



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA-UFRA
EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA-EMBRAPA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

SAIME JOAQUINA SOUZA DE CARVALHO RODRIGUES

**DINÂMICA DO CARBONO EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS COM PALMA DE
ÓLEO NA AMAZÔNIA ORIENTAL**

**Belém/PA
2019**

SAIME JOAQUINA SOUZA DE CARVALHO RODRIGUES

**DINÂMICA DO CARBONO EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS COM PALMA DE
ÓLEO NA AMAZÔNIA ORIENTAL**

Tese de Doutorado apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do Curso de Doutorado em Agronomia: área de concentração Agronomia, para obtenção do título de Doutor.

Orientador: Dr. Steel Silva Vasconcelos.

Co-orientador: Dr. Daniel Markewitz.

Belém/PA

2019

SAIME JOAQUINA SOUZA DE CARVALHO RODRIGUES

**DINÂMICA DO CARBONO EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS COM PALMA DE
ÓLEO NA AMAZÔNIA ORIENTAL**

Defesa de Tese apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do Curso de Doutorado em Agronomia: área de concentração Agronomia, para obtenção do título de Doutor.

Orientador: Dr. Steel Silva Vasconcelos

Co-orientador: Dr. Daniel Markewitz

_____ de _____ de 2019.

BANCA EXAMINADORA

Dr. Steel Silva Vasconcelos - Orientador
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA

Dra. Maria de Lourdes Pinheiro Ruivo - Examinadora
Museu Paraense Emílio Goeldi - MPEG

Dra. Vânia Silva de Melo – Examinadora
Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA

Dra Vanda Maria Sales de Andrade– Examinador
Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA

Dr. Francisco de Assis Oliveira – Examinador
Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA

SUMÁRIO

RESUMO	6
ABSTRACT	7
1. CONTEXTUALIZAÇÃO	8
REFERÊNCIAS	10
2. EFLUXO DE CO₂ DO SOLO EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS COM PALMA DE ÓLEO NA AMAZÔNIA ORIENTAL	11
RESUMO	11
ABSTRACT	12
2.1 Introdução	12
2.2 Material e Métodos	14
2.2.1 Área de estudo.....	14
2.2.2 Delineamento experimental.....	15
2.2.3 Amostragem e análises do solo	15
2.2.4 Coleta e processamento de serapilheira.....	17
2.2.5 Produção de raízes finas.....	17
2.2.6 Análise estatística.....	18
2.3 Resultados	19
2.4 Discussão	21
2.4.1 Efluxo de CO ₂ do solo.....	21
2.4.2 Variáveis abióticas e microbiológicas analisadas.....	23
2.4.3 Produção de serapilheira e raízes finas.....	26
2.5 Conclusões	28
REFERÊNCIAS	29
3. DINÂMICA DO CARBONO E NITROGÊNIO EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS COM PALMA DE ÓLEO NA AMAZÔNIA ORIENTAL	47
RESUMO	47
ABSTRACT	47
3.1 Introdução	48
3.2 Material e Métodos	49
3.2.1 Área de estudo.....	50
3.2.2 Delineamento experimental.....	50
3.2.3 Carbono e nitrogênio total do solo	50
3.2.4 Coleta e processamento de serapilheira.....	51
3.2.5 Produção e estoque de raízes finas.....	52
3.2.6 Decomposição e renovação da serapilheira e raízes.....	53

3.2.7 Análise estatística.....	53
3.3 Resultados	54
3.3.1 Estoque e acúmulo de carbono e nitrogênio no solo	54
3.3.2 <i>Turnover</i> da serapilheira fina	54
3.3.3 <i>Turnover</i> de raízes finas (<2 mm)	54
3.3.4 Carbono e nitrogênio na serapilheira.....	55
3.4 Discussão	55
3.4.1 Estoque de carbono no solo e abundância natural de $\delta^{13}\text{C}$	55
3.4.2 Carbono e nitrogênio da serapilheira e raízes após conversão de uma floresta sucessional para plantio de SAF com palma de óleo.....	57
3.4.3 Dinâmica do carbono da serapilheira e raízes nos sistemas agroflorestais com palma de óleo	58
4. Conclusões	60
REFERÊNCIAS	60

