemente menor estoque de C no solo.

A perda no estoque de carbono pode ser em função da menor adição de resíduos vegetais da parte aérea retirados pelo corte para ensilagem. Uma diminuição na participação da parte aérea da pastagem, conseqüentemente da entrada de C no solo, tem conseqüências para a qualidade de sistemas de semeadura direta (SILVA et al., 2014), ou seja, a retirada de massa de matéria seca de ensilagem aliado ao pastejo pode influenciar diretamente nos estoques de C e N do solo.

De forma geral, áreas de cultivo onde as espécies forrageiras foram implantadas em sucessão às culturas produtoras de grãos, principalmente nos primeiros anos de implantação, resultam em maiores estoques de C e N no solo.

Mesmo não ocorrendo diferença significativa entre as épocas de avaliação, vale ressaltar que os valores nos estoques de C e N, foram 10% superiores aos encontrados por Cruz (2016), que estudou os estoques de C e N na mesma área da presente pesquisa nos anos de 2014 e 2015. Estudos conduzidos por Laroca et al. (2018) estudando gramíneas forrageiras em SIPA, na entressafra, pouco influenciaram os estoques de C no curto prazo. Esses resultados demonstram que, em SIPA sob SSD, ocorre incrementos nos estoques de C e N do solo, porém, de forma mais gradativa após alguns anos de implementação de SIPA em SSD, além disso, como os SIPA estudados na presente pesquisa, são destinados a produção

de silagem com pastejo na entressafra, os fluxos de entrada e saída de C e N do sistema, não são estáveis, pois ficam mais expostos às condições climáticas, em comparação a sistemas destinados à produção de grãos, devido aos menores aportes dos resíduos da colheita para silagem, reduzindo assim a velocidade de acúmulo de C e N no solo.

2.3.4 Fluxo de CO₂, Fluxo acumulado de CO₂ e Emissão Relativa

Os resultados de fluxo de CO₂ (FCO₂), Umidade do solo (US) e Temperatura do solo (TS) para as épocas avaliadas estão apresentados na Figura 4. Verificou-se que não houve diferença estatística entre os SIPA avaliados, e que no sistema MBG/A/SA houve as maiores emissões para todos os períodos de avaliação.

Após a aplicação de calcário no solo, somente nas avaliações aos 15 e 30 DAC ocorreram os picos de FCO₂, sendo que ocorreu nesse período uma precipitação de 70 mm, elevando a US e influenciando a reação do calcário no solo.

Situação semelhante foi constatada por Marcelo et al. (2012), em estudo para avaliar o efeito da calagem na respiração do solo, no qual se verificou que quando o calcário foi aplicado na dose recomendada a emissão de CO₂ foi 24% maior em comparação à do solo sem aplicação de calcário. A calagem é uma importante fonte de emissão de CO₂ do solo, o carbonato dissolve-se e libera bicarbonato (2HCO₃⁻), que evolui em CO₂ e água (H₂O) (IPCC, 2006).

Embora maiores emissões de CO₂ sejam resultantes de reações de hidrólise do carbonato de cálcio no solo, a atividade microbiana também se intensifica após o processo de calagem pela melhoria das condições químicas do solo (FUENTES et al., 2006). Aliado à isso, o maior teor de N na palha do sistema MBG/A/SA também influencia nas emissões, devido à menor recalcitrância dos materiais vegetais com menor relação C/N, sendo mais fácil para os micro-organismos decomporem essa palha, aumentando assim as emissões.

Durante o período de cultivo da soja, os maiores FCO₂ ocorreram aos 3, 5, 10 e 15 DAS. Maiores FCO₂ são induzidos pelo plantio, com a atividade das hastes sulcadoras do solo ocorre a exposição do carbono antes protegido no interior dos agregados do solo que, associado à maior oxigenação do solo, temperatura e umidade mais elevadas, favorece a atividade decompositora dos micro-organismos, resultando em maiores emissões de CO₂ do solo para a atmosfera a curto prazo.

A liberação de CO_2 a partir da decomposição da matéria orgânica do solo pela respiração heterotrófica, geralmente aumenta exponencialmente com a temperatura (SMITH et al., 2003).

