

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
FACULDADE DE AGRONOMIA ELISEU MACIEL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGRÍCOLA FAMILIAR**



TESE

**Sistema agroflorestal multipropósito e o seu impacto na qualidade física
do solo**

Cristiane Mariliz Stöcker

Pelotas, 2019

CRISTIANE MARILIZ STÖCKER

**SISTEMA AGROFLORESTAL MULTIPROPÓSITO E O SEU IMPACTO NA
QUALIDADE FÍSICA DO SOLO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Produção Agrícola Familiar da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Doutora em Agronomia.

Orientadora: Dr^a. Ana Cláudia Rodrigues de Lima

Coorientador: Dr. Adilson Luís Bamberg

Pelotas, 2019

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

S111s Stöcker, Cristiane Mariliz

Sistema agroflorestal multipropósito e o seu impacto na qualidade física do solo / Cristiane Mariliz Stöcker ; Ana Cláudia Rodrigues de Lima, orientadora ; Adilson Luís Bamberg, coorientador. — Pelotas, 2019.

83 f.

Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Produção Agrícola Familiar, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, 2019.

1. Agroecossistema. 2. Agroecologia. 3. Atributos físicos. 4. Sustentabilidade. I. Lima, Ana Cláudia Rodrigues de, orient. II. Bamberg, Adilson Luís, coorient. III. Título.

CDD : 634.95

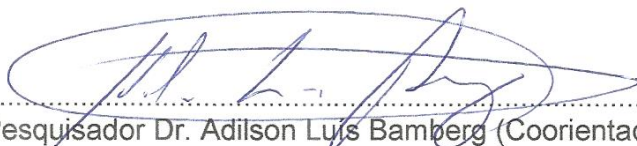
CRISTIANE MARILIZ STÖCKER

**SISTEMA AGROFLORESTAL MULTIPROPÓSITO E O SEU IMPACTO NA
QUALIDADE FÍSICA DO SOLO**

Tese aprovada, como requisito parcial à obtenção do título de Doutora em Agronomia, Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Produção Agrícola Familiar, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas.

Data da defesa: 16 de dezembro de 2019.

Banca Examinadora:



Pesquisador Dr. Adilson Luís Bamberg (Coorientador)
Doutor em Agronomia pela Universidade Federal de Pelotas



Professora Dr^a. Aline Ritter Curti
Doutora em Engenharia Florestal pela Universidade Federal de Santa Maria



Dr. Ivan dos Santos Pereira
Doutor em Agronomia pela Universidade Federal de Pelotas



Dr^a. Lizete Stumpf
Doutora em Agronomia pela Universidade Federal de Pelotas

“Todo problema começou quando começamos a querer dominar a natureza ao invés de cooperar com ela. Cada espécie tem sua função, com seus mecanismos fisiológicos para cooperar, criar mais abundância, vida e complexidade ao seu redor. Nossa principal função biológica é espalhar as sementes”.

ERNST GÖTSCH

Aos meus pais Bruno e Iná
que sempre me apoiaram e incentivaram
DEDICO e OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que estiveram ao meu lado, contribuindo de alguma forma para o desenvolvimento deste trabalho e para o meu fortalecimento pessoal e profissional, deixando um pouco de cada um. À todas estas pessoas agradeço com o mais puro e sincero sentimento de gratidão. Especialmente:

À Universidade Federal de Pelotas, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Produção Agrícola Familiar (PPG-SPAF) pela qualificação profissional e crescimento pessoal que me foi proporcionado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa.

Aos professores pelos ensinamentos e experiências compartilhadas.

Aos amigos e colegas da Pós-Graduação, pela amizade e pelos momentos que vivenciamos nesse período, em especial à amiga Juliana Carvalho.

À Embrapa Clima Temperado pelo uso da infraestrutura e equipamentos na condução do trabalho.

À minha querida orientadora Ana Cláudia Rodrigues de Lima, pela sua imensa paciência, alegria, amor e motivação. Com quem compartilhei as alegrias e as dificuldades que encontrei durante este período.

Ao meu querido coorientador Adilson Luís Bamberg, pelo exemplo de profissional que és, pelo carinho, dedicação e pelos conhecimentos transmitidos.

Aos pesquisadores Dr. Joel Henrique Cardoso e Dr^a. Rosane Martinazzo, pelo apoio, amizade, sugestões e discussões.

À Dr^a Lizete Stumpf pelo período de convivência no laboratório, pelas discussões, sugestões, conhecimentos compartilhados e pela amizade.

Ao laboratório de Física do Solo-EMBRAPA, especialmente ao funcionário Paulo Roberto "Paulão", e aos amigos Pablo, Thais e Roberta pelos momentos vivenciados durante este período.

Ao laboratório de Biologia do solo - UFPel, especialmente ao funcionário Sérgio, pelo auxílio nas análises.

Aos meus queridos pais, Bruno e Iná, meu irmão Jonas, minha cunhada Pauline e ao meu querido sobrinho Kauê, que mesmo com a distância prestaram os seus incentivos, apoio e paciência durante esta caminhada.

Especialmente ao meu namorado Alex Becker Monteiro, pelo amor, carinho, amizade, paciência, incentivo, constante apoio, sempre me ajudando a superar as dificuldades.

À Deus por ter guiado os meus passos, nunca me desviando dos meus objetivos. Por ter colocado pessoas tão especiais no meu caminho, por me mostrar a melhor maneira de enfrentar os obstáculos na vida pessoal e profissional. Por ter me concedido saúde, força, serenidade, alegria e coragem para seguir firme no meu propósito.

Enfim, gratidão a todas as pessoas que contribuíram de forma direta ou indireta para que essa tese se tornasse realidade.

RESUMO

STÖCKER, Cristiane Mariliz. **Sistema agroflorestal multipropósito e o seu impacto na qualidade física do solo**. 2019. 83 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Programa de Pós-graduação em Sistemas de Produção Agrícola Familiar, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Capão do Leão, Brasil, 2019.

Os sistemas agroflorestais (SAFs) são consórcios de culturas anuais com espécies arbóreas, sendo uma alternativa viável e eficaz para garantir a sustentabilidade, proporcionando melhorias nos aspectos voltados para a conservação dos recursos naturais, em especial o solo. O objetivo deste estudo foi avaliar a capacidade de um sistema agroflorestal em melhorar a qualidade físico-hídrica do solo em curto espaço de tempo na região Sul do Rio Grande do Sul. O estudo foi realizado na Estação Experimental Cascata, pertencente à Embrapa Clima Temperado, situado em Pelotas, RS. O SAF foi implantado no segundo semestre de 2013, em um Argissolo de classe textural Franco Arenosa, num relevo suave ondulado. A área do SAF (0,25 hectares) foi constituída por espécies arbóreas perenes produtoras de biomassa, de interesse madeireiro e frutíferas (linhas), as quais estão intercaladas. Já na faixa central das entrelinhas foram implantadas mudas de um subarbusto perene e uma gramínea perene, complementadas com espécies anuais de plantas de cobertura de verão e inverno. As coletas de solo foram realizadas nos anos de 2015, 2016 e 2017, na área do SAF (SAF-linha e SAF-entrelinha) e em uma área adjacente, representativa da condição natural de uso do solo. Foram coletadas amostras de solo com estrutura preservada e não preservada nas camadas 0,00-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40m para a determinação dos atributos da qualidade do solo. Os resultados foram submetidos à análise de variância e para variáveis com efeito significativo (teste F, 5% de probabilidade) foi aplicado o teste de comparação de médias de Tukey ao nível de significância de 5% de probabilidade ($p < 0,05$). Os resultados mostram que: i: apesar do solo da mata nativa apresentar melhor qualidade físico-hídrica, o do SAF foi eficiente quanto ao desempenho de seus indicadores, destacando-se a semelhança entre os estoques de carbono da área do SAF e da mata nativa na camada superficial de solo (0,0-0,2 m); ii: Após quatro anos de implantação do SAF, foram observadas alterações de curto prazo sobre os atributos da qualidade do solo, sendo a densidade do solo, a porosidade do solo e o carbono orgânico total os mais sensíveis aos manejos executados na linha e entrelinha do SAF.

Palavras-chave: agroecossistema, agroecologia, atributos físicos, sustentabilidade.

ABSTRACT

STÖCKER, Cristiane Mariliz. **Multipurpose agroforestry system and its impact on soil physical quality**. 2019. 83f. Thesis (Ph.D. in Agronomy) - Post Graduation Program in Family Farming Production Systems, Faculty of Agronomy "Eliseu Maciel", Federal University of Pelotas, Capão do Leão, Brazil, 2019.

Agroforestry systems (AF) are consortia of arable crops with tree species, being a viable and effective alternative to ensure sustainability, providing improvements in the conservation aspects of natural resources, especially soil. The objective of this study was to evaluate the ability of an agroforestry system to improve soil physico-hidric quality in a short period of time in the southern region of Rio Grande do Sul. The study was conducted in the Cascata Experimental Station, belonging to Embrapa Clima Temperado, in Pelotas, RS. The AF was deployed in the second half of 2013, in an Ultisol, with sandy loam textural class, located in a soft undulating landscape. The AF area (0.25 hectares) was composed of perennial biomass-producing tree species of wood and fruit (lines), which are interspersed. Already in the central range between the lines were seedlings of a perennial sub-shrub and a perennial grass, complemented with annual species of green summer and winter manures. Soil collections were carried out in 2015, 2016 and 2017, in the area of AF (AF-row and AF-interrow) and in an adjacent area representative of the natural condition of the soil. Soil samples with preserved and not preserved structure were collected in the layers 0.00-0.10; 0.10-0.20 and 0.20-0.40m for the determination of soil quality attributes. The results were submitted to variance analysis and for variables with significant effect (F test, 5% probability) the Tukey mean comparison test was applied at a significance level of 5% probability ($p < 0.05$). The results show that: i: although native forest soil has better physical and water quality, AF was efficient in terms of the performance of its indicators, highlighting the similarity between the carbon stocks of the AF area and native forest in the topsoil (0.0-0.2 m); ii: After four years of AF implementation, short-term changes in soil quality attributes were observed, with soil density, soil porosity and total organic carbon being the most sensitive to management performed in the line and between rows.

Keywords: agroecosystem, agroecology, physical attributes, sustainability.

Sumário

1 Introdução	14
2 Projeto de pesquisa	18
2.1 Antecedentes e justificativas	22
2.2 Hipótese	26
2.3 Objetivos	26
2.3.1 Objetivo geral	26
2.3.2 Objetivos específicos	26
2.4 Material e métodos	27
2.5 Resultados e impactos esperados	30
2.6 Cronograma do projeto	31
2.7 Recursos necessários	32
2.8 Referências bibliográficas	33
3 Relatório do trabalho de campo	38
4 Artigo 1: Alterações das propriedades físico-hídricas e do estoque de carbono de um perfil do solo de um sistema agroflorestal multipropósito	43
Introdução	44
Material e métodos	46
Resultados	48
Discussão	52
Conclusões	55
Referências	55
5 Artigo 2: Evolução da qualidade física do solo em sistema agroflorestal multipropósito	59
Introdução	60
Material e métodos	62
Área de estudo	62
Amostragem de solo e análises físicas e químicas	64
Análise estatística dos dados	65
Resultados e discussão	65
Conclusões	72
Referências	72
6 Considerações finais	81
7 Referências	82

Lista de Quadros

Quadro 1. Atividades da pesquisa no período compreendido entre março de 2016 a fevereiro de 2019.	31
Quadro 2. Discriminação dos recursos necessários para a execução do projeto de pesquisa.	32

Lista de Figuras

Figura 1. Vista aérea da área experimental com SAF's (área delimitada em vermelho) e área de mata nativa (delimitada em amarelo).	27
Figura 2. Croqui da área experimental implantada com sistemas agroflorestais.	28
Figura 3. Legenda das espécies arbóreas utilizadas na composição do sistema agroflorestal.....	28
Figura 4: Dados agroclimáticos da região de estudo.	46
Figura 5. Curvas de retenção de água em sistema agroflorestal (SAF) linha e entrelinha, e uma área adjacente de mata nativa em três camadas de solo....	50
Figura 6. Agregados estáveis em água (AEA) distribuídos em diferentes classes (mm) em um sistema agroflorestal (SAF), linha e entrelinha, e em uma área adjacente sob mata nativa, em três camadas de solo.....	51
Figura 7. Arranjo espacial de plantas arbóreas e culturas anuais na linha (Row) e entrelinhas (Inter-Row) no sistema agroflorestal.	64
Figura 8. Densidade do solo, porosidade do solo, macroporosidade e microporosidade do solo no SAF-L (respectivamente a, c, e, g) e no SAF-EL (respectivamente b, d, f, h) nos anos de 2015, 2016 e 2017. *Médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$); ns= não significativo.....	68
Figura 9. Teor de carbono orgânico total do solo no SAF linha (SAF-L) (a) e no SAF entrelinha (SAF-EL) (b) nos anos de 2015, 2016 e 2017.	69
Figura 10. Variações temporais de seis classes de agregados estáveis em água durante três anos de experimento em um sistema agroflorestal. Barras verticais significam o desvio padrão. Letras diferentes representam diferença significativa entre os valores médios (teste de Tukey, $P < 0,05$).	71

Lista de Tabelas

Tabela 1. Características químicas e granulométricas do solo do sistema agroflorestal (SAF) linha e entrelinha após dois anos de condução e uma área de mata nativa. .	46
Tabela 2. Atributos físicos do solo sob sistema agroflorestal (SAF) linha e entrelinha, e uma área adjacente com mata nativa em três camadas de solo.....	49
Tabela 3. Estoques de carbono do solo (ECS, Mg ha ⁻¹), sob mata nativa e sistema agroflorestal (SAF-L e SAF-EL) após dois anos de implantação.....	52
Tabela 4. Características químicas e granulométricas do solo sob sistema agroflorestal (linha e entrelinha) e mata nativa avaliados em 2017, nas camadas de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 m.	63
Tabela 5. Valores médios de densidade do solo (Ds), porosidade total (PT), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), diâmetro médio ponderado (DMP), e carbono orgânico total (COT) de um solo sob sistema agroflorestal e uma área de referência (mata), avaliados em 2017 nas camadas de 0,00-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m, após quatro anos de condução do experimento.....	66

1 Introdução

Práticas agrícolas adotadas pelo modelo convencional de agricultura, muitas vezes, ocasionam alterações da qualidade do solo (QS), resultando em limitações sobre as produtividades agrícolas. Neste sentido, faz-se necessário o uso e intensificação de práticas de manejo que aumentem a capacidade dos agroecossistemas em gerar rendimentos sustentáveis e conservar os recursos naturais.

Dentro deste cenário, uma das estratégias ao modelo convencional de agricultura são os sistemas agroflorestais (SAF's) que surgem como alternativa aos sistemas de produção convencionais. Estes sistemas têm se mostrado como alternativa viável para mitigar os danos causados pelas práticas agrícolas convencionais, recuperando e/ou mantendo a qualidade ambiental dos agroecossistemas, com alta estabilidade ecológica e que buscam manter o solo o mais próximo da condição natural (LU et al., 2015; TORRALBA et al., 2016; PAUL et al., 2017).

Os SAF's cada vez mais são reconhecidos como forma sustentável de uso do solo em paisagens multifuncionais (LASCO et al., 2014). As agroflorestas aumentam a capacidade dos agricultores para se adaptarem às mudanças climáticas devido aos múltiplos benefícios que oferecem, dentre os quais se inclui o fornecimento de alimentos e, conseqüentemente, segurança alimentar, renda complementar e serviços ambientais (SCHEMBERGUE et al., 2017).

Esses sistemas buscam um maior equilíbrio do ecossistema manejado através da diversificação de espécies cultivadas, onde componentes arbóreos são consorciados com culturas tradicionais e/ou animais, em uma forma de arranjo espacial ou sequência temporal, ocorrendo um melhor aproveitamento dos componentes do agroecossistema (ALTIERI, 2012).

As práticas agroflorestais podem retardar ou reverter a degradação do solo, aumentar sua fertilidade, sequestrar carbono e garantir subsistência por meio do fornecimento de benefícios ecológicos e econômicos (SCHEMBERGUE et al., 2017). Os SAF's, ao integrarem diferentes sistemas de produção como: grãos, fibras, carne,

leite e energia, permitem a diversificação das atividades econômicas na propriedade rural, aumentando o lucro por unidade de área e reduzindo os riscos com perdas causados por eventos climáticos adversos ou mesmo por condições imprevistas de mercado. Essas características explicam sua importância não só em termos de sustentabilidade agrícola, mas também nas questões relacionadas às mudanças climáticas (MBOW et al., 2014).

O Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura (Plano ABC) vem incentivando a utilização de SAF's. No entanto, apesar das potencialidades das agroflorestas, seja no potencial de conservação dos recursos naturais, seja no aumento de produtividade e geração de renda, a adoção destes sistemas ainda é muito incipiente no Brasil. De acordo com dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2017), estima-se que os SAF's ocupem em torno de 14 milhões de hectares no Brasil, aproximadamente 330 mil hectares no estado do Rio Grande do Sul (RS), 168 hectares no município de Pelotas.

Os SAF's podem combinar espécies perenes arbóreas (linhas de cultivo) com espécies anuais (entrelinhas) numa mesma área. Em termos ecológicos, o uso de espécies arbóreas nos SAF's permite a recuperação de áreas degradadas, por meio da redução do potencial erosivo e acúmulo de matéria orgânica (SCHEMBERGUE et al., 2017).

Quando conduzidos sob uma lógica agroecológica, os SAF's sobressaem qualquer modelo e sugerem sustentabilidade, por partirem de conceitos básicos fundamentais da agroecologia, aproveitando os conhecimentos e histórico do local em que está sendo implantado e projetando sistemas adaptados para o potencial natural do lugar (GÖTSCH, 1995). Diante disso, existem vários tipos de SAF's, cada um com suas particularidades, arranjos e consórcios de diferentes tipos de plantas, sendo sistemas específicos para uma determinada condição. A consorciação de várias espécies dentro de uma área aumenta a diversidade do ecossistema, em que as interações benéficas são aproveitadas entre as plantas de diferentes ciclos, portes e funções (FREITAS et al., 2012).

Os SAF's apresentam também potencial para reduzir a degradação do solo, favorecendo o equilíbrio entre o solo, a água, o ar, o microclima, a paisagem, a flora e a fauna (MACGRATH et al., 2000).

O solo é um recurso natural vivo e dinâmico, fundamental para a preservação ambiental, para a produção de alimentos e desde o início dos anos 90, vem sendo estudado de forma sistêmica e sua qualidade considerada como sendo um indicador da sustentabilidade do ambiente agrícola. Logo, o conceito mais simplificado para o termo QS foi formulado por Larson & Pierce (1991) como sendo “apto para o uso”.

A QS tem grande efeito na saúde e produtividade dos ecossistemas (naturais ou manejados) e está relacionada com a funcionalidade do sistema, bem como com a sua capacidade em sustentar a atividade biológica, manter a qualidade ambiental e promover o crescimento e a saúde das plantas e animais (DORAN; PARKIN, 1994).

A manutenção da QS ou mesmo a sua melhoria é fundamental para a sustentabilidade de agroecossistemas, visando a produção agrícola e a preservação ambiental (DORAN; JONES, 1996). O manejo adequado dos solos agrícolas é o principal fator a ser considerado quando se almeja a produção agrícola mais sustentável, uma vez que as práticas de preparo e os sistemas de cultivos interferem de modo significativo nas propriedades do solo (LISBOA et al., 2012).

Para o monitoramento e avaliação da QS, se faz necessário avaliar a capacidade do solo e o seu estado atual e ao longo do tempo, comparando com o solo sob condição natural (por exemplo uma área de mata nativa), ou então com parâmetros disponíveis na literatura que são considerados como ideais para cada tipo de solo (DORAN; PARKIN, 1994).