RESUMO

A conversão de florestas na Amazônia em sistemas agrícolas resulta em intensas emissões de gases-traço em decorrência de queimadas e decomposição da vegetação morta. Resultados divulgados pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC) indicam que o aumento da concentração destes gases na atmosfera afetará todos os setores das atividades humanas e dos ecossistemas. Neste contexto, o uso de culturas perenes e de porte arbóreo como a palma de óleo (*Elaeis guineensis* Jacq.) integrado a sistemas agroflorestais pode representar uma estratégia viável na Amazônia para imobilização do carbono (C) atmosférico. Objetivou-se com este trabalho avaliar a dinâmica do carbono em sistemas agroflorestais com palma de óleo na Amazônia Oriental. O estudo foi realizado no município de Tomé-Açu/PA em dois sistemas agroflorestais com palma de óleo: SAF+ (sistema agroflorestal mais diversificado) e SAF- (sistema agroflorestal menos diversificado) e uma floresta sucessional (FS). O efluxo de CO₂ do solo foi mensurado mensalmente no período de fevereiro a novembro/2015. As amostras de solo para análise das variáveis microbiológicas foram coletadas em maio/2015 e outubro/2015 e a produção de raízes finas foram estimados com coletas bimensais durante o ano de 2015. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado. O efluxo de CO₂ do solo foi maior no período de maior umidade do solo (fevereiro a julho), maior precipitação pluviométrica, maior produção de raízes finas (fevereiro a março), maior atividade microbiana e maior quociente metabólico. No SAF- foi observado um maior teor de carbono da biomassa microbiana, porém foi o tratamento que mais perdeu C-CO₂ por meio da atividade microbiana, teve menor estoque de raízes finas e menor deposição de serapilheira no solo. O SAF+ perdeu menos C-CO₂ via atividade microbiana, teve maior estoque de raízes finas e maior deposição de serapilheira em relação ao SAF-. Com a conversão da FS em SAF com palma de óleo, houve um incremento de 10,06 Mg C ha⁻¹ no solo do SAF+ e 5,53 Mg C ha⁻¹ no solo do SAF-. A FS estoca e produz mais serapilheira, em relação aos SAF. A taxa de decomposição foi maior na FS, em relação aos SAF, assim estes tendo maior tempo para renovação. Já para taxa de decomposição de raízes, o SAF- apresentou ciclagem mais rápida em relação ao SAF+ e a FS. O SAF- apresentou maior deposição de N e menor relação C/N na serapilheira anual. Após seis anos de cultivo houve uma mudança na marcação isotópica no solo dos SAF, o SAF- teve aumento no valor da abundância de ¹³C o que representa contribuição de plantas C4 no C do solo deste sistema, enquanto que o SAF+ diminuiu na área de plantio das espécies consorciadas. De maneira geral, sistemas agroflorestais com palma de óleo é uma alternativa viável de produção da palma para agricultura familiar da Amazônia, principalmente o sistema mais diversificado, pois apresenta menores emissões de CO₂ para atmosfera e acumula C no solo na camada superficial (0,1 m).

PALAVRAS-CHAVE: Dendê. Ciclo do carbono. Variáveis bióticas e abióticas. Diversidade de espécies.