Os menores picos observados aos 30 e 45 DAS, fato relacionado ao elevado aumento da US, pois nesse período ocorreu a maior concentração de chuvas (160 mm), fazendo com que a maior parte do tempo permanecesse nublado, abaixando a incidência solar na superfície do solo, a TS e a temperatura do ar, consequentemente reduzindo a emissão de CO_2 . A produção de CO_2 pode ser favorecida ou inibida, dependendo do conteúdo de umidade do solo, visto que há uma umidade ótima que maximiza a respiração (LINN & DORAN, 1984), e em excesso a respiração microbiana do solo é limitada pela restrição da difusão de oxigênio necessário para a respiração aeróbia (LAL, 2009). Aos 60 dias DAS, ocorreu outro pico de FCO_2 , explicado pelo período de florescimento da soja, em que ocorrem as maiores taxas de respiração radicular, nesse período também (HATFIELD & PARKIN, 2012; MORELL et al., 2012), assim como TS e US de 30°C e 35°C. As emissões em 90 e 120 DAS, foram 22% menor em comparação aos 60 DAS, e se mantiveram sem grandes variações, não seguindo os padrões de US e TS, podendo as emissões nesse período serem influenciadas pelo maior crescimento do capim aruana com aumento da respiração das raízes do capim, sendo que após o florescimento a soja não cresce mais, iniciando os estádios de crescimento de vagens e grãos.

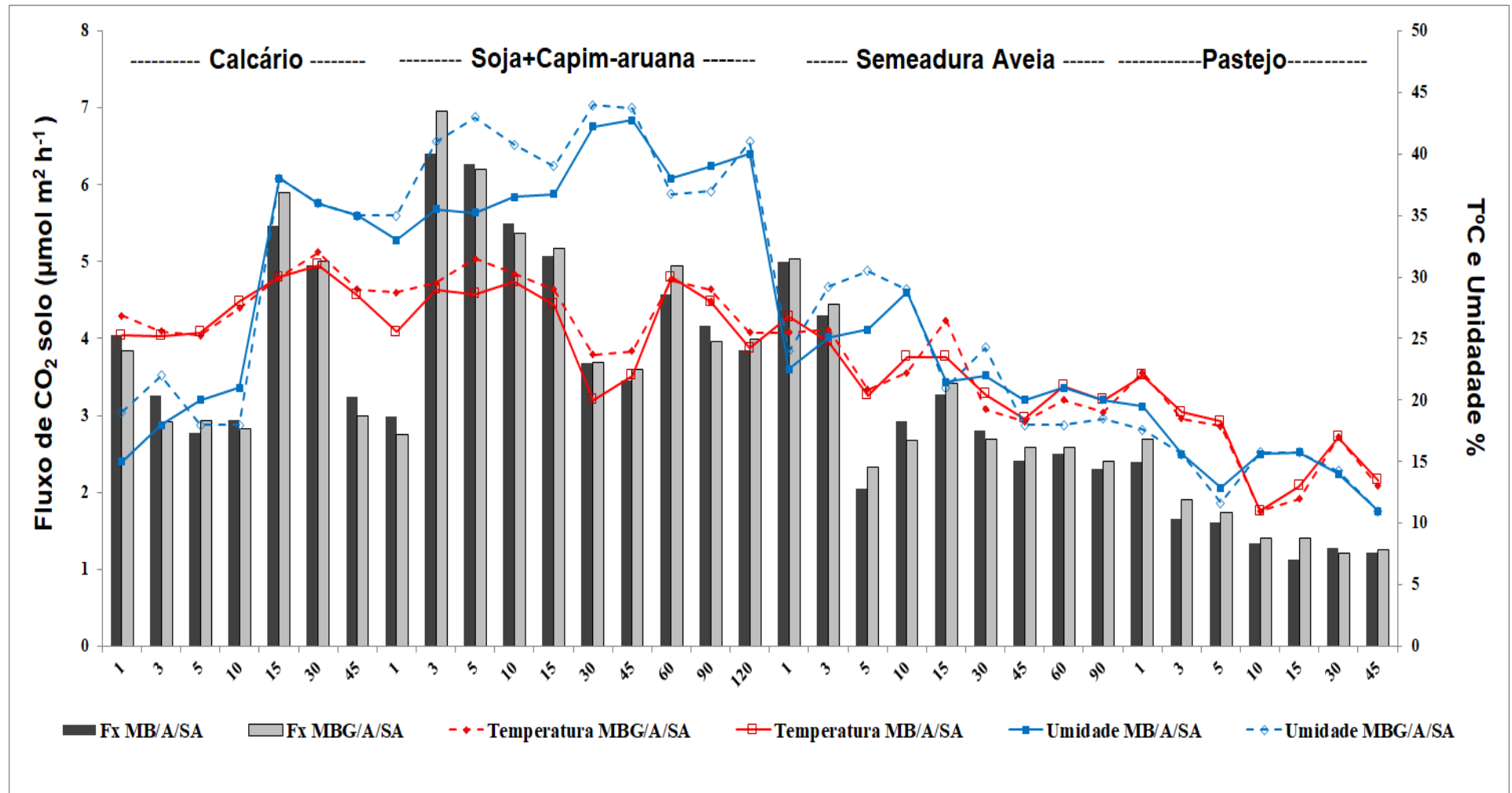
Verma et al. (2005) reportaram baixas taxas de respiração do ecossistema da soja durante os períodos frios depois da colheita, e uma correlação significativa da emissão de CO_2 com a temperatura do solo. No entanto, estes autores não encontraram correlação significativa com o conteúdo de umidade do solo. Por outro lado, La Scala et al. (2000) mencionaram que não houve correlação significativa entre o efluxo de CO_2 do solo e a umidade e temperatura do solo.