No que tange o uso de SAF's para manutenção ou para o incremento da QS, destaca-se a contribuição do sistema para a fixação de nitrogênio no solo, redução da erosão, diminuição das despesas decorrentes da necessidade de incorporação de fertilizantes, além da ciclagem de nutrientes e de matéria orgânica, otimizando o uso do espaço pelo sistema produtivo (SIMINSKI et al., 2016).

Acredita-se que pela adoção dos SAF's é possível reabilitar solos para aumentar a produção de alimentos. Diante disso, alguns trabalhos nacionais e internacionais evidenciam que os SAF's apresentam capacidade de aumentar ou manter a QS, seja ela, biológica, química, física e/ou hídrica.

Um dos destaques dos SAF's é a utilização do componente arbóreo no sistema de cultivo, pois este promove uma série de benefícios ao solo, destacando-se o sequestro do carbono, a reciclagem de nutrientes, a maior cobertura vegetal e por consequência, a redução da erosão do solo e o aumento da qualidade dos recursos

hídricos (ESCOBAR et al., 2002; LOVELL e SULLIVAN, 2006; NII-ANNANG et al., 2009; UDAWATTA et al., 2009; UDAWATTA et al., 2010; UDAWATTA et al., 2014; PAUDEL et al., 2011; CHERUBIN, 2018).

Considerando o aspecto promissor dos sistemas agroflorestais, este trabalho oportuniza a avaliação da capacidade de uso da linha e da entrelinha em um sistema agroflorestal (SAF-linha e SAF-entrelinha) pois inexistem estudos comparando estes dois manejos nas condições do estado do Rio Grande do Sul.

Assim, esta pesquisa parte das seguintes hipóteses: a) os manejos realizados no SAF contribuem para a manutenção e/ou melhoria da qualidade do solo; b) o período de avaliação é suficiente para detectar mudanças nos atributos de qualidade do solo.

Dentro deste contexto, este trabalho foi estruturado em dois artigos científicos. No primeiro artigo, avaliou-se como o SAF-linha e o SAF-entrelinha podem influenciar nos indicadores que permitem inferir sobre a qualidade físico-hídrica e os estoques de carbono do solo, após dois anos de condução do sistema agroflorestal. No segundo artigo, objetivou-se avaliar a capacidade de um sistema agroflorestal em melhorar a qualidade física do solo após quatro anos de condução do sistema agroflorestal e determinar o comportamento temporal destes atributos da qualidade física do solo.

2 Projeto de pesquisa

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
PPG em Sistemas de Produção Agrícola Familiar



Projeto de Tese

Os sistemas agroflorestais e a sua contribuição para a qualidade do solo

CRISTIANE MARILIZ STÖCKER

Pelotas, agosto de 2016

CRISTIANE MARILIZ STÖCKER

Engenheira Agrônoma

Os sistemas agroflorestais e a sua contribuição para a qualidade do solo

Projeto de Tese apresentado ao
Programa de Pós-Graduação em
Sistemas de Produção Agrícola
Familiar da Universidade Federal
de Pelotas.

Equipe:

Cristiane Mariliz Stöcker (Doutoranda)

Ana Cláudia R. de Lima (Orientadora)

Adilson Luís Bamberg (Coorientador)

Pelotas, agosto de 2016

RESUMO

Este projeto de tese é vinculado a um experimento com sistemas agroflorestais (SAF's), instalado na Estação Experimental Cascata – Embrapa Clima Temperado, Pelotas/RS. A pesquisa visa compreender a influência que estes sistemas exercem sobre a qualidade do solo, a partir da análise de indicadores físicos, químicos, biológicos e microbiológicos do solo. Serão realizadas coletas de amostras de solo na área, considerando as camadas superficiais do solo, o manejo realizado nas linhas e entre-linhas e a sua comparação com uma área adjacente mantida sob mata nativa. Como resultado, espera-se que esta pesquisa sirva de referência para outros trabalhos relacionados com SAF's e que se consiga estabelecer um conjunto de indicadores capazes de avaliar a qualidade de solos cultivados com SAF's.

Palavras-chave: agrofloresta; sistemas de produção; indicadores da qualidade do solo.

2.1 Antecedentes e justificativas

Recentemente, são impostos desafios para a agricultura em produzir alimentos de qualidade e em quantidade elevada, garantindo assim, a segurança alimentar. Práticas agrícolas adotadas pela agricultura tradicional muitas vezes ocasionam a diminuição da qualidade do solo (QS), resultando assim, em limitação da produtividade agrícola. Diante disso, verifica-se uma crescente busca por agroecossistemas capazes de conservar os recursos naturais, dentre estes, o solo (AGUIAR, 2008).

Nesse sentido, a alternativa mais apropriada é o uso de sistemas de produção que ocupem intensamente os recursos disponíveis nos agrossistemas, concomitante à melhoria da QS (BALBINOT JUNIOR et al., 2007).

O solo é um recurso natural fundamental para a preservação ambiental, e desde o início dos anos 90, vem sendo estudado de forma sistêmica e sua qualidade considerada como sendo um indicador da sustentabilidade do ambiente agrícola. Logo, o conceito mais simplificado para o termo QS foi formulado por Larson & Pierce (1991) como sendo “apto para ousar”.

No entanto, Doran; Parkin (1994) e Doran (1997) propuseram uma definição mais ampla para a QS: “capacidade de um solo funcionar dentro dos limites de um ecossistema natural ou manejado, para sustentar a produtividade de plantas e animais, manter ou aumentar a qualidade do ar e da água e promover a saúde das plantas, dos animais e dos homens”, sendo esta a mais citada e conhecida mundialmente.

A manutenção da QS ou mesmo a sua melhoria é fundamental para a sustentabilidade de agroecossistemas, visando a produção agrícola e a preservação ambiental (DORAN; JONES, 1996). O manejo adequado dos solos agrícolas é o principal fator a ser considerado quando se almeja a produção agrícola sustentável, uma vez que as práticas de preparo e os sistemas de cultivos interferem de modo significativo nas propriedades do solo (LISBOA et al., 2012) as quais compõem o tripé sobre o qual se assenta a QS (DORAN; JONES, 1996).

Neste sentido, a QS envolve uma combinação de indicadores de ordens químicas, físicas e biológicas que fornecem meios para o funcionamento do solo. No entanto, o monitoramento adequado da QS só poderá ser feito utilizando-se

indicadores os quais reflitam a capacidade de produção do solo e a sua sustentabilidade, além de detectarem alterações em função do manejo ao longo do tempo (AGUIAR, 2008; LARSON; PIERCE, 1994).

Para os autores Doran & Zeiss (2000) os indicadores de QS, para serem de utilidade prática, devem ser sensíveis às variações de manejo, correlacionar-se com as funções do solo, serem de fácil mensuração e de baixo custo e que possibilitem o entendimento dos processos do ecossistema e que sejam compreensíveis e úteis para o agricultor.

Neste contexto, o solo é um recurso essencial e responsável pelas boas produtividades do setor agropecuário, através da manutenção da qualidade do meio ambiente e, conseqüentemente, pela sanidade de plantas, animais e seres humanos (SHARMA et al., 2005). Assim, constata-se uma crescente busca por agroecossistemas que sejam capazes de conservar os recursos naturais, sendo o solo um destes.

Os sistemas agroflorestais (SAF's) são sistemas sustentáveis, que consistem no uso do solo numa combinação espacial ou sequencial de espécies lenhosas perenes, cultivadas em consórcio com espécies herbáceas (pastagens, culturas anuais) podendo-se utilizar animais nessa área, obtendo-se assim, benefícios das interações ecológicas e econômicas resultantes (MACDICKEN; VERGARA, 1990; YOUNG, 1989).

Os SAF's constituem uma alternativa de produção no setor agrícola familiar, no qual se busca minimizar o efeito da intervenção do homem na natureza, sendo definidos como uma forma de múltiplos cultivos compostos por espécies destinadas a produção agrícola (anual ou perene) e espécies arbóreas. A consorciação de várias espécies dentro de uma área aumenta a diversidade do ecossistema, em que as interações benéficas são aproveitadas entre as plantas de diferentes ciclos, portes e funções (FREITAS et al., 2012).

Além dos benefícios já citados, estes sistemas podem proporcionar maior cobertura do solo, favorecendo ainda a preservação da fauna e da flora, promovendo a ciclagem de nutrientes a partir da ação de sistemas radiculares diversos e proporcionando um contínuo aporte de matéria orgânica do solo (ARAÚJO et al., 2001; BREMAN e KESSLER, 1997; SANCHEZ, 2001; SCHROTH et al., 2002). Estes sistemas possibilitam, ainda, maior diversidade de produtos a serem explorados o que alivia a sazonalidade, fenômeno comum no setor agropecuário (IZAC e

SANCHEZ, 2001). Diante disso, os SAF's têm se mostrado uma alternativa viável para amenizar os danos causados pelas práticas agrícolas convencionais, recuperando e/ou mantendo a qualidade ambiental.

Ademais, os SAF's são utilizados na recuperação de áreas degradadas e tem apresentado resultados satisfatórios relacionados à melhoria das propriedades físico-químicas destes solos, assim como da atividade dos microorganismos, considerando o grande aporte de matéria orgânica (MENDONÇA, et al., 2001).

Baseado nisso, os SAF's possuem o potencial de recuperar e manter a QS porque, além de englobar em sua estrutura de desenho e manejo, práticas agroecológicas como cultivo múltiplo, cobertura morta, cultivo de cobertura, adubação verde, rotação de culturas, poda, capina seletiva e cultivo mínimo do solo, ainda incorporam o componente arbóreo no sistema, o qual confere diversos benefícios (FRANCO, 2007; MAY & TROVATTO, 2008).

Neste sentido, os SAF's são uma opção interessante e viável na escolha de modelos agrícolas pelo agricultor familiar, pois um dos componentes deste sistema é o componente arbóreo, o qual sempre teve um papel importante para a humanidade, tanto no fornecimento de produtos (madeira, mel, produtos medicinais), como de benefícios indiretos, o bem-estar e saúde pública, como sombra, regulação da umidade do ar, da temperatura e da poluição atmosférica, proteção dos solos e dos mananciais, bem como outros benefícios sociais, como turismo e educação ambiental (ABDO et al., 2008).

De acordo com os autores Hairiah et al. (2006); Jackson & Wallace (2000) e Jianbo (2006), um dos problemas enfrentados é a utilização inadequada do solo, principalmente por meio da adoção de práticas agrícolas convencionais, o qual tem ocasionado a degradação de suas propriedades físicas, químicas e biológicas, podendo resultar na queda da produtividade agrícola. Como exemplos dessa degradação têm-se a desestruturação e compactação, a redução da fertilidade, a oxidação acelerada da matéria orgânica e a diminuição da quantidade e diversidade de organismos do solo (LEITE et al., 2010; MOURA, 2004).

Apesar de existirem alguns trabalhos que tratem da qualidade física, química e/ou (micro) biológica em solos sob SAF's, ainda são raras as pesquisas que integram todos os indicadores da QS. Tais estudos são fundamentais para a compreensão da dinâmica do sistema solo-água-planta, pois remetem as condições ideais, para que o solo funcione de forma sistêmica e adequadamente.

Este funcionamento do solo depende da interação de processos químicos, físicos e biológicos, que mantêm um fluxo constante e uma natureza heterogênea (TÓTOLA; CHAER, 2002). Desta forma, inferir sobre QS de forma quantitativa torna-se uma tarefa difícil, no entanto, estimativas sobre a QS podem ser feitas levando-se em conta uma área considerada como referência (REICHERT et al., 2003).

Ribeiro (2014) realizou um estudo sobre indicadores microbiológicos da QS, em áreas de SAF's sob Latossolos e Gleissolos, onde comparou SAF's com vegetações nativas adjacentes e pôde verificar valores semelhantes destes indicadores entre os sistemas avaliados, o que indica que os SAF's estão mantendo a atividade biológica do solo, semelhantemente às áreas de vegetação nativa adjacentes.

Estudando os indicadores físicos, microbiológicos e conteúdo de carbono orgânico de dois SAF's em um Nitossolo Vermelho de textura argilosa, comparados a outros sistemas de produção (erval em sistema silvicultural e lavoura com soja), além de uma área de referência sob vegetação natural (mata), Pezarico et al. (2012) observaram que a diversidade de espécies dos SAF's contribuiu, de forma significativa, para a melhoria da QS, principalmente quando comparados aos sistemas conduzidos sob monocultivo.

Junqueira et al. (2012) realizou um estudo qualitativo com 10 agricultores de um assentamento (Sepé Tiaraju - Ribeirão Preto), onde avaliou os efeitos sobre o momento anterior ao uso dos SAF's e após a inserção de cultivo deste sistema. O estudo foi baseado no relato de agricultores frente à indicadores qualitativos da QS, e observaram que os SAF's contribuíram para a melhoria da QS após a sua inserção.

Iwata et al. (2012), visando quantificar os efeitos da adoção de SAF's sobre os atributos químicos de um Argissolo Vermelho-Amarelo em áreas agrícolas no bioma Cerrado - estado do Piauí, puderam concluir que estes sistemas promovem a melhoria química do solo.

Com relação ao estudo de indicadores físicos e químicos da QS em SAF's e em pastagem degradada, em um Neossolo Quartzarênico, Mendes et al. (2011) verificaram que a adoção do sistema melhorou as condições de agregação, quando comparada ao uso do solo por pastagem degradada.

Neste mesmo sentido, Aguiar (2008) estudando a qualidade física dos solos sob cultivo de SAF's em um Latossolo Vermelho-amarelo, de textura argilosa, evidenciou o potencial do uso destes sistemas em conservar mais a estrutura do solo

quando comparados aos sistemas convencionais comumente utilizados nas duas regiões estudadas.

Entretanto, como foi observado acima, estudos que avaliem o impacto dos SAF's sobre indicadores físicos, químicos, biológicos e microbiológicos do solo, de forma integrada e dinâmica ainda são escassos. Desta forma, este projeto de tese se materializa, através de uma parceria entre a UFPel-FAEM-SPAF e a Embrapa Clima Temperado - Estação Experimental Cascata, que conta com um experimento implantado para avaliar uma proposta de modelo de SAF's.

Este projeto de tese irá contribuir para o entendimento da dinâmica da QS em SAF's adotados na região Sul do Rio Grande do Sul. Sendo assim, o problema de pesquisa se assenta no entendimento da dinâmica dos SAF's e qual a sua contribuição na QS.

2.2 Hipótese

Os sistemas agroflorestais contribuem para a manutenção e/ou melhoria da qualidade do solo.

2.3 Objetivos

2.3.1 Objetivo geral

Avaliar o impacto dos sistemas agroflorestais sobre indicadores da qualidade do solo.

2.3.2 Objetivos específicos

a) Avaliar as alterações nos atributos químicos, físicos, biológicos e microbiológicos do solo.

b) Identificar limitações e/ou potencialidades do solo decorrente do seu uso continuado sob sistemas agroflorestais.

2.4 Material e métodos

O projeto será desenvolvido em uma área experimental conduzida com sistemas agroflorestais localizada na Estação Experimental Cascata - Embrapa Clima Temperado, Pelotas/RS (Figura 1).



Figura 1. Vista aérea da área experimental com SAF's (área delimitada em vermelho) e área de mata nativa (delimitada em amarelo).

A área experimental foi instalada no segundo semestre de 2013, sendo que estava em pousio há quatro anos. Anteriormente, esta área abrigava um pomar comercial de frutíferas. A área experimental é de 55mX45m, totalizando 2.475 m², aproximadamente 0,25 hectares.

O número de cultivos arbóreos perenes é de 16 plantas, sendo 5m entre espécies chaves e 1,5m entre as demais árvores. Nas entrelinhas é semeado um coquetel de plantas de cobertura para a produção de biomassa vegetal, posteriormente depositada nas linhas.

O modelo do sistema agroflorestal proposto pela unidade experimental pode ser visualizado na Figura 2. A legenda com as respectivas espécies utilizadas para a composição do SAF pode ser observada na Figura 3.

Como sistema de referência será avaliada uma área mantida sob mata nativa, adjacente ao experimento, com condições edafoclimáticas semelhantes ao ambiente do SAF. As avaliações serão executadas em três momentos: sendo a primeira na primavera do ano de 2015 e a segunda na primavera do ano 2016 e a terceira na primavera de 2017, para poder observar a evolução da QS neste sistema de cultivo.



Figura 2. Croqui da área experimental implantada com sistemas agroflorestais.

Legenda:	
TUT	– Tremá; Uva do Japão; Timbaúva
TC²T	– Tremá; Canafístula; Timbaúva
TCT	– Tremá; Cedro; Timbaúva
TTT	– Tremá; Tarumã de espinho; Timbaúva
TPT	– Tremá; Pêssego do mato; Timbaúva
GAB	– Goiaba; Açoiça Cavalo; Butiá
GGB	– Goiaba; Guajuvira; Butiá
GLB	– Goiaba; Louro pardo; Butiá
1	– Pecaneira Cv. Shawnee
2	– Pecaneira Cv. Barton
3	– Pecaneira Cv. Desirable
4	– Pecaneira Cv. Cape fear
☆	– Laranja de umbigo Cv. Salustiana
☆	– Laranja de umbigo Cv. Navelina
○	– Tangerina Cv. Satsuma
☆	– Tangerina Cv. Ortanique Okitsu
□	– Caqui Fuyu
□	– Caqui Kioto
□	– Produção de biomassa

Figura 3. Legenda das espécies arbóreas utilizadas na composição do sistema agroflorestal.

Em cada sistema serão coletadas, em triplicata, amostras deformadas e indeformadas de solo nas linhas e nas entrelinhas de plantio do sistema, nas camadas de 0-10cm, de 10-20cm e de 20-40cm. As amostras indeformadas de solo serão coletadas com o auxílio de anéis volumétricos para a determinação da densidade e porosidade (macro e microporosidade) do solo, conforme descrito em Embrapa (2011). A curva de retenção de água em solo será determinada pelo método da mesa de tensão para baixas tensões (1 e 6 kPa) conforme Klute, (1986), e combinado com o método da câmara de Richards para altas tensões (10, 33 e 100 kPa) conforme Richards; Fireman, (1943). A fim de obter tensões maiores do que 300 kPa será utilizado psicrômetro (WP4) em amostras com estrutura deformada por meio do processo de umedecimento.

As amostras deformadas de solo serão coletadas com o auxílio de pá de corte, acondicionadas em sacos plásticos e encaminhadas ao laboratório de solos da Embrapa Clima Temperado, onde serão destorroadas manualmente e secas à sombra até atingirem o ponto de friabilidade. Uma parte das amostras será peneirada em malha de 9,52mm e utilizada para a determinação dos agregados estáveis em água e do diâmetro médio ponderado, de acordo com Kemper & Rosenau (1986) e Palmeira et al. (1999).

Outra parte das amostras será peneirada em malha de 2mm e utilizada para a determinação do carbono orgânico total, nitrogênio total, fracionamento físico granulométrico da matéria orgânica e análise química do solo (macro e micronutrientes). O fracionamento físico granulométrico da matéria orgânica será realizado conforme Cambardella; Elliott (1992). O carbono orgânico total, nitrogênio total e carbono da fração grosseira, serão determinados por oxidação a seco em um analisador elementar CHNS, sendo os resultados expressos em estoque de carbono (Mg ha^{-1}), obtido pela relação massa/volume, por meio de correção pela densidade do solo.

A análise química, também através de amostras deformadas, conterá pH em água, índice SMP, teores de fósforo disponível, potássio extraível, cálcio, magnésio e alumínio trocáveis, capacidade de troca de cátions e saturação de bases e de alumínio, e micronutrientes como boro, cobre, zinco, manganês e ferro, seguindo métodos descritos em Tedesco et al. (1995).

A mesofauna edáfica será coletada com auxílio de anéis volumétricos de aproximadamente 358 cm³, e posteriormente colocada em um equipamento de Berlese-Tüllgren, de acordo com método proposto por Bachelier (1978).

Para a coleta de minhocas, serão amostrados monólitos de solo (0,20m x 20m) nas três profundidades estudadas. Cada volume de solo será analisado em uma bandeja de plástico, onde serão realizadas as contagens diretas dos indivíduos no campo. Os dados de número de indivíduos serão transformados de 0,04m² (0,20m x 0,20m), para 1m². O procedimento de coleta e a determinação do número de indivíduos deste organismo, por metro quadrado, seguirá o método descrito em USDA (2001).