ABSTRACT

The conversion of forests in the Amazon into agricultural systems results in intense emissions of trace gases due to fires and decomposition of dead vegetation. Results released by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) indicate that increasing the concentration of these gases in the atmosphere will affect all sectors of human activities and ecosystems. In this context, the use of perennial and arboreal crops such as oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) integrated to agroforestry systems may represent a viable strategy in the Amazon for immobilization of atmospheric carbon (C). The objective of this job was to evaluate the dynamics of carbon in agroforestry systems with oil palm in the Eastern Amazon. The study was out in the municipality of Tomé-Açu / PA in two agroforestry systems with oil palm: AFS + (more diversified agroforestry system) and AFS (less diversified agroforestry system) and successional forest (SF). Soil CO₂ efflux was measured monthly from February to November / 2015. Soil samples for analysis of the microbiological variables were collected in May / 2015 and October / 2015 and the production of fine roots were estimated with bi-monthly collections during the year 2015. The experimental design was completely randomized. Soil CO₂ efflux was higher in the period of higher soil moisture (February to July), higher rainfall, higher fine root production (February to March), higher microbial activity and greater CO₂ loss through microbial respiration. In the AFS- it was observed a higher annual carbon content of the microbial biomass, however it was the treatment that lost the most C-CO₂ by means of the microbial activity, has a lower stock of fine roots and less deposition of litter in the soil. In AFS+ the loss of C-CO₂ via microbial activity was lower, higher stock of fine roots and greater deposition of litter in relation to AFS -. With the conversion of SF to AFS with oil palm, there was in the soil increase of 10.06 Mg C ha⁻¹ in SAF+ and 5.53 Mg C ha⁻¹ in AFS-. The SF stock and produced more litter than AFS. The rate of decomposition was higher in SF, in relation to AFS. The rate of root decomposition in AFS- was faster in relation to AFS+ and FS. In AFS- there was higher deposition of N and lower C/N ratio in the annual litter. After six years of cultivation there was a change in the isotopic marking in the soil of the AFS, the AFS- had an increase in the value of the abundance of ¹³C which represents contribution of plants C4 in the C of the soil of this system, while the AFS+ decreased value in the area of planting of the consortium species. In general, agroforestry systems with oil palm are a viable alternative for the production of palm for family agriculture in Amazonia, especially the more diversified system, since it presents lower CO₂ emissions to the atmosphere and accumulates C in the soil in the superficial layer (0.1m).

KEYWORDS: Oil palm. soil respiration. Biotic and abiotic variables. Diversity of species.

1. CONTEXTUALIZAÇÃO

A cultura da palma de óleo (*Elaeis guineensis* Jacq.) tem grande destaque no cenário mundial e nacional devido à sua utilização na indústria alimentícia, de cosméticos, biocombustíveis, entre outros. A área plantada cresce a cada ano, principalmente na Amazônia, porém questões ambientais e sociais têm sido levantadas devido à forma como os plantios são estabelecidos, em moldes de monocultivos com grande utilização de insumos, ou seja, práticas incompatíveis com a realidade da agricultura familiar da região.

Dentro do contexto de adequação dos moldes de produção à realidade amazônica, por meio da parceria entre Natura Inovação e Tecnologia de produtos, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Amazônia Oriental), Financiadora de estudos e projetos (FINEP) e Cooperativa Agrícola Mista de Tomé-Açu (CAMTA), foi proposto um modelo alternativo de produção da palma, consorciado em sistemas agroflorestais (SAF). Os SAF consistem no cultivo de espécies florestais, combinadas a culturas agrícolas e criação animal para exploração das interações ecológicas e econômicas dos seus diferentes componentes (Albrecht & Kandji, 2003). Dentro deste contexto, foram instaladas três unidades demonstrativas (UDs) no município de Tomé-Açu (PA) que atualmente é um dos principais pólos produtores de palma de óleo e também tradição de plantios de SAF na região.

O projeto alternativo de cultivo de palma de óleo em SAF tem ênfase na produção diversificada com grande preocupação principalmente com a qualidade ambiental (Kato et al., 2011) em moldes agroecológicos. A produção em moldes agroecológicos pode ser explicada como a aplicação dos princípios e conceitos da ecologia integrando conhecimentos de agronomia, economia e sociologia (Altieri, 1989; Gliessmann, 2001). Neste contexto, os SAF são sistemas produtivos excelentes para conservação dos recursos naturais locais, pois fornecem alimento e energia, recuperam áreas degradadas, preservam e resgatam recursos hídricos, recompõem a biodiversidade do solo, da flora e da fauna e contribuem enormemente para que o equilíbrio ecológico do ecossistema seja restabelecido (Didonet, 2016).