As emissões durante o plantio da aveia mantiveram o mesmo padrão do cultivo da soja, no 1 e 3 DAS ocorreram os maiores picos de emissão desse período. O plantio da aveia ocorreu no início do outono, coincidindo com o período de redução das chuvas e temperaturas mais amenas, tendo influenciado a emissão no 5 DAS, onde a TS baixa foi responsável pelo menor emissão. Aos 15, 30, 45 e 60 DAS ocorreu uma queda gradativa do FCO_2 acompanhando os padrões de TS e US.

Durante a fase de pastejo somente no 1 DAE, ocorreu pico de FCO_2 , sendo este pico inferior aos emitidos pelas épocas de amostragem anteriores. Esse fato pode estar relacionado com o comportamento das borregas ao entrarem a primeira vez nos piquetes de pastejo, as quais caminham bastante para reconhecer o novo local. Nas avaliações aos 3, 5 e 10 DAE o FCO_2 decaiu gradativamente até estabilizar nas avaliações aos 15, 30 e 45 DAE. Observou-se que mesmo com a pastagem de aveia sendo consumida pelas borregas não ocorreram picos de emissão, seguindo o padrão de TS e US.

Verificou-se que a TS e a US influenciaram os fluxos do CO_2 , com as menores emissões observadas durante o período final de avaliações (Figura 2), que ocorreu no período de inverno, devido à redução de umidade e temperatura do solo, o que provavelmente promoveu menor atividade microbiana e menor respiração radicular (RAMOS et al, 2006). Esperava-se que logo após o início do pastejo o FCO_2 fosse maior, devido ao pastejo estimular a rebrota e o desenvolvimento de raízes, expor o solo as condições climáticas, e os dejetos, como fezes e urina, resultassem em maior atividade microbiana. Porém, isso não foi constatado, possivelmente devido à baixa US e TS no momento dessas avaliações (Figura 2).

Figura 4. Fluxo de CO₂ do solo em dias após a aplicação de Calcário, dias após a Semeadura da Soja, dias após a semeadura da Aveia e dias após o pastejo da Aveia



Independente das épocas de avaliação, o maior FCO₂ ocorreu para o tratamento MBG/A/SA, que pode estar relacionado com o maior estoque de N no solo e nos resíduos vegetais, acelerando a mineralização e influenciando nas emissões. Cruz (2016) estudou a emissão de CO₂ no período de semeadura da aveia no ano de 2015, na mesma área de estudo desta pesquisa, e também constatou maior FCO₂ para os manejos de solo, onde o feijão guandu foi semeado em consórcio com milho e braquiária na safra de verão. Rigon et al. (2018) estudando a influência de plantas de cobertura na emissão de CO₂ constataram que a umidade do solo e o conteúdo de N dos resíduos culturais das plantas de primavera estão dentre os principais condicionantes no fluxo de CO₂ do solo.

Resultados de pesquisa têm relatado que os resíduos culturais na superfície aumentam substancialmente as emissões de CO₂ (MAPANDA et al., 2011). Isto se deve basicamente à disponibilidade de frações lábeis como o COP oriundo dos substratos que conduzem a uma rápida decomposição pela população microbiana, denominado efeito “priming” (KUZ'YAKOV, 2006; CAMBARDELLA & ELLIOTT, 1992). Sistemas intensivos como os SIPA são sistemas dinâmicos, que mantém plantas vivas e palhada durante todo o ano e inserção do componente animal na entressafra, que envolvem vários fatores como umidade e temperatura do solo, palhada disponível e qualidade dos resíduos, influenciando o FCO₂.

2.3.5 Emissões C-CO₂ acumulada e Emissão Relativa (Yield-scaled)

De forma geral, as emissões acumuladas de C-CO₂ (Tabela 6) seguiram o mesmo padrão do fluxo de CO₂. Mesmo sem efeito significativo entre os sistemas, o sistema MBG/A/SA apresentou maior C-CO₂ ha⁻¹, porém esse sistema apresenta a menor emissão relativa (Yield Scaled), consequentemente maior produção de silagem, indicando assim, que mesmo com a maior emissão de C-CO₂ esse sistema foi mais eficiente em produzir maior quantidade de silagem por kg de C-CO₂ emitido, além disso a menor relação C/N da palha nesse sistema (Tabela 6) pode explicar a tendência de maior emissão acumulada de C-CO₂ do solo. Resíduos com baixa relação C/N são mais facilmente decompostos pelos micro-organismos do solo do que os resíduos com alta relação C/N (AITA & GIACOMINI, 2007), fato que pode ter influenciado as emissões de CO₂.