A respiração basal do solo (RBS) será determinada de acordo com o método descrito por Jenkinson; Powlson (1976), e será calculada segundo Hungria et al. (2009). O carbono da biomassa microbiana do solo (CBM) será obtido pelo método da irradiação-extração conforme método descrito em Mendonça; Matos (2005).

Os dados das variáveis serão analisados através de análise de variância e a comparação entre as médias será realizada pelo teste de comparação de médias com 5% de probabilidade de erro. Adicionalmente, para complementar a pesquisa, será realizada a análise multivariada dos dados.

2.5 Resultados e impactos esperados

Espera-se que este trabalho de pesquisa sirva de referência para outros trabalhos relacionados com SAF's e que se consiga estabelecer um conjunto de indicadores capaz de verificar se os SAF's são capazes de alterar e ou/ manter a QS. E, fundamentalmente, propor alguma alternativa ao agricultor sobre qual SAF estudado poderá contribuir na qualidade do seu solo.

Os resultados deste estudo serão divulgados em anais de congressos, reuniões técnicas, boletins de pesquisa, circulares técnicas e periódicos científicos.

2.7 Recursos necessários

No quadro 2 estão apresentados os recursos que serão necessários para o desenvolvimento do projeto.

Quadro 2. Discriminação dos recursos necessários para a execução do projeto de pesquisa.

Discriminação do item	Valor unitário (R\$)	Quantidade	Valor Total (R\$)
Materiais para consumo			
Reagentes e auxiliares	3.000,00	1	3.000,00
Sacos, baldes plásticos, atilhos e etiquetas	10,00	200	2.000,00
Combustível	4,10	200 L	820,00
Folhas A4, Cartuchos, DVDs	100,00	5	500,00
Material Permanente			
Trado	200,00	1	200,00
Pá de corte	25,00	1	25,00
Enxada	25,00	1	25,00
Custeio			
Análise de fertilidade do solo	35,00	156	5460,00
Análise de carbono e nitrogênio	25,00	156	3900,00
Diárias (congressos, reuniões, dias de campo)	600,00	3	1800,00
Manutenção de equipamentos	1.000,00	1	1.000,00
Taxa de inscrição em eventos científicos	600,00	2	1200,00
Material bibliográfico	100,00	3	300,00
Imprevistos	10%	-	2023,00
Total			22.253,00

2.8 Referências bibliográficas

ABDO, M. T. V. N.; VALERI, S. V.; MARTINS, A. L. M. Sistemas agroflorestais agricultura familiar: uma parceria interessante. **Revista Tecnologia e Inovação Agropecuária**, v. 1, n. 2, p. 50-59, 2008.

AGUIAR, M. I. de. **Qualidade física do solo em sistemas agroflorestais**. 2008. 91 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Programa de Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

ARAÚJO, G. G. L.; ALBUQUERQUE, S. G.; GUIMARÃES FILHO, C. Opções no uso de forrageiras arbustivo-arbóreas na alimentação animal no semiárido do Nordeste. In: CARVALHO, M. M.; ALVIM, M.; CARNEIRO, J. C. **Sistemas agroflorestais pecuários: opções de sustentabilidade para áreas tropicais e subtropicais**. Juiz de Fora, Embrapa Gado e Leite, p. 111-137, 2001.

BACHELIER, G. **La faune des sols, son écologie et son action**. Paris: Orstom, 1978. 391 p.

BALBINOT JUNIOR, A. **A Uso do solo no inverno: propriedades do solo, incidência de plantas daninhas e desempenho da cultura de milho**. 2007. 150f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) –Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2007.

BREMAN, H.; KESSLER, J. J. The potential benefits of agroforestry in the Sahel and other semi-arid regions. **European Journal of Agronomy**, v. 7, p. 25-33, 1997.

CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, n.56, p.777-783, 1992.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. **Defining and assessing soil quality**. In: Doran, J. W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. (Eds.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: Soil Science Society of America, 1994, p. 1-20.

DORAN, J. W.; JONES, A. J. **Methods for assessing soil quality**. Madison, SSSA, 1996. 411p. (SSSA Special Publication, 49).

DORAN, J. W. **Soil quality and sustainability**. In: XXVI Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, CD Rom. Rio de Janeiro, SBCS, 1997.

DORAN, J. W.; ZEISS, M. R. **Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality**. *Applied Soil Ecology*, 15: 3-11, 2000.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, EMBRAPA. Centro Nacional de pesquisa de Solo. **Manual de métodos de análise de solos**. 2.ed., Rio de Janeiro, 225p. 2011.

FRANCO, F. S. et al. Sistemas Agroflorestais: **Princípios e Aplicações para a Agricultura Familiar em Botucatu**. Botucatu: CNPQ, 2007.

FREITAS, D. A. F. de et al. Índices de qualidade do solo sob diferentes sistemas de uso e manejo florestal e cerrado nativo adjacente. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 43, n. 3, p.417-428, 2012.

HAIRIAH, K.; SULISTYANI, H.; SUPRAYOGO, D.; WIDIANTO; PURNOMOSIDHI, P.; WIDODO, R. H.; NOORDWIJK, M. V. Litter layer residence time in forest and coffee agroforestry systems in Sumberjaya, West Lampung. **Forest Ecology and Management**, v.224, p.45-57, 2006.

HUNGRIA, M.; FRANCHINI, J. C.; BRANDÃO JUNIOR, O.; KASCHUK, G.; SOUZA, R. A. Soil microbial activity and crop sustainability in a long-term experiment with three soil tillage and two crop-rotation systems. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v.42, n.3, p.288-296,2009.

IZAC, A. M. N.; SANCHEZ, P. A. Towards a natural resource management paradigm for international agriculture: the example of agroforestry research. **Agricultural Systems**, v. 69, p. 5-25, jul./ago.2001.

IWATA, B. de F.; LEITE, L. F. C.; ARAÚJO, A. S. F.; NUNES, L. A. P. L.; GEHRING, C.; CAMPOS, LILIANE P. Sistemas agroflorestais e seus efeitos sobre os atributos químicos em Argissolo Vermelho-Amarelo do Cerrado piauiense. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 7, p.730-738, abr. 2012.

JAKSON, N. A.; WALLACE, C. K. Tree pruning as means of controlling water use in agroforestry system in Kenya. **Forest Ecology and Management**, v. 126, p.133-148, feb. 2000.

JENKINSON, D. S.; POWLSON, D. S. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil—V. A method for measuring soil biomass. **Soil & Biology Biochemistry**, Oxford, v.8, n.3, p.209-213, 1976.

JIANBO, L. Energy and economic benefits of two agroforestry systems in northern and southern China. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.116, p.255-262, 2006.

JUNQUEIRA, A. da C.; SCHLINDWEIN, M. N.; CANUTO, J. C.; NOBRE, H. G.; SOUZA, T. de J. M. Sistemas agroflorestais e mudanças na qualidade do solo em assentamento de reforma agrária. **Revista Brasileira de Agroecologia**, Associação Brasileira de Agroecologia, v. 8, n. 1, p.102-115, out. 2012.

KEMPER, W. D.; ROSENAU, R. C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A. (Org.). **Methods of soil analysis**. 2ed. Madison: American Society of Agronomy: Soil Science Society of America, 1986. p. 425-442.

KLUTE, A. **Water retention: Laboratory methods**. In: KLUTE, A. ed. Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy; Soil Science Society of America, 1986. p.635- 660.

LARSON, W. E.; PIERCE, F. J. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D.F.; STEWART, B. A. (Org.) **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: SSSA, 1994. p. 37-51.

LARSON, W.E.; PIERCE, F.J. Conservation and enhancement of soil quality. In: **Evaluation on for Sustainable Land Management in the Developing World**. ISBRAM Proc., v.2, n.12 Soil Research and Management, Bangkok, Tailândia.1991.

LEITE, L. F. C.; Oliveira, F. C.; Araujo, A. S. F.; Galvão, S. R. S.; Lemos, J. O; Silva, E. F. L. Soil organic carbon and biological indicators in an Acrisol under tillage systems and organic management in north-eastern Brazil. **Australian Journal of Soil Research**, v. 48, p. 258-265, 2010.

LISBOA, B. B.; VARGAS, L. K.; SILVEIRA, A. O.; MARTINS, A. F.; SELBACH, P. A. Indicadores Microbianos de Qualidade do Solo em Diferentes Sistemas de Manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 1, p.45-55, 2012.

MACDICKEN, K.G.; VERGARA, N. T. (Ed.). **Agroforestry, classification and management**. New York: John Wiley, 1990. 382 p.

MAY, P. H.; TROVATTO, C. M. M. (Coord.) **Manual Agroflorestal para a Mata Atlântica**. Brasília: Ministério do Desenvolvimento Agrário – MDA, 2008.

MENDES, L. B.; KHAICO, HE. M.; RAFAEL, P. G.; GUSTAVO, Q. E. A.; IDELFONSO, C. F.; VLADIA, C. Avaliação de indicadores de qualidade do solo em sistema agroflorestal e em pastagem degradada. In: XIX SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UFG - PIVIC, 19., 2011, Goiânia. **Anais** Goiânia: XIX Seminário de Iniciação Científica da UFG -Pivic, 2011. p. 1 - 12. Disponível em: <<http://www.sbpcnet.org.br/livro/63ra/conpeex/pivic/trabalhos/LEONA000.PDF>>. Acesso em: 27 abr. 2016

MENDONÇA, E. S.; LEITE, L. F. C.; FERREIRA NETO, P. S. Cultivo de café em sistema agroflorestal: uma opção para recuperação de solos degradados. **Revista Árvore**, v. 25, n. 3, p. 375-383, 2001.

MENDONÇA, E. S.; MATOS, E. S. **Matéria Orgânica do Solo: métodos de análises**. Viçosa: UFV, 2005.107 p.

MOURA, E. G. Agroambientes de transição avaliados numa perspectiva da agricultura familiar. In: Moura, E. G. (Ed.). **Agroambientes de transição entre o trópico úmido e o semiárido do Brasil**. São Luís: UEMA, 2004. cap. 1, p. 15-51.

PALMEIRA, P. R. T., PAULETTO, E. A., TEIXEIRA C. F. A.; GOMES A. S.; SILVA J.B.; Agregação de um Planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n.2, p. 189-195, 1999.

PEZARICO, C. R.; VITORINO, A. C. T.; MAECANTE, F. M.; DANIEL, O. Indicadores de qualidade do solo em sistemas agroflorestais. **Revista Ciência Agrária**, Editora da Universidade Federal Rural de Pernambuco, v. 56, n. 1, p.40-47, dez. 2012.

RICHARDS, L. A.; FIREMAN, M. Pressure plate apparatus for measuring moisture sorption and transmission by soils. **Soil Science**, Baltimore, v. 56, p. 395-404, 1943.

REICHERT, J. M; REINERT D. J. BRAIDA, J. A. Manejo, qualidade do solo e sustentabilidade: condições físicas do solo agrícola. **CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO**, 29, 2003, Ribeirão Preto. Palestras. Ribeirão Preto: SBCS, 2003 (CD-ROM).

RIBEIRO, J. M. **Atributos químicos e microbiológicos do solo em sistemas agroflorestais do norte de minas gerais**. 2014. 89 f. Dissertação (Mestrado em

Produção Vegetal) - Curso de Produção Vegetal, Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Minas Gerais, Montes Claros, 2014.

SÁNCHEZ, M. D. Panorama dos sistemas agroflorestais pecuários na América Latina. In: CARVALHO, M. M.; ALVIM, M. J.; CARNEIRO, J. C. Sistemas agroflorestais pecuários: opções de sustentabilidade para áreas tropicais e subtropicais. **Embrapa Gado de Leite**, Juiz de Fora: 2001. p. 9-17.

SCHROTH, G.; D'ANGELO, S. A.; TEIXEIRA, W. G.; HAAG, D.; LIEBEREI, R. Conversion of secondary forest into agroforestry and monoculture plantations in Amazônia: consequences for biomass, litter and soil carbon stocks after 7 years. **Forestry Ecology and Management**, v. 163, p. 131-150, 2002.

SHARMA, K. L.; Mandal, U. K.; Srinivas, K.; Vittal, K. P. R.; Mandal, B.; Grace, J. K.; Ramesh, V. Long-term soil management effects on crop yields and soil quality in a dryland Alfisol. **Soil & Tillage Research**, v.83, p.246-259, 2005.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, G.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre: Departamento de Solos – UFRGS, 1995. 174p.

TÓTOLA, M. R.; CHAER, G. M. Microrganismos e processos microbiológicos como indicadores da qualidade dos solos. **Tópicos em Ciências do Solo**, Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, v.2, p.195-276, 2002.

USDA – United States Department of Agriculture. **Soil Quality Test Kit Guide**. USA: USDA, 2001. 82p. Disponível em: http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_051290.pdf . Acesso em: 17 maio. 2016.

YOUNG, A. **Agroforestry for soil conservation**. Wallingford: CAB International, 1989. 276p.

3 Relatório do trabalho de campo

Relatório do trabalho de campo

Durante a execução do trabalho de campo, foram realizadas três coletas de solo na área do sistema agroflorestal (SAF), o qual está localizado na área experimental da Embrapa Clima Temperado, Estação Experimental Cascata, Pelotas/RS cujas coordenadas geográficas são: 31°37'14,16" S e 52°31'41,49"W. O SAF compreende um experimento que faz parte de um projeto da Embrapa Clima Temperado cujo título é: Construção participativa de sistemas agroflorestais sucessionais no Território da Serra dos Tapes, RS II. Este projeto foi contemplado na Chamada 07/2014 - Prioridades do *Portfolio* Sistemas de Base Ecológica (2014-2015).

A primeira coleta foi realizada no ano de 2015, no final do mês de novembro; a segunda coleta no início de novembro de 2016 e a terceira e última coleta de solo foi realizada no final de novembro de 2017, compondo desta forma, três coletas em anos distintos, para observar a evolução da qualidade do solo (QS) neste sistema de cultivo. A área do SAF foi dividida em três estratos, conforme a topossequência do local em: terço superior, terço médio e terço inferior. Em cada terço foram coletadas amostras de solo em quatro pontos distintos, na linha de cultivo do SAF, ou seja, onde estão as plantas arbóreas, considerado neste trabalho como SAF-linha, e nas entrelinhas do SAF, onde estão as plantas de cobertura, considerado neste trabalho como, SAF-entrelinha.

Os indicadores de qualidade física do solo foram definidos através do conhecimento acadêmico (revisão bibliográfica) e também por serem considerados atributos estratégicos da QS. Estes indicadores foram escolhidos por serem de fácil avaliação, possuir capacidade de interação, adequação ao nível de análise da pesquisa, sensibilidade às variações de manejo e clima além da possibilidade de medições por métodos quantitativos e/ou qualitativos.

Em síntese, os indicadores da QS devem integrar os efeitos combinados de diversos parâmetros ou processos do solo, os quais devem ser precisos, simples para o uso, sensíveis e terem sentido, ou seja, devem estar associados à função para a qual se pretende usar o solo.

O experimento foi instalado no segundo semestre de 2013, em uma área de relevo suave ondulado, sendo o solo da área classificado como um Argissolo, com classe textural Franco Arenosa. Anteriormente a instalação do SAF, a área estava em pousio há aproximadamente quatro anos, com cobertura vegetal espontânea em estágio de regeneração secundária, onde havia a presença de algumas espécies arbustivas, além de gramíneas, principalmente *Cynodon dactylon* (grama seda), no estrato baixo. Para a implantação do SAF a área foi roçada, lavrada e gradeada com um trator e após foi semeado aveia preta (*Avena sativa*) e ervilhaca (*Vicia* sp). Para a implantação das arbóreas, foi realizada a roçada da aveia e da ervilhaca nas linhas, e preparadas as caseiras (covas) para o plantio das arbóreas. Em cada caseira foi aplicado 200g de esterco de peru peletizado e 200g de fosfato natural.

O SAF implantado possui nove linhas equidistantes, com 5m de espaçamento, sendo 5 linhas formadas com pecaneiras, espécies arbóreas produtoras de biomassa (*Trema micranta* e *Enterolobium contortisiliquum*), de interesse madeireiro (*Hovenia dulcis*; *Peltophorum dubium*; *Cedrella fissilis*; *Citharexylum montevidense*; *Hexachlamys edulis*; *Luehea divaricata*; *Patagonula americana*; *Cordia trichotoma*) e de frutíferas (*Carya illinoensis*, *Citrus reticulata*, *Diospyros kaki*, *Citrus sinensis*, *Butia odorata* e *Psidium guajava*) de forma que, no intervalo de 10m entre as pecaneiras foram implantadas tangerineiras e caquizeiros, intercaladas a cada 5m.

As outras 4 linhas foram intercaladas como as descritas acima, sendo formadas por laranjeiras na posição das pecaneiras, formando-se intervalos de 10m. No intervalo entre as laranjeiras, foram plantados caquizeiros e tangerineiras alternadamente ao longo da linha.

Na faixa central das entrelinhas foram implantadas duas espécies perenes (*Tithonia diversifolia* e *Penisetum purpureum*) com o propósito de produção de biomassa para restauração da fertilidade natural do solo. A área restante das entrelinhas foi cultivada com espécies de adubos verdes de verão e adubos verdes de inverno, de acordo com a estação. Durante o período experimental, toda a biomassa resultante da entrelinha foi movimentada para as linhas das árvores.

As coletas de solo foram realizadas no SAF (linha e entrelinha) além de uma área adjacente ao SAF. Esta área adjacente é uma área mantida sob mata nativa, com condições edafoclimáticas semelhantes ao ambiente do SAF.

As coletas de solo e determinações dos atributos de qualidade física do solo foram semelhantes nos três anos de coleta. Para tanto, em cada uma das áreas (SAF-

linha, SAF-entrelinha e mata nativa) foram coletadas amostras deformadas e indeformadas de solo nas camadas de 0,00-0,10m, de 0,10-0,20m e de 0,20-0,40m, em cada terço da topossequência.

As amostras indeformadas foram coletadas com o auxílio de anéis volumétricos para a determinação da densidade, porosidade (macro e microporosidade e porosidade total) e curva de retenção de água do solo. A densidade e a porosidade total foram determinadas conforme descrito em Embrapa (2011).

A curva de retenção de água no solo foi determinada pelo método da mesa de tensão para baixas tensões (1 e 6 kPa) conforme Klute (1986), combinado com o método da câmara de Richards para médias tensões (10, 33 e 100 kPa) conforme Richards e Fireman (1943). Para tensões maiores do que 300 kPa foi utilizado um psicrômetro (WP4c Dew Point Potential Meter) em amostras com estrutura deformada por meio do processo de umedecimento.

As amostras deformadas foram coletadas com o auxílio de pá de corte, acondicionadas em sacos plásticos e conduzidas ao laboratório de Física do Solo da Embrapa Clima Temperado, onde foram destorroadas manualmente e secas à sombra até atingirem o ponto de friabilidade. Uma parte das amostras foi peneirada em malha de 9,52mm e utilizada para a determinação dos agregados estáveis em água e do diâmetro médio ponderado, de acordo com Kemper e Rosenau (1986) e Palmeira et al. (1999). Outra parte das amostras foi peneirada em malha de 2mm e utilizada para a determinação do carbono orgânico total, nitrogênio total, fracionamento físico granulométrico da matéria orgânica e análise química do solo (macro e micronutrientes). O fracionamento físico granulométrico da matéria orgânica foi determinado conforme orientação de Cambardella & Elliott (1992). O carbono orgânico total, nitrogênio total e carbono da fração grosseira foram determinados por oxidação a seco em um analisador elementar CHN-S, no laboratório da central analítica da EMBRAPA Clima Temperado.