Para entender a dinâmica do carbono em cultivos de palma de óleo consorciados a SAF com diferentes composições de espécies é necessário que sejam monitorados o máximo de variáveis que influenciam no ciclo biogeoquímico deste nutriente. O ciclo biogeoquímico do C envolve várias fontes de entrada e saída deste nutriente, podendo ser influenciado por fatores bióticos e abióticos alterando a dinâmica deste em um agroecossistema.

O efluxo de CO₂ do solo consiste no principal fluxo de carbono de ecossistemas sofrendo influência de variação sazonal, temperatura do solo, umidade do solo, atividade

microbiana, produção e respiração de raízes finas e produção e estoque de serapilheira no solo (Ryan & Law, 2005). A disponibilidade de água no solo para quebra das moléculas durante o metabolismo microbiano influencia na respiração microbiana do solo, fonte de CO₂ para atmosfera, desde que o solo não esteja saturado e possibilite a presença de oxigênio para utilização dos microrganismos aeróbicos do solo a maior parte que compõe a biomassa microbiana ativa do solo.

À medida que a biomassa microbiana se torna mais eficiente, menos carbono é perdido como CO₂ pela respiração e uma fração significativamente de carbono e nitrogênio é incorporada no solo via microrganismos (Insam & Domsch, 1988). A taxa de respiração ou metabolismo microbiano mais elevado pode ser desejável ou não, pode indicar tanto distúrbio, como alto nível de produtividade do ecossistema, devendo ser analisada em cada contexto (Islam & Weil, 2000). As variáveis microbiológicas avaliadas separadamente podem levar a interpretação errônea da dinâmica de nutrientes pela biomassa microbiana, assim é importante avaliar razões como o quociente metabólico que representa a razão entre o que é liberado em relação ao que tem disponível na biomassa microbiana do solo.

As raízes finas e a produção de serapilheira são responsáveis pela dinâmica, ciclagem e qualidade da matéria orgânica do solo (MOS), sendo componentes importantes da produção primária líquida acima e abaixo do solo. O metabolismo das plantas (Hogberg et al., 2001) ou a decomposição de matéria orgânica lábil é uma importante fonte do efluxo de CO₂ do solo (Trumbore, 2000; Giardina & Ryan 2002; Giardina et al., 2004). O estudo da produção e estoque de serapilheira é importante para o entendimento de que forma está sendo metabolizado o material orgânico produzido no ecossistema, ocorrendo maior deposição durante o período de menor precipitação pluviométrica pela abscisão das folhas mais velhas pelo estresse hídrico e menor decomposição pelo estresse hídrico também dos microrganismos decompositores. No período de maior precipitação pluviométrica há menor produção de serapilheira, mas diminui o estoque de serapilheira no solo pela atividade e decomposição de microrganismos.

Nos solos da Amazônia, com baixa fertilidade natural, os agroecossistemas dependem da sua capacidade de manter ou promover a ciclagem e disponibilidade de nutrientes às plantas para manterem sua sustentabilidade, principalmente por meio do manejo da MOS. A MOS é um importante reservatório de C e N terrestre (Swift, 2001). Práticas de manejo inadequadas, cultivo intensivo e desmatamento alteram a dinâmica da matéria orgânica lábil e, conseqüentemente, reduções drásticas no acúmulo de C e N no solo.

No contexto da agricultura familiar amazônica, o cultivo de palma de óleo em SAF com moldes agroecológicos precisa ser melhor avaliado, a fim de consolidá-lo como sistema agrícola sustentável para a região. Por isso, o estudo do efluxo de CO₂ do solo, fatores bióticos e abióticos, bem como sua relação com a ciclagem e estoque de carbono e nitrogênio no solo e na serapilheira, é indispensável para uma avaliação consistente da viabilidade ambiental deste sistema. Assim objetivou-se com este trabalho avaliar a dinâmica do carbono do solo em SAF com palma de óleo na Amazônia Oriental.