Bortolli (2016) mostrou que o pastejo altera a estrutura da pastagem e, desta forma, a composição da vegetação e o teor de N nos resíduos vegetais. Estas mudanças nas pastagens, ocasionadas pelo pastejo, tendem a aumentar a disponibilidade de N inorgânico pela melhoria da qualidade da biomassa das plantas. Em seu estudo o autor observou uma acentuada aceleração na velocidade de decomposição dos resíduos de milho quando os mesmos são provenientes de piquetes cultivados com aveia manejada com uma altura da pastagem em 15 cm, durante a fase de pastejo. O fato do sistema MBG/A/SA, apresentar maior teor de N dos resíduos, aliado ao pastejo, influenciou a atividade de micro-organismos decompositores, resultando na maior emissão de CO_2 e maior C- CO_2 acumulado para esse sistema.

Tabela 7. Emissão acumulada de C- CO_2 , C- CH_4 e N- N_2O , em kg ha^{-1} , nas avaliações realizadas no ano de 2014, sem a influência do pastejo animal.

Tratamentos	Calcário	Soja + Aruana	Semeadura Aveia	Pastejo Aveia	Yield C- CO_2
$\text{kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$					
MB/A/SA	105 a	55 a	20,3 a	18,9 a	1,62 a
MBG/A/SA	116 a	58 a	21,5 a	19,5 a	1,31 b

Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste t (LSD) ($p \leq 0,05$).

No período de cultivo da soja, período também onde ocorreram maiores temperaturas e umidade, favorecendo assim a emissão de CO_2 , contudo esse período registrou a segunda maior emissão de C- CO_2 por dia.

Após a aplicação do calcário, apresentou as maiores emissões diárias sendo de $114,4 \text{ kg de C-}\text{CO}_2 \text{ ha}^{-1}$, embora a aplicação do calcário seja relacionada com a elevação das emissões de C- CO_2 em solos com uso agropecuário (MCTI, 2014), vale ressaltar que essa maior emissão ocorre em um período curto de reações do calcário com o solo, sendo um insumo de relevante importância para a manutenção e aumento da produtividade agropecuária e qualidade do solo.

Para as emissões acumuladas no período de plantio da aveia e pastejo, observou-se as menores emissões diárias de C- CO_2 , explicados pelos decréscimos no fluxo de CO_2 do solo, na mesma proporção que a temperatura e umidade do solo,

durante os períodos de outono e inverno, por conseguinte apresentaram menor fluxo de C-CO₂ por dia.

Geralmente, as emissões de C-CO₂ são maiores no verão e menor nos meses de inverno, paralelo ao padrão de temperatura e umidade, sendo essa uma tendência semelhante relatada por Franzluebbers et al. (1995), Costa et al. (2008) e Siqueira Neto et al. (2009).

2.4 CONCLUSÕES

A temperatura e umidade do solo, a baixa produção de MS e a maior emissão de CO₂ do sistema MBG/A/SA, influenciaram a redução dos estoques de C e N do solo, devendo todas essas variáveis serem analisadas em conjunto.

Os SIPAs estudados não foram eficientes em aumentar os estoques de C e N, no curto prazo.

SIPA tem grande potencial para aumentar a produção agrícola e pecuária, gerando resultados ambientais positivos, com a emissão de CO₂ compensada pelo menor valor de emissões relativas, ou seja, menor emissão de CO₂ por kg de silagem produzida.

A qualidade da matéria orgânica do solo foi influenciada pelos sistemas de SIPA estudados, principalmente na camada 0,0 - 0,05 cm, sendo que o teor de C_{Op} e C_{OT} diminuíram entre as épocas analisadas.

Contudo, sugere-se que novas pesquisas de longo prazo sejam realizadas para avaliar a dinâmica da MOS em SIPA destinados a produção de silagem com posterior pastejo na entressafra.

Referências

ADAMI, P.F.; PITTA, C.S.R. **Pastagem e bovinocultura de leite**. Curitiba: Instituto Federal do Paraná, 2012. 80p.