Os atributos químicos do solo como: potencial hidrogeniônico (pH), matéria orgânica (MO), capacidade de troca de cátions (CTC), macronutrientes como: cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K), fósforo (P), e alumínio (Al); micronutrientes como: boro (B), ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn) e cobre (Cu) foram determinados segundo metodologia descrita em Tedesco et al. (1995). Estas análises foram realizadas no laboratório de Fertilidade do Solo da Embrapa Clima Temperado.

A mesofauna edáfica do solo foi coletada com auxílio de anéis volumétricos de aproximadamente 424cm³, e posteriormente este volume de solo foi colocado em um funil Berlese -Tüllgren, de acordo com método proposto por Bachelier (1978). Para a coleta de minhocas, foram amostrados monólitos de solo (0,20m x 0,20m) nas três camadas estudadas. Cada monólito de solo foi analisado em uma bandeja de plástico, onde foram realizadas as contagens diretas dos indivíduos no campo. Os dados de número de indivíduos foram transformados de 0,04m² (0,20m x 0,20m), para 1m². O procedimento de coleta e a determinação do número de indivíduos deste organismo, por metro quadrado, seguiu o método descrito em USDA (2001).

Para a determinação do carbono da biomassa microbiana do solo (CBM) foi utilizado o método de irradiação-extração, conforme método descrito em Mendonça e Matos (2005). As análises de solo foram realizadas nos laboratórios de física do solo, fertilidade do solo e biologia do solo.

4 Artigo 1: Alterações das propriedades físico-hídricas e do estoque de carbono de um perfil de solo de um sistema agroflorestal multipropósito
(Segundo Normas da Revista Journal of Forest Science)

Alterações das propriedades físico-hídricas e do estoque de carbono de um perfil de solo de um sistema agroflorestal multipropósito

Resumo

O objetivo deste trabalho foi avaliar as contribuições de um sistema agroflorestal (SAF) multipropósito para a qualidade físico-hídrica do solo e os estoques de carbono do solo. Os efeitos do SAF foram comparados com uma área sob mata nativa (referência), adjacente à área do SAF. Foram abertas trincheiras no solo do SAF (SAF-L e SAF-EL) e na mata nativa, onde amostras de solo com estrutura preservada e não preservada foram coletadas nas camadas de 0,0-0,1 m; 0,1-0,2 e 0,2-0,4 m no ano de 2015, compreendendo dois anos após a instalação do SAF. Foram determinados os atributos físicos-hídricos e os estoques de carbono no solo, permitindo inferir que, apesar do solo da mata nativa apresentar melhor qualidade físico-hídrica, o do SAF foi eficiente quanto ao desempenho de seus indicadores, destacando-se a semelhança entre os estoques de carbono do solo da área do SAF e da mata nativa na camada superficial de solo (0,0-0,2 m).

Palavras chave: qualidade física do solo; agrossilvicultura; agricultura familiar.

Introdução

As práticas agrícolas convencionais geralmente causam perdas na qualidade do solo (QS), resultando em declínio a longo prazo da produtividade das culturas. Considerando a capacidade de determinados sistemas de cultivo em conservar recursos naturais e sustentar a produção agrícola, os sistemas agroflorestais (SAFs) têm sido propostos e utilizados como uma alternativa viável para restaurar e/ou manter a qualidade ambiental e a sustentabilidade econômica dos agroecossistemas (LU et al. 2015; PAUL et al., 2017). Os SAFs têm sido amplamente utilizados no mundo, com o cultivo simultâneo de árvores, espécies agrícolas e/ou animais, e ao fornecer interações ecológicas benéficas, o SAF através da grande quantidade de biomassa favorece o acúmulo de carbono no solo (SCHEMBERGUE et al. 2017).

Estudos apontam que os SAFs são capazes de restaurar as funções ecológicas e ao mesmo tempo gerar renda com produtos agrícolas e manter a QS nessas áreas (SIMINSKI et al. 2016; COULIBALY et al. 2017; WALDRON et al. 2017).

A diversidade de espécies utilizadas nos SAFs com diferentes ciclos, portes e funções proporcionam alterações benéficas aos atributos físico-hídricos do solo (SILVA et al., 2011). Minimizam as alterações na estrutura do solo, promovem um sistema físico-hídrico favorável

à infiltração, capacidade de retenção e disponibilidade de água, incremento em carbono orgânico do solo, diminuição da densidade do solo e aumento da porosidade do solo, além de facilitar o crescimento e o desenvolvimento do sistema radicular das plantas (PEZARICO et al. 2013; UDAWATTA et al. 2014; ZHU et al. 2019).

Estes sistemas conservacionistas de uso do solo, além dos benefícios para a restauração da QS, possibilitam também, empregar estratégias sustentáveis de intensificação, para aumentar a produtividade e a rentabilidade da produção de alimentos, garantindo a resiliência ecológica dos agroecossistemas (FOLKE et al. 2010; PRETTY; BHARUCHA, 2014).

De acordo com o USDA, a QS é "a capacidade continua do solo em funcionar como um ecossistema vivo, a qual sustenta plantas, animais e seres humanos" (USDA-NRCS 2019). Para se obter informações da magnitude dos benefícios dos SAFs para a qualidade física do solo, torna-se necessário o uso de indicadores de QS, dentre os quais, destacam-se os indicadores físico-hídricos (densidade do solo, porosidade do solo, diâmetro médio ponderado, estabilidade de agregados, curva de retenção de água, capacidade de campo, ponto de murcha permanente), os quais são indicadores fundamentais à compreensão dos processos de degradação-recuperação, além dos estoques de carbono no solo, pois estão relacionados às funções ecológicas do solo e com os atributos químicos e biológicos do solo (BARBOSA et al. 2017; MASCARENHAS et al. 2017).

A QS pode ser avaliada e monitorada por vários indicadores, considerados como ferramentas que permitem o diagnóstico do estado atual do solo e, quando avaliados ao longo do tempo, podem prever as consequências das práticas culturais adotadas no cenário de médio e longo prazo. Indicadores como densidade do solo, teor carbono orgânico total e estabilidade de agregados podem demonstrar com sensibilidade e precisão como o uso e o manejo do SAF interferem na QS (MOTA et al., 2013). Deste modo, podem ser utilizados como fonte para a interpretação da dinâmica de processos físicos do solo. Portanto, existe uma oportunidade de aprimorar o conhecimento sobre as estratégias de manejo agroflorestal, especialmente no que diz respeito às consequências do manejo mais apropriado de resíduos na superfície do solo que proporcionaria o melhor potencial do SAF para a melhoria da qualidade do solo (MAGALHÃES et al. 2014).

O objetivo do presente estudo foi avaliar como o manejo de um SAF influencia os indicadores que permitem inferir sobre a qualidade físico-hídrica e os estoques de carbono do solo.

Material e métodos

O estudo foi realizado na Estação Experimental da Cascata, Embrapa Clima Temperado, Pelotas (31°37'14 "S; 52°31'41" W), RS, Brasil. O SAF foi implantado e conduzido desde o mês outubro de 2013 em um relevo suave ondulado, com clima subtropical úmido (Cfa), de acordo com a classificação de Köppen. Os dados agroclimáticos da região de estudo estão apresentados na Figura 4.

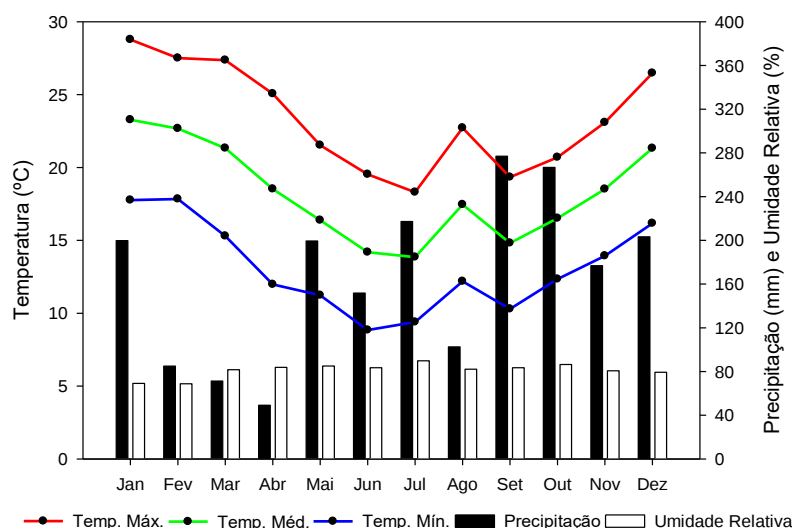


Figura 4: Dados agroclimáticos da região de estudo.

O solo é classificado como um Argissolo, de classe textural Franco Arenosa até a profundidade de 0,40 m, com características químicas e granulométricas, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Características químicas e granulométricas do solo do sistema agroflorestal (SAF) linha e entrelinha após dois anos de condução e uma área de mata nativa.

Manejo	pH _{H2O}	MO	V %	m	P mg dm ⁻³	K mg dm ⁻³	Ca cmol _c dm ⁻³	Mg cmol _c dm ⁻³	Argila	Silte %	Areia
0,0 – 0,1 m											
SAF-L	5,8	2,6	66,3	0,0	20,9	86,7	4,1	1,7	15,0	19,0	66,0
SAF-EL	5,7	2,2	61,5	0,0	11,8	57,3	3,7	1,3	15,0	18,0	66,0
Mata nativa	4,9	3,4	45,7	8,7	11,4	56,0	2,7	1,3	17,0	19,0	63,0
0,1 – 0,2 m											
SAF-L	5,8	1,9	62,3	0,0	10,5	64,0	3,7	1,4	14,0	21,0	64,0
SAF-EL	5,8	1,8	60,3	0,0	8,6	40,0	3,4	1,2	15,0	19,0	65,0
Mata nativa	4,7	2,1	14,0	53,6	14,0	20,0	0,8	0,4	17,0	18,0	64,0
0,2 – 0,4 m											
SAF-L	5,8	1,7	63,7	0,0	7,2	37,3	3,7	1,5	17,0	23,0	59,0
SAF-EL	5,7	1,5	59,1	0,0	5,5	32,0	3,3	1,3	21,0	19,0	60,0
Mata nativa	4,6	1,8	12,0	64,5	6,4	16,0	0,8	0,3	16,0	21,0	61,0

SAF-L: sistema agroflorestal com manejo nas linhas; SAF-EL: sistema agroflorestal com manejo nas entrelinhas.

O SAF possui linhas equidistantes espaçadas em 5 m, onde estão intercaladas as espécies arbóreas perenes produtoras de biomassa (*Trema micranta* e *Enterolobium contortisiliquum*), de interesse madeireiro (*Hovenia dulcis*, *Peltophorum dubium*, *Cedrella fissilis*, *Citharexylum montevidense*, *Hexachlamys edulis*, *Luehea divaricata*; *Patagonula americana*; *Cordia trichotoma*) e frutíferas (*Carya illinoensis*, *Citrus reticulata*, *Diospyros kaki*, *Citrus sinensis*, *Butia odorata* e *Psidium guajava*). Nas entrelinhas, foram implantadas mudas de um sub-arbusto perene (*Tithonia diversifolia*), e gramínea perene (*Penisetum purpureum*) e complementada com espécies anuais de adubos verdes de verão (*Mucuna pruriens*, *Crotalaria juncea*, *Vigna unguiculata* e *Pennisetum americanum*) e adubos verdes de inverno (*Avena strigosa*, *Secale cereale*, *Vicia sativa*, *Vicia faba* e *Triticum sativum*).

As amostras de solo foram coletadas nos dias 24 e 25 de novembro de 2015 (dois anos da após a implantação do SAF), em quatro pontos aleatórios para cada parcela, tanto para o SAF-linha (SAF-L) quanto para o SAF-entrelinha (SAF-EL). Como área de referência da condição natural do solo, foi utilizada uma área de mata nativa adjacente ao SAF. A vegetação da mata nativa foi classificada como uma Floresta Estacional Semidecidual. Amostras com estrutura preservada foram coletadas no SAF-L e no SAF-EL. Foram coletados monolitos de solo (0,1 m x 0,2 m x 0,2 m), nas camadas 0,0 a 0,1 m; 0,1 a 0,2 e 0,2 a 0,4 m no SAF-L, SAF-EL e mata nativa,

Amostras com estrutura preservada foram usadas para determinar: curva de retenção de água no solo (CRAS); densidade do solo (Ds); a macroporosidade - conteúdo de água equilibrada a tensão 1 kPa (Ma) de acordo com REYNOLDS et al. (2007); a microporosidade-conteúdo de água em equilíbrio a tensão de 10 kPa (Mi) e a capacidade de aeração (CA) determinada através da seguinte fórmula: $CA = \theta_{0 \text{ kPa}} - \theta_{10 \text{ kPa}}$ (EMBRAPA, 2017).

Para a determinação da CRAS, as amostras com estrutura preservada foram saturadas por capilaridade até atingirem a saturação e posteriormente equilibradas nas tensões de 1 e 6 kPa em mesa de tensão e de 10,33 e 100 kPa em câmara de pressão de Richards com placa porosa (KLUTE, 1986). Para tensões superiores a 300 kPa utilizou-se um psicrômetro (WP4c, DECAGON DEVICES, 2015). Os dados experimentais das CRAs foram ajustados de acordo com VAN GENUCHTEN (1980). Após a obtenção dos dados ajustados dos parâmetros empíricos do modelo de van Genuchten, a capacidade de campo (θ_{CC} , $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) foi considerada como o valor estimado do conteúdo volumétrico de água retido na tensão de 10 kPa, enquanto o ponto de murcha permanente (θ_{PMP} , $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) foi definido como o valor estimado do conteúdo volumétrico de água retido na tensão de 1.500 kPa. A água disponível (AD, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) foi obtida subtraindo-se θ_{PMP} do θ_{CC} .

Os monolitos do solo foram desagregados, secos à temperatura ambiente e, em seguida, divididos em duas partes: uma parte foi peneirada em peneira com malha de 9,76 mm para determinações do diâmetro médio de agregados (DMP) (KEMPER; ROSENAU, 1986, modificado por PALMEIRA et al., 1999), e a outra parte foi peneirada em peneira com malha de 2 mm para determinação da granulometria e do carbono orgânico total (oxidação a seco, analisador elementar LecoTruSpec® CHN-S).

Os estoques totais de carbono (ECS) foram calculados considerando a seguinte fórmula: $ECS = (C \times Ds \times p)/10$, onde ECS= estoque de carbono no solo ($Mg\ ha^{-1}$); C = teor total de carbono ($g\ kg^{-1}$); Ds = densidade do solo ($Mg\ m^{-3}$) e p = espessura da camada do solo (cm). Os dados do ECS foram calculados em massa equivalente (SISTI et al., 2004).

O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados. Os dados experimentais foram submetidos à análise de valores discrepantes e verificados quanto ao seu ajuste à distribuição de probabilidade normal. A análise de variância foi realizada e, para variáveis com efeitos significativos do tratamento (teste F, 95% de probabilidade), foi aplicado o teste de comparação da média de Tukey ($p < 0,05$). Todas as análises estatísticas foram realizadas no software SIGMAPLOT versão 12.

Resultados

Após dois anos de condução do SAF, não foi possível observar diferenças significativas entre SAF-L e SAF-EL. Quando comparado o SAF (linha e entrelinha) com a mata nativa, se verificou que os atributos físico-hídricos influenciados na camada 0,0-0,1 m foram: Ds, Ma, CA, θ_{CC} , θ_{PMP} , AD e COT, enquanto que na camada de 0,1 a 0,4 foi possível observar diferenças significativas nos atributos Ds, θ_{CA} e θ_{PMP} .

A Ds foi significativamente afetada nas três camadas avaliadas (Tabela 2). Os tratamentos SAF-L e SAF-EL da camada de 0,0-0,1 m apresentaram os maiores valores médios de Ds, 1,448 e 1,569 $Mg\ m^{-3}$, respectivamente, em relação a mata nativa (1,150 $Mg\ m^{-3}$). Para a camada de 0,1-0,2 m, o SAF-EL diferiu estatisticamente da mata nativa, enquanto o SAF-L foi semelhante ao SAF-EL e mata nativa. Na camada de 0,2-0,4 m, SAF-L e SAF-EL não diferiram entre si (1,641 e 1,659 $Mg\ m^{-3}$, respectivamente), mas ambos diferiram da mata nativa (1,440 $Mg\ m^{-3}$).

Ao analisar a macroporosidade (Ma), o SAF-L e o SAF-EL não apresentaram diferenças significativas entre si. Apenas na camada superior a mata nativa foi estatisticamente superior ao SAF-EL (Tabela 2). Apesar da ausência de diferenças estatísticas significativas em 0,1-0,4 m, há uma tendência do solo no SAF-L mostrar as maiores médias de Ma em relação aos solos

em SAF-EL e mata nativa. No que se refere a microporosidade (Mi), não foram observadas diferenças significativas para as três camadas do solo.

Tabela 2. Atributos físicos do solo sob sistema agroflorestal (SAF) linha e entrelinha, e uma área adjacente com mata nativa em três camadas de solo.

Uso do solo	Ds* (Mg m ⁻³)	Ma	Mi	CA	θ_{CC}	θ_{PMP}	AD	DMP (mm)	COT g kg ⁻¹
0,0 - 0,1m									
SAF-L	1,448 ^{a**}	0,100 ^{ab}	0,262 ^{ns}	0,127 ^b	0,340 ^a	0,073 ^b	0,268 ^a	3,462 ^{ns}	25,991 ^b
SAF-EL	1,569 ^a	0,062 ^b	0,266	0,084 ^b	0,336 ^a	0,063 ^b	0,273 ^a	3,223	24,020 ^b
Mata nativa	1,150 ^b	0,139 ^a	0,262	0,284 ^a	0,270 ^b	0,090 ^a	0,180 ^b	3,140	34,463 ^a
0,1 - 0,2m									
SAF-L	1,582 ^{ab}	0,073 ^{ns}	0,253 ^{ns}	0,085 ^b	0,315 ^{ns}	0,069 ^b	0,247 ^{ns}	2,860 ^{ns}	20,935 ^{ns}
SAF-EL	1,645 ^a	0,057	0,258	0,070 ^b	0,309	0,071 ^{ab}	0,238	2,796	20,431
Mata nativa	1,360 ^b	0,047	0,272	0,167 ^a	0,290	0,080 ^a	0,200	3,440	24,115
0,2 - 0,4m									
SAF-L	1,641 ^a	0,051 ^{ns}	0,262 ^{ns}	0,062 ^b	0,311 ^{ns}	0,085 ^{ab}	0,226 ^{ns}	1,375 ^{ns}	17,680 ^{ns}
SAF-EL	1,659 ^a	0,042	0,269	0,051 ^b	0,318	0,095 ^a	0,223	1,143	19,331
Mata nativa	1,440 ^b	0,032	0,264	0,125 ^a	0,280	0,080 ^b	0,190	1,860	20,430

*Densidade do solo (Ds), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), capacidade de aeração (CA), capacidade de campo (θ_{CC}), ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), água disponível (AD) e diâmetro médio ponderado de agregados (DMP).

**Médias seguidas da mesma letra na coluna, dentro da camada, não diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). ns: não significativo.

Ao avaliar a capacidade de aeração (CA), observou-se que a mata nativa diferiu significativamente para as três camadas avaliadas, mas não houve diferença estatística entre SAF-L e SAF-EL. Os valores de θ_{CC} foram influenciados apenas pelo SAF na camada superficial (0,0-0,1 m). Por outro lado, para θ_{PMP} , diferenças significativas podem ser observadas entre os manejos nas três camadas avaliadas (Tabela 2). Para a camada superficial (0,0-0,1 m), a mata nativa apresentou maior valor médio de θ_{PMP} (0,090 m³ m⁻³), enquanto a θ_{PMP} no SAF-L e SAF-EL foram semelhantes, com valores de 0,073 e 0,063 m³ m⁻³, respectivamente. Para a camada de 0,1-0,2 m, a mata nativa apresentou valor superior ao SAF-L e não diferiu estatisticamente do SAF-EL, enquanto que na camada 0,2-0,4, o SAF-EL foi superior à mata nativa e não diferiu significativamente do SAF-L (Tabela 2).