REFERÊNCIAS

- ALBRECHT, A.; KANDJI, S.T. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 99, p. 15-27, 2003.
- ALTIERI, M. A. Agroecologia: as bases científicas da agricultura alternativa. 2. ed. Rio de Janeiro: PTA- FASE, 1989. 240 p.
- DIDONEt, A. D.. **Sistemas agroflorestais: segurança alimentar, produtos e serviços associados** 1. ed. atual. Santo Antônio de Goiás : Embrapa Arroz e Feijão, 2015. 24 p
- GIARDINA, C.P.; BINKLEY, D.; RYAN, M.G.; FOWNES, J.H.;SENOCK, R.S. Belowground carbon cycling in a humid tropical forest decreases with fertilization. *Oecologia*, v. 139, p. 545–550, 2004.
- GIARDINA, C.P.; RYAN M.G. Evidence that decomposition rates of organic carbon in mineral soil do not vary with temperature. *Nature*, v. 404, p. 858–861, 2000.
- GLIESSMANN, S. R. **Agroecologia: processos ecológicos em agricultura sustentável**. 2. ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001. 658 p.
- HOGBERG, P.; NORDGREN, A.; BUCHMANN, N.; TAYLOR, A.F.S.; EKBLAD, A.; HOGBERG, M. N; et al. Large-scale forest girdling shows that current photosynthesis drives soil respiration. *Nature*, v. 411, p. 789–792, 2001.
- INSAM, H.; DOMSCH, K. H. Relationship between soil organic carbon and microbial biomass on chronosequences of reclamation sites. *Microbial Ecology*, v. 15, p. 177-188, 1988.
- ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh. *Agriculture Ecosystems and Environment*, v. 79, p. 9-16, 2000.
- KATO, O. R.; VASCONCELOS, S. S.; CAPELA, C. J.; MIRANDA, I. S.; LEMOS, W. P.; MAUÉS, M. M.; AZEVEDO, R.; CASTELLANI, D.C.; THOM, G. Projeto dendê em sistemas agroflorestais na agricultura familiar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS AGROFLORESTAIS, 8, 2011, Belém. **Anais...** SBSAF: Embrapa Amazônia Oriental: UFRA : CEPLAC : EMATER : ICRAF, 2011. CD-ROM.

RYAN, M.G.; LAW, B. E. Interpreting, measuring, and modeling soil respiration. **Biogeochemistry**, v. 73, p. 3-27, 2005.

SWIFT, R.S. Sequestration of carbon by soil. **Soil Science**, v. 166, p. 858-871, 2001.

TRUMBORE, S. Age of soil organic matter and soil respiration: radiocarbon constraints on belowground C dynamics. **Ecological Applications**, v. 10, p. 399-411, 2000.

2. EFLUXO DE CO₂ DO SOLO EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS COM PALMA DE ÓLEO NA AMAZÔNIA ORIENTAL

RESUMO

O solo é um dos maiores reservatórios de carbono em agroecossistemas, portanto a liberação de dióxido de carbono (CO₂) para a atmosfera é um componente importante no ciclo do carbono (C), sendo um índice muito importante para caracterizar a dinâmica do carbono em sistemas de produção. Dependendo do impacto do manejo dos agroecossistemas no solo, podem-se aumentar as taxas de decomposição da matéria orgânica que se torna fonte de CO₂ para atmosfera. Assim, objetivou-se com este trabalho avaliar a variação temporal do efluxo de CO₂ do solo em sistemas agroflorestais (SAF) com palma de óleo e em uma floresta sucessional localizados em Tomé-Açu-PA. As medições foram realizadas durante onze meses com uso de um sistema portátil que analisa o fluxo de gás por ondas do infravermelho (IRGA) LI-6400. Os sistemas avaliados foram dois SAF: mais diversificado (SAF+) e menos diversificado (SAF-) e uma floresta sucessional (FS). O efluxo de CO₂ do solo foi maior no período de maior umidade do solo (fevereiro a julho) maior precipitação pluviométrica, maior produção de raízes finas (fevereiro a março), maior atividade microbiana e maior perda de CO₂ via respiração microbiana. O sistema SAF-, apesar de ter apresentado maior teor anual de carbono da biomassa microbiana, observou-se que é o sistema que mais perde C-CO₂ por meio da atividade microbiana, teve menor estoque de raízes finas e menor retorno de C para o solo via serapilheira produzida. No SAF+ observou-se menor perda de C-CO₂, maior estoque de raízes finas, menor temperatura do solo e maior retorno de C via serapilheira em relação ao SAF-. Sistemas agroflorestais com maior diversidade de espécies na sua composição, consorciados com a palma de óleo, se mostram como uma alternativa viável de produção da palma na região amazônica para diminuir as emissões de CO₂ para atmosfera e acumular C em compartimentos importantes como raízes e deposição de C via serapilheira.