AITA, C.; GIACOMINI, S.J. Matéria orgânica do solo, nitrogênio e enxofre nos diversos sistemas de exploração agrícola. In: YAMADA, T.; STIPP E ABDALLA, S.R.; VITTI, G.C. Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira. Piracicaba, SP: **International Plant Nutrition Institute (INPI)**, 2007, cap.1, p.1-41.

AMBROSANO, E. J.; TANAKA, R. T.; MASCARENHAS, H. A. A.; RAIJ, B. V.; QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, H. Leguminosas. In: RAIJ, B. V.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (Eds.). **Boletim Técnico 100: Recomendação de Adubação e Calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônomo; IAC, 1997. p. 187-202.

BALBINOT JR., A. A.; VEIGA, M. da; MORAES, A.; PELISSARI, M. A. L.; PICOLLA, C. D. Winter pasture and cover crops and their effects on soil and summer grain crops. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** (Impressa), v.46, p. 1357-1363, 2011.

BAYER C.; LOVATO T.; DIECKOW J.; ZANATTA J. A.; MIELNICZUK J. A. Method for estimating coefficients of soil organic matter dynamics based on long-term experiments. **Soil and Tillage Research**, v.19, p. 217-26, 2006

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A. Armazenamento de carbono em frações lábeis da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, n.7, p. 677-683, 2004.

BAYER, C. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v.54, n.1, p.101- 109, 2000.

BOENI, M.; BAYER, C.; DIECKOW, J.; CONCEIÇÃO, P. C.; DICK, D. H P.; KNICKER, H.; SALTON, J. C.; MACEDO, M. C. M. Organic matter composition in density fractions of Cerrado Ferralsols as revealed by CPMAS ¹³C NMR: Influence of pastureland, cropland and integrated crop-livestock. **Agriculture, Ecosystems & Environment** (Print), v.190, p. 80-86, 2014.

BORTOLLI, M. A. de. **Adubação de sistemas: antecipação da adubação nitrogenada para a cultura do milho em integração lavoura pecuária**. 2016, 89p. Tese (Doutorado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco.

BUTTERLY, C.; BALDOCK, J.; TANG, C. The contribution of crop residues to changes in soil pH under field conditions. **Plant and Soil**, v.366, p.185–198, 2013.

CALONEGO, J. C.; MORA, V. S.; SANTOS, C. H.; OLIVEIRA, L. Calagem e silicatagem em solo incubado com diferentes umidades. **Colloquium Agrariae**, v.8, n.2, p. 46-56, 2012.

CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of American Journal**, v.56:, p. 777–783, 1992.

CANTARELLA, H. **Nitrogênio**. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.). Fertilidade do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 375-470, 2007.

CARVALHO, J. S.; KUNDE, R. J.; STOCKER, C. M.; LIMA, A. C. R.; SILVA, J. L. S. Evolução de atributos físicos, químicos e biológicos em solo hidromórfico sob sistemas de integração lavoura-pecuária no bioma Pampa. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** (1977. Impressa), v.51, p. 1131-1139, 2016.

CASSMAN, K.G.; DOBERMANN, A.; WALTERS, D.T. Agroecosystems, nitrogen-use efficiency, and nitrogen management. **Ambio**, v.31, p.132–140, 2002.

COSTA, F.S.; BAYER, C.; ZANATTA, J.A. & MIELNICZUK, J. Estoque de carbono orgânico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p. 323-332, 2008.

CARVALHO, P. C.; ANGHINONI, I.; MORAES, A.; SOUZA, E. D.; SULC, R. M.; LANG, C. R.; FLORES, J. P. C.; TERRA LOPES, M. L.; SILVA, J. L. S.; CONTE, O.; LIMA WESP, C.; LEVIEN, R.; FONTANELI, R. S.; BAYER, C. Managing grazing animals to achieve nutrient cycling and soil improvement in no-till integrated systems. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.88, p. 259-273, 2010.

FEHR, W. R.; CAVINESS, C.E. Stage of soybean development. Iowa: Iowa State University, 1977. 12p. (Special Report 80). FERREIRA, E. V. O.; ANGHINONI, I.; ANDRIGHETTI, M. H.; MARTINS, A. P.; CARVALHO, P. C. F. Ciclagem e balanço de potássio e produtividade de soja na integração lavoura-pecuária sob semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p. 161-169, 2011.

FRANZLUEBBERS, A. J.; HONS, F. M.; ZUBERER, D. A. Tillage-induced seasonal changes in soil physical properties affecting soil CO₂ evolution under intensive cropping. **Soil and Tillage Research**, v.34, p. 41-60, 1995.

FUENTES, J.P.; BEZDICEK, D.F.; FLURY, M.; ALBRECHT, S.; SMITH, J.L. Microbial activity affected by lime in a long-term no-till soil. **Soil and Tillage Research**, v.88, n.1-2, p.123- 131, 2006.