O formato da curva de retenção de água no solo (CRAS) também pode ser um indicador das diferenças resultantes do manejo adotado. As curvas do SAF-L e SAF-EL foram consideravelmente diferentes da mata nativa, principalmente na porção próxima à condição de saturação do solo (Figura 5). Tais diferenças ocorreram em todo o perfil, sendo mais acentuadas nas camadas superficiais. Isso acontece na porção de quase saturação, com potenciais matriciais

inferiores a 6 kPa. É importante observar que esse comportamento está mais relacionado à história das áreas do que aos efeitos do SAF, pois essa avaliação foi realizada apenas dois anos após implantação do SAF.

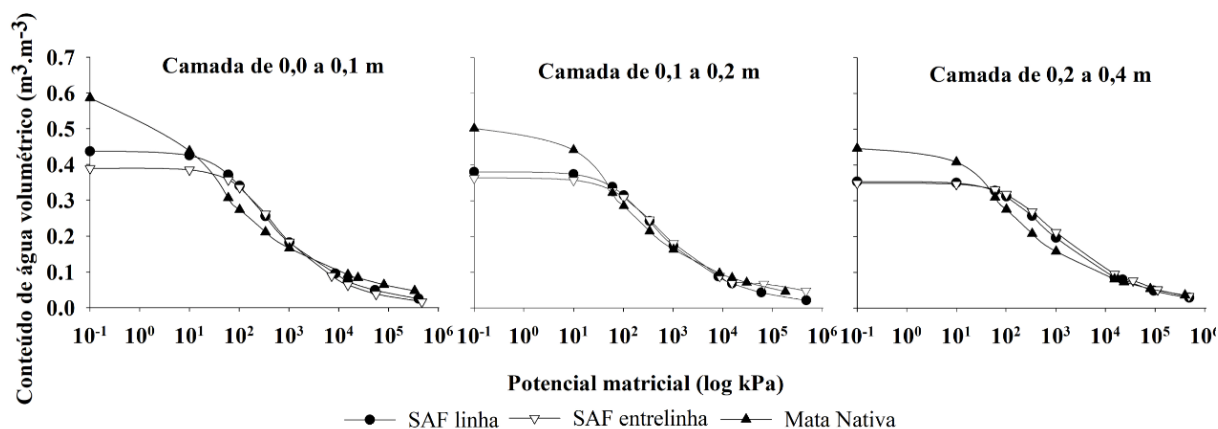


Figura 5. Curvas de retenção de água em sistema agroflorestal (SAF) linha e entrelinha, e uma área adjacente de mata nativa em três camadas de solo.

Os valores de AD apresentaram diferença estatística apenas na camada 0,0-0,1 m, em que SAF-L e SAF-EL foram estatisticamente superiores à mata nativa (Tabela 2). Nas demais camadas, não foram observadas diferenças estatísticas entre SAF-L, SAF-EL e mata nativa. Para DMP, não foram observadas diferenças significativas entre SAF-L, SAF-EL e mata nativa (Tabela 2). No entanto, houve predominância de macroagregados (C1 + C2) na camada superficial para todas as áreas avaliadas, essencialmente aquelas de tamanhos maiores (C1) (Figura 6), com a mesma tendência para a camada de 0,1-0,2 m. No entanto, na camada mais profunda (0,2-0,4 m) houve tendência de maior acúmulo de agregados na classe de menor tamanho (C6).

Os valores de capacidade de campo (θ_{CC}) apresentaram diferenças significativas somente na camada superficial (0,0-0,1 m) (Tabela 2). Diferentemente, para os valores de θ_{PMP} , pode-se observar efeito significativo entre os manejos estudados nas três camadas avaliadas (Tabela 2). Para a camada superficial (0,0-0,1 m) a mata nativa apresentou maior valor médio ($0,090 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), enquanto que o SAF-L e o SAF-EL não diferiram entre si, com valores de $0,073$ e $0,063 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente. Para a camada 0,1-0,2 m, a mata nativa apresentou diferença estatística em relação ao SAF-L, o qual não apresentou diferença estatística em relação ao SAF-EL (Tabela 2), enquanto que na camada de 0,2-0,4 m o SAF-EL foi estatisticamente significativo em comparação a mata nativa que não apresentou diferença estatística em relação ao SAF-L (Tabela 2).

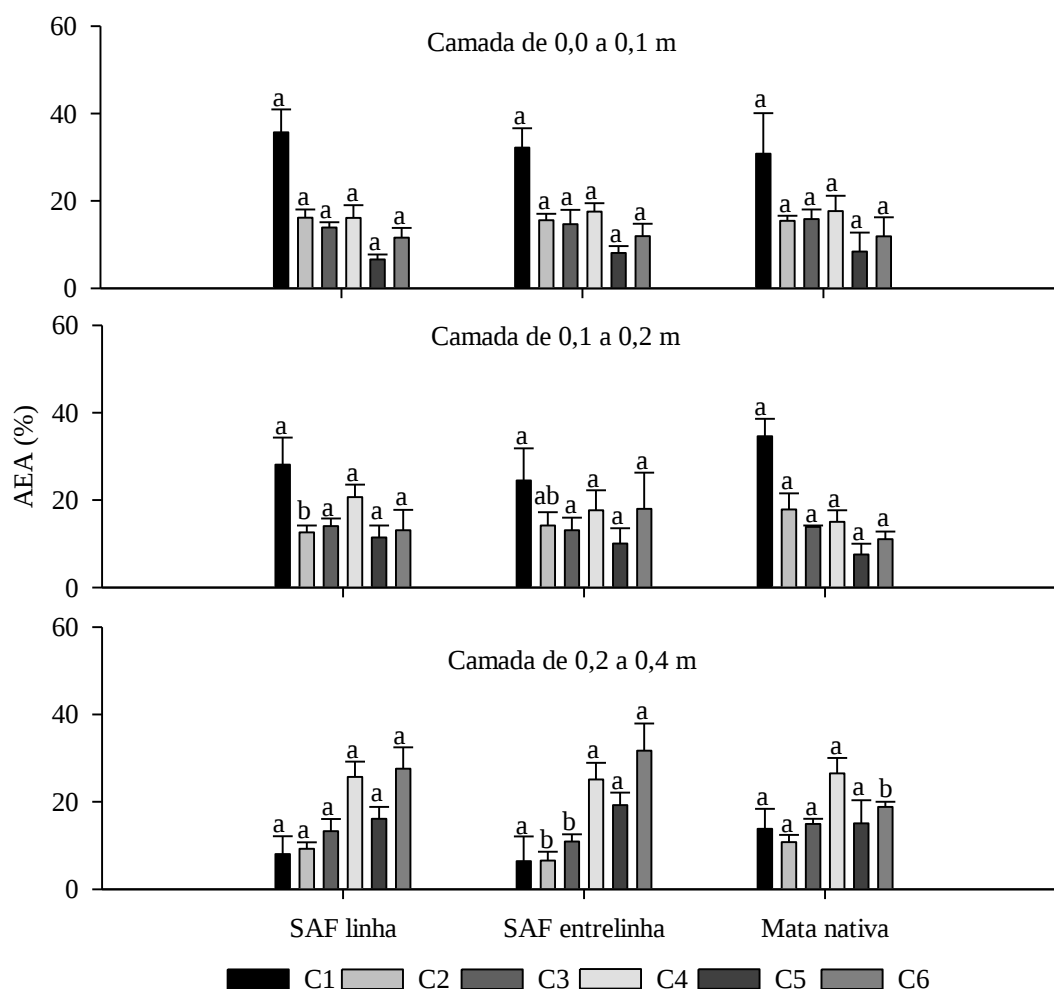


Figura 6. Agregados estáveis em água (AEA) distribuídos em diferentes classes (mm) em um sistema agroflorestal (SAF), linha e entrelinha, e em uma área adjacente sob mata nativa, em três camadas de solo.

Classes de agregados: C1 - 9,51-4,76 mm; C2 - 4,75-2,00 mm; C3 - 1,99-1,00 mm; C4 - 0,99-0,50 mm; C5 - 0,49-0,25 mm; e C6 <0,25 mm. * As médias de cada classe de agregados seguidas da mesma letra, dentro de cada camada de solo, não diferem pelo teste de Tukey com 5% de probabilidade de erro.

Em relação aos estoques de carbono do solo (ECS), nas camadas superficiais do SAF-L e SAF-EL foram equivalentes à mata nativa, com diferença significativa entre os usos do solo apenas na camada de 0,2-0,4 m, com a mata nativa apresentando a maior média (58,92 Mg ha⁻¹) em relação ao solo sob SAF-L (41,16 Mg ha⁻¹) e SAF-EL (42,14 Mg ha⁻¹) (Tabela 3). Dessa forma, para as camadas superficiais, os ECS mais próximos à mata nativa foram proporcionados no SAF-L, o que não ocorreu na camada mais profunda (0,2-0,4 m). De fato, seria pouco provável que o SAF, com apenas dois anos de condução, pudesse alterar significativamente as camadas mais profundas do solo. Ao considerar todo o perfil (0,0-0,4 m), a mata nativa forneceu

o maior ECS, com uma média de 131,34 Mg ha⁻¹, enquanto que o SAF-L e o SAF-EL não apresentaram ECS comparável à mata nativa após dois anos de condução de SAF.

Tabela 3. Estoques de carbono do solo (ECS, Mg ha⁻¹), sob mata nativa e sistema agroflorestal (SAF-L e SAF-EL) após dois anos de implantação.

Camada de solo (m)	Uso do solo		
	SAF-L	SAF-EL	Mata nativa
0,0-0,1	39,70±6,52 ^{ns}	37,26±0,30	39,63±1,50
0,1-0,2	34,06±6,21 ^{ns}	33,57±2,86	32,79±2,31
0,2-0,4	41,16±6,09 ^b	42,14±10,65 ^b	58,92±1,35 ^a
0,0-0,4	114,92±15,26 ^b	112,97±12,72 ^b	131,34±10,57 ^a

SAF-L: sistema agroflorestal com manejo nas linhas; SAF-EL: sistema agroflorestal com manejo nas entrelinhas. Os valores seguidos pela mesma letra na linha, dentro de cada camada, não são significativamente diferentes pelo teste de Tukey (p <0,05). ns: não significativo.

Discussão

Valores mais altos de Ds foram observados nas áreas de SAF quando comparados à mata nativa, como também verificado por MASCARENHAS et al. (2017). Entretanto, esse comportamento é considerado natural e típico, pois existe uma tendência da Ds ser menor na superfície e aumentar conforme a profundidade, devido às pressões exercidas por agentes externos e pelas camadas superficiais, que resultam em camadas subsuperficiais adensadas, além da tendência natural de redução de matéria orgânica nas camadas mais profundas, diminuindo a porosidade total do solo abaixo da zona de maior desenvolvimento radicular (BRADY; WEIL, 2013).

REICHERT et al. (2003) cita que valores de Ds superiores a 1,65 Mg m⁻³ são críticos em solos com teor de argila inferior a 20%. É o caso deste estudo (Tabela 1), onde todos os valores de Ds foram inferiores a esse nível crítico, não representando restrição ao desenvolvimento radicular total, com exceção do SAF-EL na camada de 0,2-0,4 m, que mostrou Ds ligeiramente acima deste limite.

O equilíbrio proporcionado pela mata, pode ser atribuído à deposição contínua de serrapilheira, o que favorece a agregação de partículas do solo e a presença de organismos responsáveis pela construção de poros em forma de galerias, aumentando a macroporosidade e reduzindo a densidade do solo (Tabela 2). A área sob mata nativa não possui histórico de atividades antrópicas recentes, enquanto a área sob SAF era um pomar de frutíferas convencional no passado, o qual era manejado sob capina mecânica, portanto sujeito ao revolvimento da camada superficial do solo, além de tráfego de máquinas para outros tratamentos culturais.

A ocorrência de maiores valores de Ma no SAF-L pode ser considerado um benefício da prática de acumulação da palhada, com consequências a curto prazo para a QS, pois a Ma favorece as trocas gasosas e a infiltração de água no perfil e a atividade radicular das espécies perenes (PEZZARICO et al., 2013).

Jarvis (2002) considera que os MA são fundamentais para a infiltração de água que cai sobre o solo, sobretudo aquela fração de fluxo mais rápido e intenso no solo (fluxo preferencial). Drewry e Paton (2005) sugerem valores ideais de Ma para a camada superficial (0,0-0,1 m), de $0,05$ a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, onde neste caso, solos com valores inferiores a $0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ são considerados degradados. Considerando esse critério, os valores médios de Ma (Tabela 2), de forma geral, não indicaram condições de degradação. Na camada 0,0-0,1 m o SAF-L apresentou maior média de Ma quando comparado com o SAF-EL, $0,100 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $0,062 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente, indicando que ambos não degradaram o solo, atendendo aos preceitos recomendados por Drewry e Paton (2005).

O menor valor de θ_{PMP} na camada mais profunda está provavelmente relacionado com a granulometria do solo, pois a mata nativa apresentou menor porcentagem de argila (16%) em relação ao SAF-L e SAF-EL (Tabela 1), especialmente quando comparada ao SAF-EL, que apresentou maior teor de argila (21%), influenciando seu θ_{PMP} . Segundo Silva et al. (2008), a argila aumenta a capacidade de retenção de água, sendo esta apontada como um dos principais atributos contribuintes à retenção de água no solo.

Recomenda-se uma capacidade de aeração (CA) $\geq 0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para que haja uma aeração ideal para as raízes, abaixo desse limite, podem ocorrer restrições significativas ao desenvolvimento da planta. Na camada superficial (0,0-0,1 m), o SAF-EL apresentou CA $\leq 0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, enquanto em 0,1-0,2 m e 0,2-0,4 m apenas a floresta nativa foi compatível com a recomendação, mostrando que o SAF, após dois anos de condução, ainda não foi eficaz para recuperar essa função do solo.

A maior AD tanto no SAF-L quanto no SAF-EL em comparação com a mata nativa pode estar relacionado à distribuição do tamanho dos poros. Enquanto a mata nativa manteve diâmetros de poros maiores, o solo sob SAF, quando mantido sob pomar de frutíferas no passado, converteu a maioria de seus macroporos em microporos, resultando em aumento da AD. Mesmo que a AD seja importante para as regiões climáticas com déficit hídrico, a Ma é crucial para o desenvolvimento adequado das plantas em solos pouco drenados, onde podem ocorrer estações chuvosas, situação do local do estudo. A reconversão de microporos em macroporos é desejável no caso deste estudo, sendo geralmente propiciada por intensa atividade radicular e biológica combinada com frequentes adições de matéria orgânica fresca. Apesar de

esse processo estar em andamento, particularmente no SAF-L, melhores resultados de Ma só seriam possíveis a médio e longo prazo.

Para a maioria dos solos, a MO é o fator chave para a hierarquia de agregação e a estabilidade de agregados (TIVET et al. 2013), condições desejáveis para melhores resultados de DMP. As frações MO mais humificadas contribuem para a estabilização dos agregados do solo, tendo reconhecido seu papel como agente cimentante para partículas minerais e para melhorias na estrutura do solo. O acúmulo e ação da MO são mais intensos nas camadas superficiais, sendo favorecidos em sistemas que proporcionam menor mobilização do solo e balanço positivo em relação às adições e perdas de resíduos das culturas na superfície do solo. Por outro lado, RUMPEL; KÖGEL-KNABNER (2011) afirmam que o carbono (C) armazenado em profundidade é, em grande parte, composto por carbono radicular, configurando-se como a principal entrada de C nas camadas mais profundas do solo.

Os dados do ECS constituem informações valiosas sobre os serviços ambientais promovidos pelo SAF, capazes de quantificar o potencial de sequestro de carbono no solo por diferentes formas e sistemas de uso (CARDINAEI et al. 2016). Quando bem gerenciados, os resíduos das culturas elevam os ECS, pois possuem diversidade vertical e horizontal e fixam carbono atmosférico (CO_2) no solo, acumulando até $0,83 \text{ Mg C ano}^{-1}$ em solos de zonas temperadas (FELICIANO et al. 2018). Portanto, a recuperação de ECS promovidos pelo SAF podem ser semelhantes aos ecossistemas naturais (mata nativa), e em muitos casos superiores àqueles proporcionados por pastagens ou culturas anuais ao longo do tempo, pois o SAF devolve grandes quantidades de resíduos orgânicos ao solo, contribuindo assim para o aumento dos ECS (TSCHARNTKE et al. 2011, GAMA-RODRIGUES et al. 2010). Ao contribuir para o sequestro de carbono do solo, os SAFs também podem recuperar áreas degradadas e recompor reservas florestais, especialmente na agricultura familiar, estimulando o desenvolvimento de áreas de alta capacidade produtiva.

Considerando a distribuição de agregados estáveis em água (AEA) (Figura 6) em diferentes classes de tamanho, na camada de 0,0 a 0,1 m se verificou a predominância de macroagregados ($\text{C1} + \text{C2}$) em todas as áreas avaliadas, essencialmente daqueles agregados de maior tamanho (C1) (Figura 6), sendo a mesma tendência observada para a camada de 0,1 a 0,2 m. No entanto, na camada mais profunda (0,2 a 0,4 m) houve tendência de maior acúmulo de agregados na classe de menor tamanho (C6). O acúmulo e a ação da matéria orgânica são mais intensos nas camadas superficiais, sendo favorecidos em sistemas que proporcionam menor mobilização do solo e balanço positivo quanto à manutenção de resíduos culturais na superfície do solo (PORTUGAL et al., 2008; VEZZANI e MIELNICZUK, 2011). Ainda que

os resultados de macro e microagregados obtidos aos dois anos de implantação do SAF não tenham indicado diferenças significativas entre os tratamentos avaliados, especialmente na possibilidade do SAF-L proporcionar incremento de macroagregados, acredita-se que os SAF's, na ausência ou mobilização controlada do solo, favorecem a formação de macroagregados, os quais são indicadores de uma estrutura de solo mais adequada e favorável para o desenvolvimento das plantas.

Conclusões

As condições físicas e hídricas do solo proporcionadas pelo sistema agroflorestal (SAF-L e SAF-EL), após dois anos de condução, não foram capazes de atender às condições de qualidade física do solo encontradas na mata nativa no perfil de 0,0-0,4 m.

Os estoques de carbono apresentados pelo solo sob sistema agroflorestal, tanto nas linhas como nas entrelinhas, foram semelhantes à mata nativa nas camadas superficiais (0,0-0,2 m), mas não foram equivalentes à mata nativa no perfil 0,0-0,4 m.

Referências

- BARBOSA J. S., SILVA K. C. R., CARDUCCI C. E., SANTOS K. L., KOHN L. S., FUCKS J. S. (2017): Physical-hydric attributes of a Humic Inceptisol in Agroforestry on the Santa Catarina Plateau. *Revista Floresta e ambiente*, 24: 1-9.
- BRADY, N. C; WEIL, R. R. (2013): Elementos da natureza e propriedades dos solos. 3.ed. Porto Alegre: Bookman, 704p.
- COULIBALY, J. Y., CHIPUTWA, B., NAKELSE, T., KUNDHLANDE, G. (2017): Adoption of agroforestry and the impact on household food security among farmers in Malawi. *Agricultural Systems*, 155: 52-69.
- CARDINAEL, R., CHEVALLIER, T., CAMBOU. A., BERAL, C., BARTHES, B.G., DUPRAZ, C., DURAND, C., KOUAKOUA, E., CHENU, C. (2016): Increased soil carbon stocks under agroforestry: A survey of six different sites in France. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 236: 243–255.
- DEVICES, D. (2015): WP4C Dewpoint potentiometer, operator's manual. Decagon Devices.
- DORAN, J. W., PARKIN, T. B. (1994): Defining and assessing soil quality. *Defining soil quality for a sustainable environment*, 1-21.
- DREWRY J. J., PATON R. J. (2005): Soil physical quality under cattle grazing of a winter-fed brassica crop. *Australian Journal of Soil Research*, 43: 525-531.