PALAVRAS-CHAVE: Dendê. Respiração do solo. Variáveis bióticas e abióticas. Diversidade de espécies.

ABSTRACT

Soil is one of the largest reservoirs of carbon in agroecosystems, so the release of carbon dioxide (CO₂) into the atmosphere is an important component in the carbon cycle, being a very important index to characterize the dynamics of carbon in production systems. Depending on the impact of the management of agroecosystems on the soil, the rates of decomposition of the organic matter that becomes the source of CO₂ into the atmosphere can be increased. The objective of this work was to evaluate the temporal variation of soil CO₂ efflux in agroforestry systems (AFS) with oil palm and in a successional forest. The measurements were for eleven months using a portable system that analyzes the flow of infrared gas (IRGA) LI-6400. The evaluated systems were two AFS: more diversified (AFS+) and less diversified (AFS-) and a successional forest (SF) in Tome-Açu city. Soil CO₂ efflux was higher in the period of higher soil moisture (February to July), higher rainfall precipitation, higher fine root production (February to March), higher microbial activity and greater CO₂ loss through microbial respiration. The AFS- system, despite having a higher annual carbon content in the microbial biomass, showed to be the system that loses the most C-CO₂ by means of microbial activity, has a lower stock of fine roots and a lower return of C to the soil via litter produced. In AFS+ it was observed a lower loss of C-CO₂, higher stock of fine roots, lower soil temperature and higher C return via litter compared to SAF-. Agroforestry systems with a greater diversity of species in their composition, consorciated with the oil palm, are shown as a viable oil palm production alternative in the Amazon region to reduce CO₂ emissions to atmosphere and accumulate C in important compartments such as roots and deposition of C via litter.

Keywords: Oil palm. soil respiration. Biotic and abiotic variables. Diversity of species.

2.1 Introdução

A palma de óleo (*Elaeis guineensis* Jacq., família Arecaceae) configura-se como um componente agrícola importante para a região Amazônica, especialmente no estado do Pará, que se destaca como o principal produtor do Brasil, respondendo por 57,19% da área total plantada e 85,18% da produção (Bentes & Homma, 2016). Embora represente um dos principais sistemas de produção agrícola na região, o cultivo de palma de óleo tem sido muito criticado em relação aos seus impactos ambientais em pólos de produção como Indonésia, principalmente em moldes tradicionais de monocultivo (Ramdani & Hino, 2013; Kotowaska et al., 2015).

A produção de palma de óleo integrada a sistemas agroflorestais (SAF) pode representar uma estratégia viável na Amazônia de produção sustentável da cultura. Neste contexto, por meio da parceria entre Natura Inovação e Tecnologia de produtos, Empresa

Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Amazônia Oriental), Financiadora de estudos e projetos (FINEP) e Cooperativa Agrícola Mista de Tomé-Açu (CAMTA), foi proposto um modelo alternativo de produção da palma, consorciado com sistemas agroflorestais (SAF).