GAZOLLA, P. R.; GUARESCHI, R. F.; PERIN, A.; PEREIRA, M. G.; ROSSI, C. Q. Frações da matéria orgânica do solo sob pastagem, sistema plantio direto e integração lavoura-pecuária. Seminário. **Ciências Agrárias** (Impresso), v. 36, p. 693-704, 2015.

HATFIELD, J. L.; PARKIN, T. B. Spatial variation of carbon dioxide fluxes in corn and soybean fields. **Agricultural Sciences**, v. 3, p. 986-995, 2012.

INSAM, H.; MITCHELL, C.C. & DORMAAR, J.F. Relationship of soil microbial biomass and activity with fertilization practice and crop yield of three ultisols. **Soil Biology and Biochemistry**, v.23, p. 459-464, 1991.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change: **Guidelines for National Green House Gas Inventories**. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Japan: IGES, 2006.chapter 11.

JOHNSON, J. M. F.; BARBOUR, N. W.; WEYERS, S. L. Chemical composition of crop biomass impacts its decomposition. **Soil Science Society of America Journal**, v. 71, n. 1, p. 155-162, 2007.

KLUTHCOUSKI, J.; YOKOYAMA, L. P. Opções de integração lavoura-pecuária. In: KLUTHCOUSKI, J.; STONE, L. F.; AIDAR, H. (Ed.). **Integração lavoura-pecuária**. 1.ed. Santo Antônio de Goiás: Embrapa, 2003. p.131-141.

KUZYAKOV, Y. Sources of CO₂ efflux from soil ad review of partitioning methods. **Soil Biology and Biochemistry**, v.38, p. 425-448, 2006.

LAL, R. Challenges and opportunities in soil organic matter research. **European Journal of Soil Science**, v.60, n.2, p.158–169, 2009.

LAROCA, J. V. S.; SOUZA, J. M. A.; PIRES, G. C.; PIRES, G. J. C.; PACHECO, L. P.; SILVA, F. D.; WRUCK, F. J.; CARNEIRO, M. A. C.; SILVA, L.S.; SOUZA, E. D. Soil quality and soybean productivity in crop-livestock integrated system in no-tillage. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** (Online), v. 53, p. 1248-1258, 2018.

LA SCALA J. R. N.; MARQUES, J. R. J.; PEREIRA, G. T.; CORÁ, J. E. Carbon dioxide emission related to chemical properties of a tropical bare soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v.32, p.1469-1473, 2000.

LEONEL, F. P.; PEREIRA, J. C.; COSTA, M. G.; MARCO JÚNIOR, P. D.; LARA, L. A.; SOUSA, D. P.; SILVA, C. J. Consórcio capim-braquiária e soja, produtividade das culturas e características qualitativas das silagens. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.37, n.11, p.2031-2040, 2008.

LINN, D. M.; DORAN, J. W. Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and non-tilled soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.48, n.6, p. 1267-1272, 1984.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; PERIN, A.; COUTINHO, F. S.; ANJOS, L. H. C. dos. Particulate organic matter in soil under different management systems in the Brazilian Cerrado. **Soil Research**, v.50, p. 685-693, 2012.

MAPANDA, F.; WUTA, M.; NYAMANGARA, J.; REES, R.M. Effects of organic and mineral fertilizer nitrogen on greenhouse gas emissions and plant-captured carbon under maize cropping in Zimbabwe, **Plant and Soil**, v.343, p.67-81, 2011.

MARCELO, A.V.; CORA, J.E.; LA SCALA, N. Influence of liming on residual soil respiration and chemical properties in a tropical no-tillage system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, MG, v.36, n.1, p.45-50, 2012.

MCTI - MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. 2^a ed. Brasília: MCTI, 2014.

MORELL, F.J.; WHITMORE, A.P.; ÁLVARO-FUENTES, J.; LAMPURLANÉS, J.; CANTERO-MARTÍNEZ, C. Root respiration of barley in a semiarid Mediterranean agroecosystem: Field and modeling approaches. **Plant and Soil**, v.351, p. 135–147, 2012.

PAIR, C. D. **Qualidade física e matéria orgânica do solo em sistema de integração lavoura-pecuária submetido a doses de nitrogênio** / Cristiane Dalagua Paier. 2015. 74 f. Dissertação de mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2015.

PARTELLI, F. L.; VIEIRA, H. D.; FERREIRA, E. P. B.; VIANA, A. P.; MARTINS, M. A.; URQUIAGA, S. Chemical and microbiological soil characteristics under conventional and organic coffee production systems. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.43, n.2, p. 847-864, 2012.