- EMBRAPA (2017): Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solos. 3ª ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 573.
- FELICIANO, D., LEDO, A., HILLIER, J., NAYAK, D. R. (2018): Which agroforestry options give the greatest soil and above ground carbon benefits in different world regions? *Agriculture, ecosystems & environment*, 254: 117-129.
- FOLKE, C., CARPENTER, S., WALKER, B., SCHEFFER, M., CHAPIN, T., ROCKSTRÖM, J. (2010): Resilience thinking: integrating resilience, adaptability and transformability. *Ecology and society*, 15.
- GAMA-RODRIGUES, E. F., NAIR, P. R., NAIR, V. D., GAMA-RODRIGUES, A. C., BALIGAR, V. C., MACHADO, R. C. (2010): Carbon storage in soil size fractions under two cacao agroforestry systems in Bahia, Brazil. *Environmental management*, 45: 274-283.
- JARVIS, N. J., ZAVATTARO, L., RAJKAI, K., REYNOLDS, W. D., OLSEN, P. A., MCGECHAN, M., MECKE, B., MOHANTY, B., LEEDS-HARRISON, P. B. JACQUES, D. (2002): Indirect estimation of near-saturated hydraulic conductivity from readily available soil information. *Geoderma*, [s.l.], 108:1-17.
- KEMPER W. D., ROSENAU, R. C. (1986): Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A. editor. *Methods of soil analysis*. Madison: American Society of Agronomy: 425-442.
- KLUTE A. (1986): Water retention: Laboratory methods. In: KLUTE, A. ed. *Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods*. Madison, American Society of Agronomy: Soil Science Society of America: 635-662.
- LU, S., WANG, F., MENGA, P., ZHANG, J. (2015): Simultaneously protecting the environment and its residents: The need to incorporate agroforestry principles into the ecological projects of China. *Ecological Indicators*, [s.l.], 57: 61-63.
- MAGALHÃES J. G. S., LOPES DA SILVA M., TAGLIALEGNA T. S., REGO L. J. S. (2014): Economic analysis of the agroforestry systems by using differential equations. *Revista Árvore*, 38: 73-79.
- MASCARENHAS, A. R. P., SCCOTI M. S. V., MELO R. R., DE OLIVEIRA CORRÊA F. L., DE SOUZA E. F. M., ANDRADE R. A., BERGAMIN A. C., MÜLLER M. W. (2017): Physical attributes and soil carbon stocks under different land use in Rondonia State, South Western Amazonia, *Brazilian Journal of Forestry Research*, 37: 19-27.
- MOTA, J. C. A., FREIRE, A. G., ASSIS JUNIOR, R. N. (2013): Qualidade física de um Cambissolo sob sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 37:1196-1206.

- PALMEIRA P. R. T., PAULETTO E. A., TEIXEIRA C. F. A., GOMES A. D. S., SILVA J. D. (1999): Soil aggregation of an Albaqualf submitted to different soil tillage systems. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 23:189-195.
- PAUDEL, B. R., UDAWATTA, R. P., KREMER, R. J., ANDERSON, S. H. (2012): Soil quality indicator responses to row crop, grazed pasture, and agroforestry buffer management. *Agroforestry Systems*, 84: 311-323.
- PAUL C., WEBER M., KNOKE T. (2017): Agroforestry versus farm mosaic systems – Comparing land-use efficiency, economic returns and risks under climate change effects. *Science of the Total Environment*, [s.l.], 587-588: 22-35.
- PEZARICO, C. R., VITORINO, A. C. T., MERCANTE, F. M., DANIEL, O. (2013). Indicadores de qualidade do solo em sistemas agroflorestais. *Revista de Ciências Agrárias*, 56, 1:40-47.
- PRETTY, J., BHARUCHA, Z. P. (2014): Sustainable intensification in agricultural systems. *Annals of botany*, 114: 1571-1596.
- PORTUGAL, A. F., JUCKSCH, I., SCHAEFER, C. E., WENDLING, B. (2008): Determinação de estoques totais de carbono e nitrogênio e suas frações em sistemas agrícolas implantados em Argissolo Vermelho-Amarelo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32: 2091-2100.
- REICHERT, J. M., REINERT, D. J., BRAIDA, J. A. (2003): Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. *Ciência e Ambiente*, 27: 29-48.
- RUMPEL C., KÖGEL-KNABNER I. (2011): Deep soil organic matter-a key but poorly understood component of terrestrial C cycle. *Plant and Soil*, [s.l.], 338: 143-158.
- SCHEMBERGUE, A., CUNHA, D. A., CARLOS, S. M., PIRES, M. V., FARIA, R. M. (2017): Sistemas agroflorestais como estratégia de adaptação aos desafios das mudanças climáticas no Brasil. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 55: 9-30.
- SIMINSKI A., SANTOS K. L., WENDT J. G. N. (2016): Rescuing agroforestry as strategy for agriculture in Southern Brazil. *Journal of Forestry Research*, [s.l.], 27:739-746.
- SILVA, A. P., TORMENA, C. A., FIDALSKI, J., IMHOFF, S. (2008): Pedotransfer functions for the soil water retention and soil resistance to penetration curves. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 32:1-10.
- SILVA, D. C., SILVA, M. L. N., CURI, N., OLIVEIRA, A. H., SOUZA, F., MARTINS, S. G., MACEDO, R. L. G. (2011): Atributos do solo em sistemas agroflorestais, cultivo convencional e floresta nativa. *Revista de Estudos Ambientais* 13: 77-86.

- SISTI, C.P.J., SANTOS, H. P DOS, KOHHANN, R., ALVES, B. J. R., SEGUNDO, U., BODDEY, R. M. (2004): Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. *Soil & Tillage Research*, 76:39-58.
- TIVET, F., DE MORAES SA, J. C., LAL, R., BRIEDIS, C., BORSZOWSKI, P. R., DOS SANTOS, J. B., EURICH, A. F. G., HARTMAN, D. C., NADOLNI JUNIOR, M., BOUZINAC, S., SÉGUY, L. (2013). Aggregate C depletion by plowing and its restoration by diverse biomass-C inputs under no-till in sub-tropical and tropical regions of Brazil. *Soil & tillage research*, 126: 203-218.
- TSCHARNTKE, T., CLOUGH, Y., BHAGWAT, S. A., BUCHORI, D., FAUST, H., HERTEL, D., HÖLSCHER, D., JUHRBANT, J., KESSLER, M., PERFECTO, I., SCHERBER, C. (2011): Multifunctional shade-tree management in tropical agroforestry landscapes- a review. *Journal of Applied Ecology*, 48: 619-629.
- USDA NRCS (2018) Healthy soil for life.
<https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/main/soils/health/>. Accessed 17 December 2019.
- VAN GENUCHTEN, M. Th. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, [s.l.], 44, 892-898.
- VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. (2011): Agregação e estoque de carbono em Argissolo submetido a diferentes práticas de manejo agrícola. *Revista Brasileira de Ciência do solo*, 35:213-223.
- WALDRON, A., GARRITY, D., MALHI, Y., GIRARDIN, C., MILLER, D. C., SEDDON, N. (2017): Agroforestry can enhance food security while meeting other sustainable development goals. *Tropical Conservation Science*, 10:1-6.
- ZHU, X., CHEN, C., WU, J., YANG, J., ZHANG, W., ZOU, X., LIU, W. JIANG, X. (2019). Can intercrops improve soil water infiltrability and preferential flow in rubber-based agroforestry system?. *Soil and Tillage Research* 191:327-339

**5 Artigo 2: Evolução da qualidade física do solo em sistema agroflorestal
multipropósito**

(Segundo Normas da Revista Agroforestry Systems)

Evolução da qualidade física do solo em sistema agroflorestal multipropósito

Resumo: Preocupações com a sustentabilidade ambiental global promoveram a adoção de práticas conservacionistas na produção agrícola, focadas principalmente na preservação ou recuperação da qualidade do solo. Os sistemas agroflorestais surgem como uma alternativa sustentável para a produção de alimentos e outros insumos para a atividade agrícola, promovendo benefícios ambientais e socioeconômicos para os agricultores. O objetivo deste estudo foi avaliar as alterações da qualidade física do solo em curto prazo sob o manejo do sistema agroflorestal no sul do Brasil. O sistema agroflorestal foi implantado em 2013 em um Argissolo de classe textural Franco Arenosa. Nas linhas do sistema agroflorestal (SAF-L) foram intercaladas espécies arbóreas perenes produtoras de biomassa, de interesse madeireiro e frutíferas. Na faixa central das entrelinhas (SAF-EL) foram implantadas mudas de um subarbusto perene e uma gramínea perene, complementada com espécies anuais de adubos verdes de verão e inverno. O solo sob a mata nativa foi utilizado como referência da condição natural daquele solo. Foram coletadas amostras de solo nas camadas de 0,00-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m para determinação dos atributos físicos e do teor de carbono orgânico total nos anos de 2015, 2016 e 2017. A curto prazo, os atributos mais sensíveis nas linhas e entrelinhas do sistema agroflorestal foram densidade do solo e a porosidade total até 0,20 m de profundidade. O conteúdo total de carbono orgânico na linha e na entrelinha do sistema agroflorestal apresentou incremento ao longo do tempo apenas na camada de 0,00 a 0,10 m, embora até 35% menor em relação à mata nativa. A maior macroporosidade foi observada nas linhas das espécies arbóreas a 0,20 m de profundidade evidenciando a capacidade do sistema radicular em melhorar rapidamente a qualidade física do solo.

Palavras-chave: linha; entrelinha; densidade do solo; porosidade total, carbono orgânico do solo.

Introdução

A conversão de matas nativas em áreas agrícolas com preparo convencional do solo promove mudanças negativas nas propriedades do solo e nos serviços ecossistêmicos (Lavelle et al. 2014; Celentano et al. 2017). A perda significativa de carbono (Fujisaki et al. 2015; Durigan et al. 2017), o aumento da densidade do solo e a resistência à penetração do solo, e o declínio do espaço de aeração, a estabilidade agregada e a infiltração de água intensificam os riscos de erosão do solo (Cherubin et al. 2016; DeStefano, 2017). A degradação do solo agrícola é uma preocupação particular, especialmente onde nenhuma cobertura vegetal é mantida no

solo, pois as perdas de solo e nutrientes podem representar perdas econômicas significativas, com um impacto considerável no custo de produção dos agricultores. De acordo com Dechen et al. (2015), as perdas brasileiras de solo nas lavouras anuais são próximas a 616,5 milhões de Mg ano⁻¹, com custos de reposição de nutrientes em torno de US\$ 1,3 bilhão por ano.

A adoção dos sistemas agroflorestais (SAFs), caracterizada como um cultivo simultâneo entre espécies arbóreas e agrícolas (Altieri, 2012), surge como uma alternativa sustentável para a produção de alimentos e outros insumos necessários para os agricultores familiares (Nair, 2011; Somarriba et al. 2012), promovendo benefícios ambientais e socioeconômicos para os agricultores (Bucheli e Bokelmann, 2017). Do ponto de vista da qualidade do solo, o cultivo de espécies perenes (arbóreas) promovem o sequestro do carbono, a reciclagem de nutrientes, a maior cobertura vegetal e, conseqüentemente, a redução da erosão do solo e o aumento da qualidade dos recursos hídricos (Escobar et al., 2002; Lovell e Sullivan, 2006; Nii-Annang et al. 2009; Udawatta et al. 2009; Udawatta et al. 2010; Udawatta et al. 2014; Paudel et al. 2011; Cherubin, 2018). Por outro lado, as culturas anuais com suas raízes superficiais, fornecem benefícios a curto prazo, como a proteção da superfície do solo e a agregação das partículas do solo (Ralisch et al. 2010; Haynes e Beare, 1997).

Diversos trabalhos ao redor do mundo também evidenciam que os SAFs apresentam capacidade de melhorar a qualidade do solo ao longo do tempo. Na China, Chen et al. (2017) observaram que em dez anos de implantação de um SAF, as práticas agroflorestais melhoraram a qualidade do solo, especialmente no aumento significativo dos macroagregados e do carbono orgânico total, resultando em melhorias nas propriedades físico-químicas do solo. Na França e no Brasil, Cardinael et al. (2016) e Thomazini et al. (2015), respectivamente, também comprovam o potencial do SAF em aumentar os estoques de carbono no solo. Além disso, Carvalho et al. (2004) observaram em solo brasileiro maior qualidade física em um SAF com quatro anos, ou seja, menor densidade do solo, maior porosidade, menor resistência à

penetração do solo e maior agregação quando comparado a um sistema de cultivo convencional. O SAF foi, portanto, considerado uma solução tecnológica de baixo custo, com altos retornos econômicos e ambientais.

No Brasil, tem sido observada a conversão de áreas desmatadas e degradadas em SAF, onde espécies arbóreas (culturas em linha) são consorciadas com espécies anuais (culturas nas entrelinhas) na mesma área. Atualmente, cerca de 14 milhões de hectares (IBGE, 2017) estão ocupados com esse sistema, com incontestáveis melhorias na qualidade do solo. No entanto, os efeitos do manejo do solo e de resíduos culturais nas linhas e nas entrelinhas no SAF podem ser diferentes, com alterações na densidade do solo, porosidade, conteúdo de matéria orgânica, e na capacidade de retenção de água (ZHU et al., 2019). Nesse sentido, o objetivo deste estudo foi avaliar a evolução da qualidade física do solo de um sistema agroflorestal multipropósito no sul do Brasil.

Material e métodos

Área de estudo

O estudo foi realizado em um SAF da Estação Experimental Cascata da Embrapa Clima Temperado, localizada em Pelotas (31°37'14 "S; 52°31'41" W), RS, sul do Brasil. De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é subtropical úmido (Cfa), com temperatura média anual de 18°C (Alvares et al. 2013) e precipitação média anual de 1.900 ± 90 mm nos últimos cinco anos.

O SAF foi implantado em 2013 em um Argissolo, com classe de textural Franco Arenosa até 0,40 m de profundidade, com características químicas e de granulometria descritas na Tabela 4.

Tabela 4. Características químicas e granulométricas do solo sob sistema agroflorestal (linha e entrelinha) e mata nativa avaliados em 2017, nas camadas de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 m.

Manejos	Argila --- g kg ⁻¹ ---	Silte	Areia	MO %	pH _{H2O}	Ca -- cmol _c dm ⁻³ --	Mg	Al ---- % ----	V	P -- mg dm ⁻³ --	K	CTC _{pH 7} cmol _c dm ⁻³
0,0-0,10 m												
SAF-L	150	190	660	3,02	5,71	4,36	1,90	0,00	61,83	22,34	48,83	12,75
SAF-EL	150	180	660	2,03	5,45	3,30	1,34	0,20	53,00	4,85	31,83	9,06
Mata nativa	170	190	630	3,80	5,18	4,33	1,65	7,18	43,75	3,83	69,00	13,83
0,10-0,20 m												
SAF-L	140	210	640	1,80	5,76	3,78	1,35	0,00	57,75	6,52	25,75	9,12
SAF-EL	150	190	650	1,49	5,73	3,58	1,00	0,00	58,33	2,59	23,67	8,11
Mata nativa	170	180	640	1,90	4,80	1,58	0,70	30,03	31,50	0,83	31,00	8,78
0,20-0,40 m												
SAF-L	170	230	590	1,33	6,03	3,71	1,83	0,00	63,33	1,68	21,17	8,73
SAF-EL	210	190	600	1,29	5,94	3,50	1,31	0,00	59,17	1,08	20,00	8,39
Mata nativa	160	210	610	1,58	4,95	1,20	0,65	37,03	19,25	0,50	20,00	11,70

SAF-L: Sistema agroflorestal - manejo linha; SAF-EL: Sistema agroflorestal - manejo entrelinha.

A área do SAF apresenta cerca de 0,25 hectares, em local com relevo suave ondulado. O SAF possui linhas equidistantes espaçadas em 5 m, onde estão intercaladas as espécies arbóreas perenes produtoras de biomassa (*Trema micranta* e *Enterolobium contortisiliquum*), madeira (*Hovenia dulcis*, *Peltophorum dubium*, *Cedrella fissilis*, *Citharexylum montevidense* e *Hexachlamys edulis*) e frutas (*Carya illinoensis*, *Citrus reticulata*, *Diospyros kaki* e *Citrus sinensis*). Na faixa central das entrelinhas foram implantadas mudas de um subarbusto perene (*Tithonia diversifolia*), e uma gramínea perene (*Penisetum purpureum*) complementadas com espécies de adubos de verão (*Mucuna pruriens*, *Crotalaria juncea*, *Vigna unguiculata* e *Pennisetum americanum*) e inverno (*Avena strigosa*, *Secale cereale*, *Vicia sativa*, *Vicia faba* e *Triticum sativum*) (Figura 7). O solo de uma área adjacente sob mata nativa foi utilizado como área de referência da condição original daquele solo.



Row (linha): Plantas arbóreas para produção de biomassa, madeira e frutas; Inter-row (Entrelinhas): Adubos verdes anuais: espécies de verão e inverno, gramíneas perenes e arbustos perenes.

Figura 7. Arranjo espacial de plantas arbóreas e culturas anuais na linha (Row) e entrelinhas (Inter-Row) no sistema agroflorestal.

Amostragem de solo e análises físicas e químicas

As amostras de solo foram coletadas em doze pontos aleatórios, tanto na linha (SAF-L) como nas entrelinhas (SAF-EL). Adicionalmente foram coletas amostras de solo em uma área adjacente ao SAF, mantida com vegetação nativa (quatro pontos aleatórios), classificada como Floresta Estacional Semidecidual, utilizada como referência de condição natural do solo.

As amostras de solo foram coletas em: Nov/2015, Nov/2016 e Nov/2017. Sendo coletadas amostras de solo com estrutura preservada usando cilindros com 0,05 m de diâmetro e 0,05 m de altura para determinar a densidade do solo (Ds), a porosidade total (Pt), a macroporosidade (Ma) e a microporosidade (Mi) nas camadas: 0,00-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m, conforme Embrapa (2011). Além disso, amostras de solo com estrutura não preservada foram coletadas com o auxílio de uma pá de corte para determinar a distribuição dos agregados estáveis em água em diferentes classes de tamanho, o diâmetro médio ponderado (DMP) e o teor de carbono orgânico total (COT). A determinação da distribuição dos agregados estáveis em água seguiu o método descrito por Kemper e Rosenau (1986) e adaptado por Palmeira et al. (1999). Os intervalos das classes de agregados foram: C1: 9,52-4,76 mm; C2: 4,76-2,0 mm; C3: 2,00-1,00 mm; C4: 1,00-0,25 mm; C5: 0,25-0,105 mm e C6 <0,105 mm. O teor de carbono orgânico total (COT) no solo foi determinado por oxidação a seco no analisador elementar CHN-S.

Análise estatística dos dados

Os dados obtidos no SAF-L e SAF-EL foram submetidos à análise de variância (ANOVA). Quando a ANOVA resultou em efeitos significativos para pelo menos um tratamento pelo teste F, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Considerando que o solo de referência (solo natural sob vegetação nativa) não fazia parte do delineamento experimental, este tratamento não foi incluído na análise estatística. A influência do SAF nos atributos físicos do solo ao longo do tempo foi avaliada pelo teste t-pareado nos resultados obtidos em 2015, 2016 e 2017. Todas as análises dos dados foram realizadas no software estatístico SigmaPlot (2004).

Resultados e discussão

Após quatro anos de condução do experimento se verificou que houve diferença entre o SAF-L e SAF-EL, para as variáveis Ds, PT, Ma e COT na camada de 0,00-0,10 m, enquanto que na camada de 0,10-0,20 m influenciaram a Ds, PT, Ma e DMP. Na camada de 0,20-0,40 m não foram observados efeitos significativos do SAF sobre os atributos físicos do solo (Tabela 5).