Estima-se que a conversão de florestas tropicais em monocultivo de palma de óleo na Indonésia, no período de doze anos, ocasionaram taxas anuais de emissão de dióxido de carbono (CO₂) para atmosfera de ~ 4,9 milhões tCO₂ ano⁻¹ (Ramdani & Hino, 2013), resultante da retirada da floresta e da dinâmica do carbono neste agroecossistema. Em SAF com alta diversidade de espécies, com palma de óleo jovem (três anos) na Amazônia observou-se maior emissão de CO₂ que um sistema de menor diversidade de espécies (Silva et al., 2016). Assim, há necessidade de se entender melhor o impacto de sistemas agroflorestais consorciados a palma de óleo sobre as emissões ou efluxo de CO₂ do solo e as variáveis que influenciam na sua dinâmica anual.

O efluxo de CO₂ do solo resulta da respiração autotrófica e heterotrófica e corresponde ao principal fluxo de carbono de ecossistemas terrestres para a atmosfera (Ryan & Law, 2005). Estudos da dinâmica do carbono em agroecossistemas são essenciais para o entendimento do seu potencial de retroalimentação da emissão de CO₂ para a atmosfera (Straaten et al., 2009).

O efluxo de CO₂ do solo é influenciado por diversos fatores abióticos e bióticos (Raich & Schlesinger, 1992). A disponibilidade de água e a temperatura do solo são os principais fatores abióticos que controlam o efluxo de CO₂ do solo (Vincent et al., 2006). A produção e respiração de raízes são responsáveis por 35-80% do carbono fixado via fotossíntese no solo (Davidson et al. 2002; Ryan et al. 2005) e são fonte de CO₂ do solo para atmosfera via respiração e associação com micorrizas principalmente em condições ambientais favoráveis (Hanson et al. 2000; Hogberg et al. 2001; Zanchi et al., 2009).

O efluxo de CO₂ do solo também está associado à respiração heterotrófica de comunidades microbianas na decomposição do material orgânico lábil para suprimento de energia (Giardina et al., 2004). A quantidade de CO₂ liberado pela respiração de microrganismos demonstra a atividade metabólica da população microbiana do solo (Zibilske, 1994), no entanto taxas de respiração acelerada podem indicar tanto um distúrbio, como um nível de produtividade do ecossistema (Islam & Weil, 2000). A taxa de deposição de matéria orgânica na superfície do solo via produção de serapilheira (*litterfall*) contribui para a manutenção de condições de temperatura e umidade favoráveis à atividade microbiana relacionada à decomposição em ecossistemas florestais (Peña et al., 2005; Davidson & Janssens, 2006).

Para entendimento dos impactos de SAF com palma de óleo nas variações do efluxo de CO₂ do solo se faz necessário o monitoramento desta variável e de fatores abióticos e bióticos controladores da sua dinâmica com influência da sazonalidade climática. Também se faz importante a influência da diversidade de espécies dos SAF sobre o efluxo de CO₂ do solo. A hipótese lançada com este trabalho foi que o SAF mais diversificado apresenta efluxo de CO₂ e variáveis controladoras mais próximas da floresta sucessional, em relação ao sistema menos diversificado. Neste contexto, objetivou-se com este trabalho avaliar o efluxo de CO₂ do solo em SAF com palma de óleo na Amazônia Oriental e em uma floresta sucessional de 18 anos.

2.2 Material e Métodos

2.2.1 Área de estudo

O estudo foi realizado no período de fevereiro de 2015 a novembro de 2016, em área de agricultor familiar (2° 40' 54''S e 48° 16' 11'' W), no âmbito do Projeto: “Dendê em sistemas agroflorestais na agricultura familiar”, na Unidade Demonstrativa II (UDII), no município de Tomé-Açu, localizado no nordeste do Estado do Pará, Brasil (Figura 1). O clima do município é tropical quente e úmido do tipo Ami, pela classificação de Baena & Falesi (1999). Segundo dados da estação agroclimatológica pertencente à Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), situada à latitude de 02° 31' Sul, longitude 48° 22' Oeste de Greenwich e 45 m de altitude, no período de 1985 a 2015, a precipitação média anual foi 2.439 mm e temperatura média do ar 26,6 °C. A estação mais chuvosa, normalmente vai de dezembro a junho, e a menos chuvosa, de julho a novembro. Os solos predominantes no município são Latossolos Amarelos segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS (EMBRAPA, 2013) e a textura da área de estudo é franco-arenosa nos primeiros 20 cm (Carvalho, 2011).