RAIJ, B. V.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. rev. Campinas: IAC. 1996. 279 p. (Boletim Técnico, 100).

RAIJ, B. V.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 284p., 2001.

RAMOS, L. A.; NOLLA, A.; KORNDORFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; CAMARGO, M. S. Reatividade de corretivos da acidez e condicionadores de solo em colunas de lixiviação. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, v.30, p. 849-857, 2006.

RIGON, J. P. G.; CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A.; SCALA JUNIOR, N. L. Short-term CO₂ emissions and soybean yield in rotation with cover crops under no-till. **Scientia Agrícola**, v.75, p.18-26, 2018.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; OLIVEIRA, J. B.; COELHO, M. R.; LUMBRERAS, J. F.; CUNHA, T. J. F. (Ed.). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306p.

SIX, J.; FREY, S. D.; THIES, R. K.; BATTEN, K. M. Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agroecosystems. **Soil Science Society America Journal**, v.70, p.555- 569, 2006.

SILVA, E. F.; MOITINHO, M. R.; TEIXEIRA, D. B.; PEREIRA, G. T.; LA SCALA, N. Emissão de CO₂ do solo associada à calagem em área de conversão de laranja para cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, v. 34, p. 885-898, 2014.

SIQUEIRA NETO, M.; PICCOLO, M.C.; FEIGL, B.J.; VENZKE FILHO, S.P.; CERRI, C.E.P. & CERRI, C.C. Rotação de culturas no sistema plantio direto em Tibagi (PR). II – Emissões de CO₂ e N₂O. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.1023-1029, 2009.

SOUZA, E. D.; SILVA, F. D.; PACHECO, L. P.; LAROCA, J. V. S.; SOUZA, J. M. A.; BONETTI, J. A. Matéria orgânica do solo em sistemas integrados de produção agropecuária no Brasil. In: SOUZA, E. D.; SILVA, F. D. da; ASSMANN, T. S.; CARNEIRO, M. A. C.; CARVALHO, P. C. P.; PAULINO, H. B. (Org.). **Sistemas Integrados de Produção Agropecuária no Brasil**. 1 ed. TUBARÃO: COPIART, 2018, v.1, p. 107-122.

SMITH, K. A.; BALL, T.; CONEN, F.; DOBBIE, K. E.; MASSHEDER, J.; REY, A. Exchange of greenhouse gases between soil and atmosphere: interactions of soil physical factors and biological processes. **European Journal of Soil Science**, v.54, p. 779–791, 2003.

SOUZA, E. D.; CARNEIRO, M. A. C.; PAULINO, H. B.; SILVA, C. A.; BUZETTI, S. Frações do carbono orgânico, biomassa e atividade microbiana em um Latossolo Vermelho sob cerrado submetido a diferentes sistemas de manejos e usos do solo. **Acta Scientiarum. Agronomy** (Impresso), v. 28, p. 323-329, 2006.

VELDKAMP, E. Organic Carbon Turnover in Three Tropical Soils under Pasture after Deforestation. **Soil Science Society of America Journal**, v.58, p. 175-180, 1994.

VERMA, S. B.; DOBERMANN, A.; CASSMAN, K. G.; WALTERS, D.T.; KNOPS, J. M.; ARKEBAUER, T. J.; SUYKER, A. E.; BURBA, G. G.; AMOS, B.; YANG, H.; GINTING, D.; HUBBARD, K. G.; GITELSON, A. A.; WALTER-SHEA, E.A. Annual carbon dioxide exchange in irrigated and rainfed maize-based agroecosystems. **Agricultural and Forest Meteorology**, 131, p. 77–96, 2005.

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 and Tillage Research**, v. 94, p. 510-519, 2007.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

SIPA sob SSD, principalmente utilizando consórcios com leguminosas e forrageira é uma alternativa viável para produção de silagem. A inserção do pastejo na entressafra não afeta os atributos físicos e químicos do solo, sendo que os processos de ciclagem de nutrientes, o efeito residual das adubações e os resíduos animais (esterco e urina), são eficientes em melhorar a fertilidade do solo, e a compactação causada pelo pastejo é rapidamente corrigida, pelos efeitos da produção de raízes.

Os resultados fornecem informações que demonstram que os SIPAs empregados nesse estudo, podem se encaixar em preceitos sustentáveis de baixa emissão de CO₂, manutenção ou aumento da MOS, sendo um atributo indicador de qualidade do manejo do solo, levando em consideração a alta capacidade produtiva dos SIPAs.

É necessário enfatizar que esses sistemas apresentam inúmeros benefícios e ganho de produtividade, desde que, respeitados as premissas do SSD e a realização de um bom manejo do pastejo, respeitando a altura de pastejo recomendada para a espécie forrageira utilizada, principalmente em sistemas de produção de silagem, para que ela possa perfilhar, emitir novas raízes e formar biomassa após o pastejo, suficiente para manter a cobertura do solo com palha.