Os menores valores de Ds e os maiores de Pt e Ma, até 0,20 m de profundidade indicam alterações na qualidade física do solo sob o manejo do SAF-L em relação ao SAF-EL. Esse resultado provavelmente deve-se ao maior conteúdo de COT apresentado na camada superficial do SAF-L (Tabela 5) proveniente da maior deposição e acumulação de resíduos de plantas cultivadas no SAF-L associada à maior entrada de biomassa do SAF-EL, que foi removido anualmente das entrelinhas e depositado nas linhas das espécies arbóreas. Efeitos positivos do COT na qualidade física do solo também foram observados por Chen et al. (2017) em um SAF com dez anos de condução na China, em que houve diminuição do COT conforme o aumento da profundidade, como observado neste estudo (Tabela 5), este comportamento é esperado na maioria dos sistemas agroflorestais (Thomazini et al. 2015).

Tabela 5. Valores médios de densidade do solo (Ds), porosidade total (PT), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), diâmetro médio ponderado (DMP), e carbono orgânico total (COT) de um solo sob sistema agroflorestal e uma área de referência (mata), avaliados em 2017 nas camadas de 0,00-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m, após quatro anos de condução do experimento.

Manejo	Ds Mg m ⁻³	PT -----m ³ m ⁻³ -----	Ma	Mi	DMP mm	COT g kg ⁻¹
0,00-0,10 m						
SAF-L	1,32±0,08b	0,45±0,05a	0,10±0,04a	0,25±0,02 ^{ns}	3,59±0,47 ^{ns}	33,88±6,55a
Δtest (%)	+11,15	+27,67	+12,88	+37,50	+17,30	-21,07
SAF-EL	1,48±0,14a	0,36±0,04b	0,05±0,02b	0,25±0,02	3,55±0,54	27,73±5,90b
Δtest (%)	+25,24	+1,76	-42,61	+34,94	+15,94	-35,40
Mata	1,18	0,35	0,09	0,18	3,06	42,92
0,10-0,20 m						
SAF-L	1,48±0,06b	0,38±0,03a	0,09±0,03a	0,23±0,02 ^{ns}	3,45±0,37 ^{ns}	22,49±3,59 ^{ns}
Δtest (%)	+6,20	+1,15	+8,92	+12,26	+9,89	-10,19
SAF-EL	1,58±0,09a	0,32±0,04b	0,05±0,02b	0,22±0,02	2,77±0,77	20,71±4,28
Δtest (%)	+13,43	-12,94	-38,39	+8,29	-11,58	-17,31
Mata	1,40	0,37	0,08	0,20	3,14	25,04
0,20-0,40 m						
SAF-L	1,61±0,09 ^{ns}	0,33±0,03 ^{ns}	0,07±0,04 ^{ns}	0,23±0,02 ^{ns}	1,89±0,70 ^{ns}	17,83±3,52 ^{ns}
Δtest (%)	+14,66	-11,63	-7,60	+8,53	-14,84	-21,09
SAF-EL	1,62±0,08	0,32±0,03	0,05±0,02	0,24±0,02	1,50±0,54	18,90±4,22
Δtest (%)	+15,75	-15,85	-36,43	+12,67	-32,49	-16,34
Mata	1,40	0,37	0,08	0,21	2,22	22,60

SAF-L: sistema agroflorestal - linha; SAF-EL: sistema agroflorestal entrelinha; Mata: área de referência. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna, em cada camada, não diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Δtest (%): aumento (+) ou diminuição (-) em relação à área de referência

A Tabela 5 mostra que, tanto o SAF-L quanto o SAF, a Ds na profundidade até 0,20 m foi 11,25 e 25,24% maior que a Ds sob mata nativa, tanto para o SAF-L quanto para o SAF-EL, respectivamente. Esses resultados demonstram em parte como a organização do solo antropizado é diferente da mata nativa, principalmente devido ao maior teor de carbono no sistema natural (Braida e Reichert, 2014), observado no presente estudo, o que reflete também em uma maior qualidade física em comparação para solos cultivados (Balin, 2017; Souza, 2016).

Por outro lado, até a profundidade de 0,10 m, a Ma no SAF-L foi 12,88% superior à mata nativa, enquanto a Ma no SAF-EL foi até 42,61% inferior. Essas diferenças em relação ao sistema não antropizado, provavelmente se devem à maior biomassa radicular das espécies arbóreas utilizadas no SAF-L quando comparadas aos sistemas radiculares das espécies subarborescentes, gramíneas e adubos verdes anuais utilizados no SAF-EL. De acordo com Jackson et al. (1996), a biomassa radicular média de espécies arbóreas varia de 2 a 5 kg m⁻², enquanto a

biomassa radicular de culturas agrícolas e forrageiras (gramíneas e leguminosas) é menor que $1,5 \text{ kg m}^{-2}$.

Ao analisar a Mi, não houve diferença significativa nas camadas avaliadas entre o SAF-L e o SAF-EL. No entanto, observa-se incrementos que variam de 8,29% (SAF-EL) até 37,50% (SAF-L) em relação a mata nativa.

O SAF-L e SAF-EL não promoveram diferenças em relação ao DMP, que variou de 3,55 a 3,59 mm na camada de 0,00-0,10 m, de 2,77 a 3,45 mm na camada de 0,10-0,20 e 1,50 a 1,89 mm nas camadas de 0,20-0,40 m (Tabela 5). No entanto, os maiores valores de DMP apresentados até a profundidade de 0,20 m em comparação à camada subjacente são geralmente esperados, devido ao incremento gradual de MO do solo (Tisdall & Oades, 1982; Six et al., 2004) e a maior concentração de raízes tanto das espécies arbóreas (60% até os 0,30 m de profundidade) gramíneas (75 % até os 0,30 m de profundidade) (Jackson et al., 1996).

O uso potencial do SAF na melhoria da qualidade do solo é evidenciado quando os atributos físicos são avaliados ao longo do tempo. Em 2017, quatro anos após a implementação, houve redução de Ds na linha (Figura 8a) e na entrelinha (Figura 8b) em relação a 2015, dois anos após a implementação do SAF. A diminuição da Ds ao longo do tempo pode ser atribuída principalmente ao aumento do COT, tanto na linha (Figura 9a) quanto na entrelinha (Figura 9b) do sistema. Resultados semelhantes foram encontrados por Cunha et al. (2011), Marcolin e Klein (2011) e Pezzoni (2012).

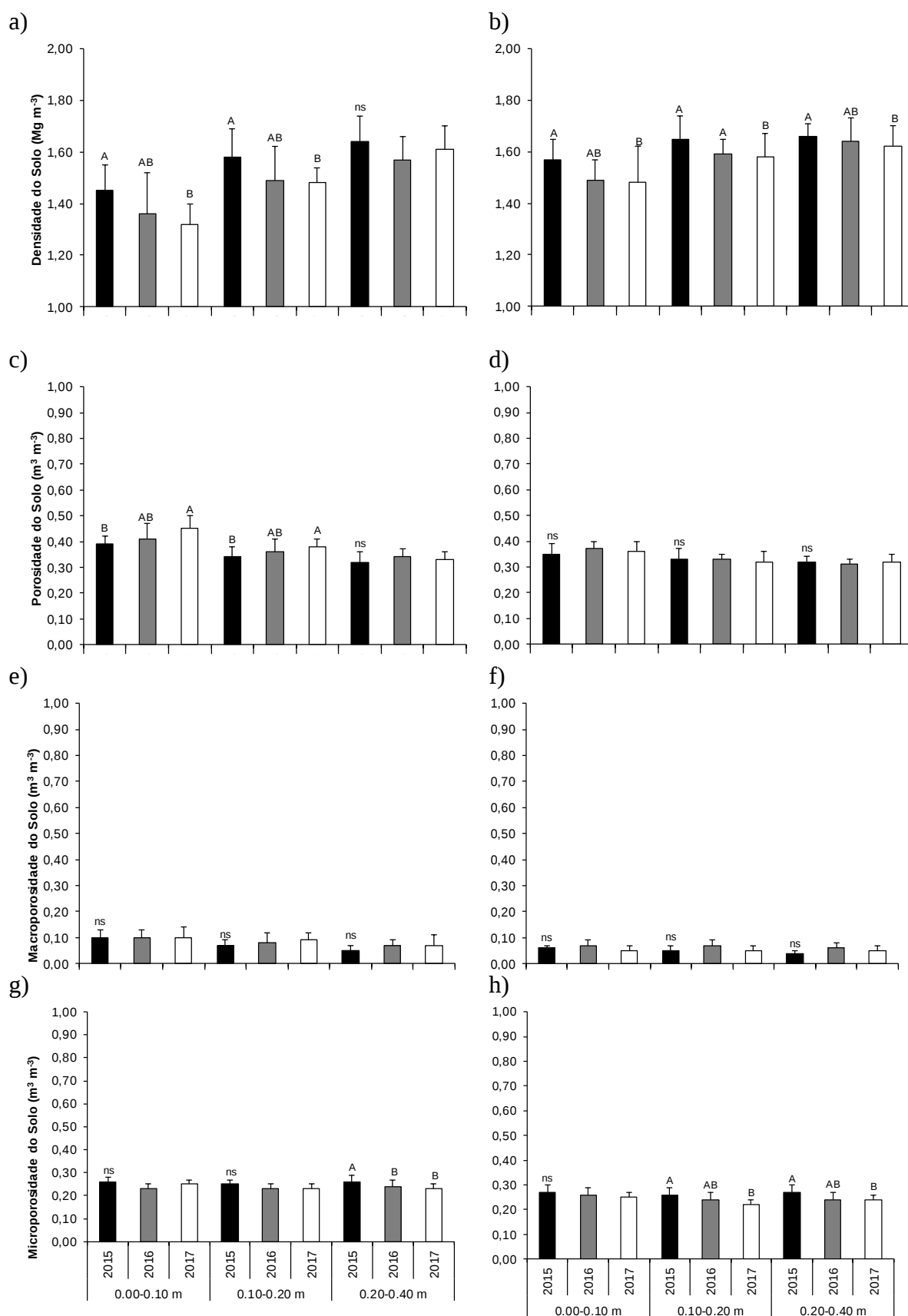


Figura 8. Densidade do solo, porosidade do solo, macroporosidade e microporosidade do solo no SAF-L (respectivamente a, c, e, g) e no SAF-EL (respectivamente b, d, f, h) nos anos de 2015, 2016 e 2017. *Médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$); ns= não significativo

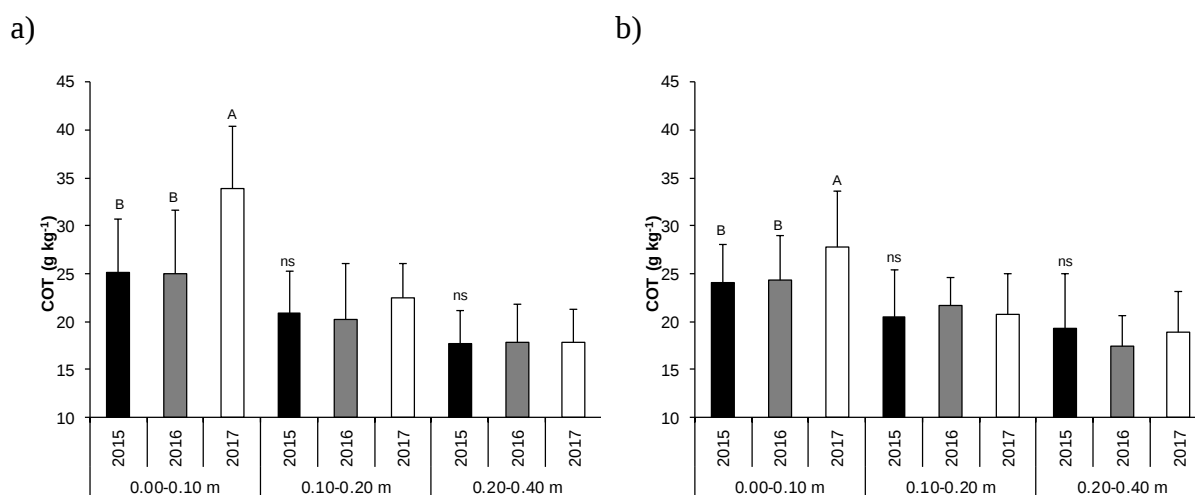


Figura 9. Teor de carbono orgânico total do solo no SAF linha (SAF-L) (a) e no SAF entrelinha (SAF-EL) (b) nos anos de 2015, 2016 e 2017.

*Médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$); ns= não significativo.

Para porosidade total (PT) houve efeito significativo ao longo do tempo até a profundidade de 0,20 m, apenas para o manejo do SAF-L (Figura 8c), provavelmente ligado à deposição contínua de serapilheira na linha, favorecendo a reconfiguração dos agregados do solo, além de incrementar a presença de organismos, responsáveis pela bioconstrução de galerias, contribuindo para o aumento da PT. Nesse sentido, Spera et al. (2006) afirmam que os valores de PT em solos argilosos não devem ser menores que $0,50 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$. Os resultados observados no SAF-L mostram que o espaço poroso do solo até 0,20 m de profundidade aumentou gradualmente ao longo do tempo a uma taxa de $0,025 \text{ m}^3 \text{m}^{-3} \text{ano}^{-1}$, alcançando resultados próximos aos recomendados já no quarto ano após a implantação do SAF (Figura 8c). No entanto, ainda não foi possível observar essa diferença no SAF-EL.

Embora os manejos de SAF-L e SAF-EL não mostrem efeito na Ma ao longo do tempo (Figura 8 e, f), observa-se que na camada superficial (0,00-0,10 m) os resultados mostram-se dentro dos limites considerados ideais para o desenvolvimento da planta, que estão entre 0,05 e $0,10 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ de acordo com Carter (1988) e Drewry e Paton (2005). Considerando esse critério, os valores médios de Ma no SAF-L e SAF-EL até 0,40 m de profundidade do solo não indicam condições de degradação em 2017 (Tabela 5).

Considerando a qualidade física do solo, em particular o COT, o aumento significativo ao longo do tempo, principalmente na camada de 0,00-0,10 m (Figura 9 a, b) mostra a eficiência do SAF na recuperação dos teores de carbono do solo, com incrementos aproximados de 35% no SAF-L e 15% no SAF-EL entre os anos de 2015 e 2017. O efeito pronunciado nos teores médios de COT observados em 2017 se referem provavelmente ao estágio de desenvolvimento das espécies perenes, que após o quarto ano de implantação do SAF contribuíram com quantidades mais significativas de material orgânico para o solo.

De fato, as duas estratégias de gerenciamento empregadas no SAF (linha e entrelinha) podem se complementar. Durante os primeiros anos, a produção de biomassa de entrelinhas beneficia essencialmente as linhas. Depois disso (cerca de cinco anos), o movimento da biomassa de entrelinhas para fileiras pode ser interrompido, ajudando a restaurar a qualidade do solo nas entrelinhas. Assim, o SAF mostra efetivamente sua capacidade de regenerar a qualidade do solo, semelhante ou melhor que as condições naturais, devido ao consórcio de espécies na mesma área, além da prática frequente de deposição de resíduos orgânicos das plantas (Araújo et al. 2001; Sánchez, 2001; Schroth et al., 2002).

Mudanças no teor de COT podem ser rapidamente observadas na superfície do solo, mas são relativamente lentas nas camadas mais profundas (Praudel et al. 2012), como observado neste estudo, ou seja, o COT apresentou valores semelhantes entre as camadas de 0,10 a 0,40 m, tanto no SAF-L como no SAF-EL durante os anos 2015 e 2017 (Figura 9a, b). Assim, a curto e médio prazo, as alterações na agregação do solo são provavelmente mais influenciadas pelas raízes do que pelos insumos orgânicos provenientes da parte aérea das plantas. Dessa forma, de 2015 a 2017, o desempenho dos sistemas radiculares utilizados no SAF-L e no SAF-EL promoveram aumento nas classes de tamanho de agregados de C2 (4,75-2,00 mm) e C3 (1,99-1,00 mm) até 0,40 m de profundidade, enquanto na classe de tamanho de agregado C4 (0,99-0,50 mm) e C5 (0,49-0,25 mm) diminuiu com o tempo, (Figura 10 a-f).

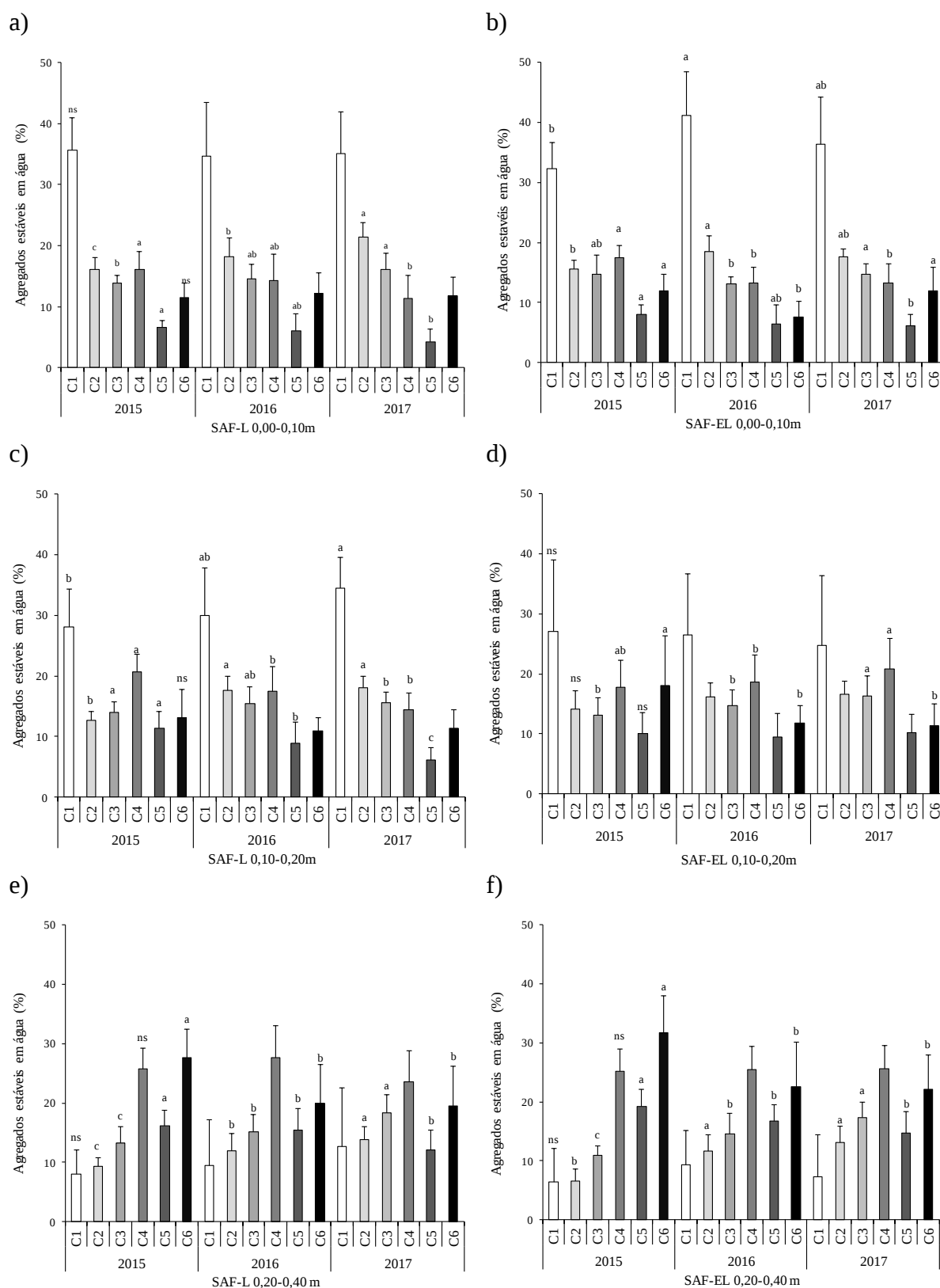


Figura 10. Variações temporais de seis classes de agregados estáveis em água durante três anos de experimento em um sistema agroflorestal. Barras verticais significam o desvio padrão. Letras diferentes representam diferença significativa entre os valores médios (teste de Tukey, $P < 0,05$).