Com a necessidade do aumento da produtividade agropecuária para atender as demandas alimentares da população mundial, os SIPAs despontam como alternativa de intensificação da produção para alcançar a quantidade de alimentos necessária, a segurança alimentar e a produção sustentável, trazendo ainda benefícios ambientais.

REFERÊNCIAS

- ASSMANN, T.S.; MARTINICHEN, D.; LIMA, R.C.; HUF, F.L.; ZORTÉA, T.; ASSMANN, A. L.; MORAES, A.; ALVEZ, S.J. **Adubação de Sistemas e Ciclagem de Nutrientes em Sistemas Integrados de Produção Agropecuária**. In: SOUZA, E.D.; SILVA, F.D.; ASSMANN, T.S.; CARNEIRO, M.A.C.; CARVALHO, P.C.F.; PAULINO, H.B. (Org.). *Sistemas Integrados de Produção Agropecuária no Brasil*. 1 ed. Tubarão: Copiart, 2018, v. 1, p. 123-144.
- CARVALHO, P. C. DE F.; ANGHINONI, I.; MORAES, A.; TREIN, C. R.; FLORES, J. P. C.; CEPIK, C. C.T.; LEVIEN, R.; LOPES, M. T.; BAGGIO, C.; LANG, C. R; SULC, R. M.; PELISSARI, A. **O estado da arte em integração lavoura-pecuária**. In: GOTTSCHALL, C. S.; SILVA, J. L. S. DA; RODRIGUES, N. C. (Org.). *Produção animal: mitos, pesquisa e adoção de tecnologia*. Canoas-RS, p. 7-44. 2005.
- CARVALHO, P. C. F.; ANGHINONI, I. ; KUNRATH, T. R.; MARTINS, A. P.; COSTA, S. E. V. G. A.; DAMIAN, F.; ASSMANN, J. M.; LOPES, M. T.; PFEIFER, F. M.; CONTE, O.; SOUZA, E. D. **Integração soja-bovinos de corte no Sul do Brasil**. 1. ed. Porto Alegre: Gráfica RJR Ltda, 2011, v.1, 60p.
- CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Avaliação da Safra Agrícola 2018/2019 –Levantamento- Novembro/2018. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>. Acesso em: 15 de dezembro de 2018.
- CRUSCIOL, C. A. C.; NASCENTE, A. S.; MATEUS, G. P.; PARIZ, C. M.; MARTINS, P. O.; BORGHI, E. Intercropping soybean and palisadegrass for enhanced land use efficiency and revenue in a no till system. **European Journal of Agronomy**, v. 58, p. 53-62, 2014.
- EVANGELISTA, A. R.; RESENDE, P. M.; MACIEL, G. A. Uso da soja [*Glycine max* (L.) Merrill] na forma de forragem. **Lavras: UFLA**, 2003. 36p.
- GOBETTI, S. T. C.; NEUMANN, M.; OLIVEIRA, M. R.; OLIBONI, R. Produção e utilização da silagem de planta inteira de soja (*Glicine max*) para ruminantes. **Ambiência (UNICENTRO)**, v.7, p. 603-616, 2011.
- KLUTHCOUSKI, J.; YOKOYAMA, L. P. Opções de integração lavoura-pecuária. In: KLUTHCOUSKI, J.; STONE, L. F.; AIDAR, H. (Ed.). **Integração lavoura-pecuária**. 1.ed. Santo Antônio de Goiás: Embrapa, 2003. p.131-141.
- ROSOLEM, C. A.; SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C. Análise da situação geral. In: SORATTO, R. P.; RO SOLEM, C. A.; CRUSCIOL, C. A. C. (ed.). **Integração lavoura-pecuária-floresta: alguns exemplos no Brasil Central**. Botucatu: Editora FEPAF, 2011. p.103-104.
- SIX, J.; ELLIOTT, E.; PAUSTIAN, K. Soil structure and soil organic matter: II. A normalized stability index and the effect of mineralogy. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, p. 1042- 1049, 2000.

WHITEHEAD, D. C. Nutrient elements in grassland. **Wallingford: CABI publishing**, 2000. 369 p.

SOUZA, E. D. (Org.); SILVA, F. (Org.); ASSMANN, T.S. (Org.); CARNEIRO, M.A.C. (Org.); CARVALHO, P.C.F. (Org.); PAULINO, H.B. (Org.). **Sistemas Integrados de Produção Agropecuária no Brasil**. 1. ed. Tubarao: Copiart, 2018. v. 1. 342p.