C1: 9,52-4,76mm; C2: 4,75-2,00mm; C3: 1,99-1,00mm; C4: 0,99-0,50mm; C5: 0,49-0,25mm e C6: <0,24mm

A influência do sistema radicular de composição diversificada auxilia no aumento do tamanho dos agregados e a proteção ao solo que a serapilheira desempenha, impede o impacto das gotas de chuva que desestruturam agregados na superfície do solo (Pohl et al., 2009; Erktan et al., 2016). A composição diversificada do sistema radicular na distribuição granulométrica e a proteção do solo por densa cobertura vegetal e serapilheira evitam o impacto das gotas de chuva que desintegram os agregados na superfície do solo (Pohl et al. 2009; Erktan et al. 2016).

Conclusões

O sistema agroflorestal linha e entrelinha, após quatro anos da implantação apresentou alterações nos atributos físicos do solo, sendo os mais sensíveis a densidade do solo e a porosidade total do solo até a profundidade 0,20 m;

O carbono orgânico total no sistema agroflorestal linha e entrelinha apresentou incremento ao longo de quatro anos apenas na camada de 0,0-0,10 m, embora ainda 35% menor em relação à mata nativa;

A maior macroporosidade observada no sistema agroflorestal linha até a profundidade de 0,20 m em relação mata nativa evidencia o desempenho positivo do sistema radicular das espécies arbóreas na melhoria da qualidade física do solo.

Referências

Altieri M (2012) Agroecologia: bases científicas para uma agricultura sustentável. Expressão Popular, Rio de Janeiro.

Alvares CA, Stape JL, Sentelhas PC, de Moraes G, Leonardo J and Sparovek G (2013) Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift. 22: 711-728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>

Araújo GGL, Albuquerque SG, Guimarães Filho C (2001) Opções no uso de forrageiras arbustivo-arbóreas na alimentação animal no semiárido do Nordeste. In: Carvalho MM, Alvim MJ, Carneiro JC. (Eds.). Sistemas agroflorestais pecuários: opções de sustentabilidade para áreas tropicais e subtropicais. Juiz de Fora: Embrapa Gado e Leite; Brasília: FAO pp 111-137.

Balin NM, Bianchini C, Ziech ARD, Luchese AV, Alves MV, Conceição PC (2017) Soil fauna under different soil management systems with oats and crops cucurbits. *Revista Scientia Agraria*. 18:74-84. <http://dx.doi.org/10.5380/rsa.v18i3.52133>

Braida JA, Reichert JM (2014) Matéria orgânica e comportamento mecânico para fins de manejo de solo. In: Leite, LFC, Maciel G.A, Araújo ASF. *Agricultura Conservacionista no Brasil*. Brasília, DF pp 309-361.

Bucheli VJP, Bokelmann W (2017). Agroforestry systems for biodiversity and ecosystem services: the case of the Sibundoy Valley in the Colombian province of Putumayo. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*. 13:380-397. <https://doi.org/10.1080/21513732.2017.1391879>

Cardinael R, Chevallier T, Cambou A, Beral C, Barthes BG, Dupraz C, Durand C, Kouakoua E, Chenu C (2016) Increased soil carbon stocks under agroforestry: A survey of six different sites in France. *Agriculture Ecosystems & Environment* 236: 243–255. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.12.011>

Carvalho R, Goedert WJ, Armando MS (2004) Physical features of soil quality under an agroforestry system. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 39:1153-1155.

<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2004001100015>

Carter MR (1988) Temporal variability of soil macroporosity in a fine sandy loam under mouldboard ploughing and direct drilling. *Soil and Tillage Research*. 12: 37-51. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(88\)90054-2](https://doi.org/10.1016/0167-1987(88)90054-2)

Celentano D, Rousseau GX, Engel VL, Zelaraya'n M, Oliveira EC, Araujo ACM, de Moura EG (2017) Degradation of riparian forest affects soil properties and ecosystem services provision in eastern Amazon of Brazil. *Land Degradation & Development*. 28:482-493. <https://doi.org/10.1002/ldr.2547>

Cherubin MR, Karlen DL, Franco ALC, Tormena CA, Cerri CEP, Davies CA, Cerri CC (2016) Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil. *Geoderma* 267:156-168. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.01.004>

Cherubin MR, Chavarro-Barneo JP, Silva-Olaya AM (2018) Agroforestry systems improve soil physical quality in northwestern Colombian Amazon. *Agroforestry Systems*. 1-13. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0282-y>

Chen CF, Liu WJ, Jiang XJ, Wu JE (2017) Effects of rubber-based agroforestry systems on soil aggregation and associated soil organic carbon: implications for land use. *Geoderma*. 299:13-24. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.03.021>

Cunha EQ, Stone LF, Moreira JAA, Ferreira EPB, Didonet AD, Leandro WM (2011) Sistemas de preparo do solo e culturas de cobertura na produção orgânica de feijão e milho. *Revista*

Brasileira de Ciência do Solo. 35: 589-602. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832011000200029>

Dechen SCF, Telles TS, Guimaraes M F, Maria, IC (2015) Perdas e custos associados à erosão hídrica em função de taxas de cobertura do solo. *Bragantia*, 74: 224-233. <http://dx.doi.org/10.1590/1678-4499.0363>.

De Stefano A, Jacobson MG (2017) Soil carbon sequestration in agroforestry systems: a meta-analysis. *Agroforestry Systems*. 92:285-299. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0147-9>

Drewry JJ, Paton RJ (2005) Soil physical quality under cattle grazing of a winter-fed brassica crop. *Australian Journal of Soil Research*.43: 525-531. <https://doi.org/10.1071/SR04122>

Durigan MR, Cherubin MR, Carmargo PB, Ferreira JN, Berenguer E, Gardner TA, Barlow J, Dias CTS, Signor D, Oliveira Junior RC, Cerri CEP (2017) Soil organic matter responses to anthropogenic forest disturbance and land use change in eastern Brazilian Amazon. *Sustainability*. 9:379-395. <https://doi.org/10.3390/su9030379>

Empresa brasileira de pesquisa agropecuária, EMBRAPA (2011). Centro Nacional de pesquisa de Solo. Manual de métodos de análise de solos. Rio de Janeiro.

Erktan A, Cécillon L, Graf F, Roumet C, Legout C, Rey F (2016) Increase in soil aggregate stability along a Mediterranean successional gradient in severely eroded gully bed ecosystems: combined effects of soil, root traits and plant community characteristics. *Plant Soil*. 398 :121-137. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2647-6>

Escobar GA, Mackay AD, Hodgson J, Kemp PD (2002) Soil properties of a widely spaced, planted poplar (*Populus deltoides*) pasture system in a hill environment. Australian Journal of Soil Research 40:873-886. <https://doi.org/10.1071/SR01080>

Fujisaki K, Perrin A-S, Desjardins T, Bernoux M, Balbino LC, Brossard M (2015) From forest to cropland and pasture systems: a critical review of soil organic carbon stocks changes in Amazonia. Global Change Biology. 21:2773-2786. <https://doi.org/10.1111/gcb.12906>

Haynes RJ, Beare, MH (1997) Influence of six crop species on aggregate stability and some labile organic matter fractions. Soil Biology and Biochemistry. 11:1647-1653. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(97\)00078-3](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(97)00078-3)

Jackson RB, Canadel J, Ehleringer JR, Mooney HA, Sala OE, Schulze ED (1996) A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. Oecologia. 108:389-411. <http://doi.org/10.1007/BF00333714>

Kemper WD, Rosenau RC (1986) Aggregate stability and size distribution. In: Klute, A. (ed). Methods of soil analysis. Madison: American Society of Agronomy.

Lavelle P, Rodriguez N, Arguello O, Bernal J, Botero C, Chaparro P, Gomez Y, Gutierrez A, Hurtado MD, Loaiza S, Pullido SX, Rodriguez E, Sanabria C, Velasquez E, Fonte SJ (2014) Soil ecosystem services and land use in the rapidly changing Orinoco river basin of Colombia. Agriculture, Ecosystems & Environment. 185: 106-117. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.12.020>

Lovell ST, Sullivan WC (2006) Environmental benefits of conservation buffers in the United States: evidence, promise, and open questions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 112: 249-260. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.08.002>

Marcolin CD, Klein VA (2011) Determinação da densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima. *Acta Scientiarum Agronomy*. 33: 349-354. <http://dx.doi.org/10.4025/actasciagron.v33i2.6120>.

Nair PKR (2011) Agroforestry systems and environmental quality: introduction. *Journal of Environmental Quality*. 40:784-790. [doi:10.2134/jeq2011.0076](https://doi.org/10.2134/jeq2011.0076)

Nii-Annang S, Grünewald H, Freese D, Hüttel RF, Dilly O (2009) Microbial activity, organic C accumulation and ¹³C abundance in soils under alley cropping systems after 9 years of recultivation of quaternary deposits. *Biology and Fertility of Soils* 45:531-538. <https://doi.org/10.1007/s00374-009-0360-4>

Palmeira, PRT, Pauletto EA, Teixeira CFA, Gomes AS, Silva JB (1999) Agregação de um Planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 23:189-195. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06831999000200001>.

Paudel BR, Udawatta RP, Anderson SH (2011) Agroforestry and grass buffer effects on soil quality parameters for grazed pasture and row-crop systems. *Applied Soil Ecology* 48:125-132. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2011.04.004>

Pezzoni T, Vitorino ACT, Daniel O, Lempp B (2012) Influência de *Pterodone marginatus* Vogel sobre atributos físicos e químicos do solo e valor nutritivo de *Brachiaria decumbens* Stapf em sistema silvipastoril. Cerne. 18:293-301. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-77602012000200014>.

Pohl M, Alig D, Korner C, Rixen C (2009). Higher plant diversity enhances soil stability in disturbed alpine ecosystems. Plant Soil 324 :91-102. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-9906-3>

Praudel BR, Udawatta RP, Kremer RJ, Anderson SH (2012) Soil quality indicator responses to row crop, grazed pasture, and agroforestry buffer management. Agroforestry Systems. 84:311-323. <https://doi.org/10.1007/s10457-011-9454-8>

Ralisch R, Almeida E, Silva AP, Pereira Neto OC, Guimarães MF (2010) Morpho structural characterization of soil conventionally tilled with mechanized and animal traction with and without cover crop. Revista Brasileira de Ciência do Solo. 6: 1795-1802. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832010000600003>.

Sánchez MD (2001) Panorama dos sistemas agroflorestais pecuários na América Latina. In: Carvalho MM, Alvim M J; Carneiro JC Sistemas agroflorestais pecuários: opções de sustentabilidade para áreas tropicais e subtropicais. Juiz de Fora: Embrapa, pp 9-17.

Schroth G, D'Angelo AS, Teixeira WG, Haag D, Lieberei R (2002) Conversion of secondary forest into agroforestry and monoculture plantations in Amazônia: consequences for biomass, litter and soil carbon stocks after 7 years. Forest Ecology and Management. 163:131-150. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00537-0](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00537-0)

Sigmaplot (2004) Version 9.01. Systat Software.

Six J, Bossuyt H, Degryze s, Denef K (2004) A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and tillage Research*, 79: 7-31.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2004.03.008>

Somarriba E, Beer J, Alegre-Orihuela J, Andrade HJ, Cerda R, De Clerck F, Detlefsen G, Escalante M, Giraldo LA, Ibrahim M, Krishnamurthy L, Mosquera VEM, Mora-Degado JR, Orozco L, Scheelje M, Campos JJ (2012) Main streaming Agroforestry in Latin America. In: Nair P, Garrity D (eds) *Agroforestry: the future of global land use*. Adv. Agrofor. Springer, Dordrecht, pp 429–453.

Souza ED, Carneiro MAC, Paulino HB, Ribeiro DO, Bayer C, Rotta LR (2016) Organic matter and soil aggregation after the conversion of "murundu fields" into a no-tillage system. *Pesquisa agropecuária brasileira*. 51:1194-1202. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900019>

Spera ST, Santos HP, Fontaneli RS, Tómm GO (2006) Efeito de pastagens de inverno e de verão em características físicas de solo sob plantio direto. *Ciência Rural*. 36:1193-1200.

Tisdall JM, Oades JM (1982) Organic matter and water-stable aggregates in soils. *European Journal of Soil Science*. 33: 141-163. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.x>

Thomazini A, Mendonça ES, Cardoso IM, Garbina ML (2015). SOC dynamics and soil quality index of agroforestry systems in the Atlantic rainforest of Brazil. *Geoderma Regional*. 5:15-24. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2015.02.003>

Udawatta RP, Kremer RJ, Garrett HE, Anderson SH (2009) Soil enzyme activities and physical properties in a watershed managed under agroforestry and row-crop system. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 131: 98-104. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2008.06.001>

Udawatta RP, Garrett HE, Kallenbach RL (2010) Agroforestry and grass buffer effects on water quality in grazed pastures. *Agroforestry Systems* 79:81-87. <https://doi.org/10.1007/s10457-010-9288-9>

Udawatta R, Kremer R, Nelson K, Jose S, Bardhan S (2014) Soil quality indicators of a mature alley cropping agroforestry system in temperate North America. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 45:2539-2551. <https://doi.org/10.1080/00103624.2014.932376>

Zhu, X., Chen, C., Wu, J., Yang, J., Zhang, W., Zou, X., Liu, w. Jiang, X. (2019). Can intercrops improve soil water infiltrability and preferential flow in rubber-based agroforestry system?. *Soil and Tillage Research* 191:327-339. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.04.017>

6 Considerações finais

O sistema agroflorestal é uma alternativa viável de produção agrícola que busca minimizar o efeito da intervenção humana nos sistemas naturais, especialmente o solo.

Mesmo considerando o curto tempo de manejo (quatro anos) do sistema agroflorestal, objeto deste estudo, foi possível observar alterações sobre os atributos físicos do solo, sendo os mais sensíveis a densidade do solo e a porosidade do solo, além do teor de carbono orgânico total que teve um incremento de aproximadamente 55% quando comparados os anos de 2015 e 2017.

O estudo mostrou que o sistema agroflorestal foi capaz de recuperar os atributos do solo nas camadas superficiais (0,0-0,10 e 0,10-0,20 m), sendo necessário portanto um período de tempo maior para ocorram alterações nas camadas mais profundas.

Os sistemas agroflorestais se consolidam como uma prática indicada para a recuperação de áreas degradadas, além de atender às demandas do agricultor familiar com cultivos simultâneos e com a produção e fornecimento de alimentos e renda.

Mesmo que os resultados desse estudo demonstrem que sistema agroflorestal tenha tido desempenho similar ou até superior em alguns atributos em relação a mata nativa, há a necessidade que novos estudos sejam conduzidos, buscando avaliar por um período mais longo a influência desse sistema na restauração dos atributos de qualidade do solo. Dessa forma, há oportunidade de melhorar os resultados obtidos e estender para uma avaliação temporal mais ampla.

7 Referências

ALTIERI, M. Agroecologia: bases científicas para uma agricultura sustentável. Expressão Popular, Rio de Janeiro, 2012.

CHERUBIN, M. R.; CHAVARRO-BERMEJO, J. P.; SILVA-OLAYA, A. M. Agroforestry systems improve soil physical quality in northwestern Colombian Amazon. **Agroforestry Systems**, v. 93, n. 5, p. 1741-1753, 2018.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: Doran, J. W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F.; STEWART, B.A. (Eds.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: Soil Science Society of America, 1994, p. 1-20.

DORAN, J. W.; JONES, A. J. **Methods for assessing soil quality**. Madison, SSSA, (SSSA Special Publication, 49), 1996. 411p.

GUEVARA-ESCOBAR, A.; MACKAY, A. D.; HODGSON, J.; KEMP, P. D. Soil properties of a widely spaced, planted poplar (*Populus deltoides*) – pasture system in a hill environment. **Soil Research**, v. 40, n. 5, p. 873-886, 2002.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Agropecuário 2017**: Brasil, Grandes Regiões e Unidades da Federação. Rio de Janeiro: IBGE. 2017.

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

GÖTSCH, E. **Break-through in agriculture**. Rio de Janeiro: Editora AS-PTA, 1995. 15 p.

SCHEMBERGUE, A.; CUNHA, D. A.; CARLOS, S. M.; PIRES, M. V.; FARIA, R. M. Sistemas agroflorestais como estratégia de adaptação aos desafios das mudanças climáticas no Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 55, n. 1, p. 9-30, 2017.

LARSON, W.E.; PIERCE, F.J. Conservation and enhancement of soil quality. In: **Evaluation on for Sustainable Land Management in the Developing World**. ISBRAM Proc., v.2, n.12 Soil Research and Management, Bangkok, Tailândia.1991.

LASCO, R.; DELFINO, R. J. P.; CATA CUTAN, D. C.; SIMELTON, E. S.; WILSON, D. M. Climate risk adaptation by smallholder farmers: the roles of trees and agroforestry. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 6, p. 83-88, 2014.

LISBOA, B. B.; VARGAS, L. K.; SILVEIRA, A. O.; MARTINS, A. F.; SELBACH, P. A. Indicadores Microbianos de Qualidade do Solo em Diferentes Sistemas de Manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 1, p.45-55, 2012.

LOVELL, S.T.; SULLIVAN, W. C. Environmental benefits of conservation buffers in the United States: evidence, promise, and open questions. **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 112, n. 4, p. 249-260, 2006.

LU, S.; WANG, F.; MENG, P.; ZHANG, J. Simultaneously protecting the environment and its residents: The need to incorporate agroforestry principles into the ecological projects of China. **Ecological Indicators**, v. 57, p. 61-63, 2015.

MACGRATH, D. A.; COMERFORD, N. B.; DURYEY, M. L. Litter dynamics and monthly fluctuations in soil phosphorus availability in an Amazonian agroforest. **Forest Ecology and management**, v. 131, n. 3, p. 167-181, 2000.

MBOW, C.; SMITH, P.; SKOLE, D.; DUGUMA, L.; BUSTAMANTE, M. Achieving mitigation and adaptation to climate change through sustainable agroforestry practices in Africa. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 6, p. 8-14, 2014.

NII-ANNANG, S.; GRÜNEWALD, H.; FREESE, D.; HÜTTL, R. F.; DILLY, O. Microbial activity, organic C accumulation and ¹³C abundance in soils under alley cropping systems after 9 years of recultivation of quaternary deposits. **Biology and fertility of soils**, v. 45, n. 5, p. 531-538, 2009.

PAUL, C.; WEBWE, M.; KNOKE, T. Agroforestry versus farm mosaic systems – Comparing land-use efficiency, economic returns and risks under climate change effects. **Science of the total environment**, v. 1, n. 1, p.1-14, 2017.

PAUDEL, B. R.; UDAWATTA, R. P.; KREMER, R. J.; ANDERSON, S. H. Soil quality indicator responses to row crop, grazed pasture, and agroforestry buffer management. **Agroforestry Systems**, v. 84, n. 2, p. 311-323, 2012.

SIMINSKI, A.; SANTOS, K. L.; WENDT, J. G. N. Rescuing agroforestry as strategy for agriculture in Southern Brazil. **Journal of forestry research**, v. 27, n. 4, p. 739-746, 2016.

TORRALBA, M.; FAGERHOLM, N.; BURGESS, P. J.; MORENO, G.; PLIENINGER, T. Do European agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem services? A meta-analysis. **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 230, p. 150-161, 2016.

UDAWATTA, R. P.; KREMER, R. J.; GARRETT, H. E.; ANDERSON, S. H. Soil enzyme activities and physical properties in a watershed managed under agroforestry and row-crop systems. **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 131, n. 1-2, p. 98-104, 2009.

UDAWATTA, R. P.; GARRETT, H. E.; KALLENBACH, R. L. Agroforestry and grass buffer effects on water quality in grazed pastures. **Agroforestry systems**, v. 79, n. 1, p. 81-87, 2010.

UDAWATTA, R. P.; KREMER, R. J.; NELSON, K. A.; JOSE, S.; BARDHAN, S. Soil quality of a mature alley cropping agroforestry system in temperate north America. **Communications in soil science and plant analysis**, v. 45, n. 19, p. 2539-2551, 2014.