Uma floresta sucessional em pousio há aproximadamente 13 anos, que vinha sendo utilizada com moldes de agricultura de subsistência, plantio de culturas alimentares (arroz – *Oryza sativa*, mandioca – *Manihot esculenta*, milho – *Zea mays* e feijão-caupi – *Vigna unguiculata*) e preparo de área com queima, foi submetida a preparo de área com corte e trituração da vegetação para implantação de SAF com diferentes composições de espécies (Tabela 1) e consorciadas à cultura da palma de óleo, em setembro e outubro de 2007. Os dois SAF com palma de óleo foram nomeados conforme a diversificação de espécies de cada

sistema, sendo: sistema agroflorestal mais diversificado (SAF+) e sistema agroflorestal menos diversificado (SAF-) (Tabela 1). A palma de óleo foi plantada em linhas duplas (7,5 x 9,0 m) e entre elas as linhas de plantio das espécies consorciadas nos SAF (Figura 2a) compostas por espécies herbáceas, arbóreas e arbustivas no sistema SAF+ (Figura 2c e 4) e espécies leguminosas arbóreas no sistema SAF- (Figura 2B e 4). Para fins de comparação com um sistema natural foram coletadas amostras em uma floresta sucessional (FS) de aproximadamente 13 anos de pousio. Foram realizadas roçagens na projeção da copa da palma quatro vezes ao ano, e poda anual de limpeza (folhas velhas e danificadas). Nos SAF foi realizada roçagem da vegetação espontânea quatro vezes ao ano e duas podas das culturas consorciadas (*Gliricidia sepium*, *Inga edulis* e *Theobroma cacao*) com deposição do material nas linhas de plantio dos SAF.

2.2.2 Delineamento experimental

Foram estabelecidas quatro parcelas amostrais aleatoriamente de 900 m² (30 x 30 m) em todas as áreas experimentais (Figura 2A). Nos SAF as parcelas foram delimitadas a fim de incluir uma linha dupla de palma de óleo no centro da parcela e as linhas de plantio das espécies que compõe o SAF nas laterais da parcela (Figura 2A). Nos SAF, foram selecionados cinco pontos de amostragem/medição: 0,6 m da base da palma de óleo; 2,0 m da base da palma de óleo; caminho de colheita; empilhamento de folhas de poda da palma de óleo e linha de plantio SAF (Figura 2B e 2C). Estes pontos de amostragem/medição foram escolhidos por que alguns trabalhos já realizados em plantios de palma de óleo, já verificaram que são importantes que se sigam estes pontos amostrais de maior representatividade de diferenças de manejo do cultivo da palma de óleo, principalmente em relação à entrada de material orgânico no sistema e compactação do solo (Frazão et al., 2013; Ramos et al., 2017). Na floresta sucessional foram escolhidos quatro pontos aleatórios para coleta/mensuração das variáveis analisadas.

2.2.3 Amostragem e análises do solo

Em cada tipo de vegetação foram coletadas, com trado, amostras de solo para as análises microbiológicas cada uma composta de cinco subamostras simples, na profundidade 0,1 m, em maio e outubro de 2015, na estação mais chuvosa e menos chuvosa,

respectivamente. Nos SAF, as amostras foram coletadas de acordo com a configuração espacial que melhor representa a variabilidade de manejo nas áreas: 0,6 m da base da palma de óleo; 2,5 m da base da palma de óleo; caminho de colheita; empilhamento de folhas de poda da palma de óleo e linha de plantio SAF (Figura 2b e 2c). Na floresta sucessional foram coletadas quatro amostras de solo, cada uma composta de cinco subamostras simples, na profundidade 0,1 m.

O carbono da biomassa microbiana (CBM) foi determinado pelo método fumigação-extração segundo Vance et al. (1987) com clorofórmio (CHCl_3) isento de etanol durante 48 h em local escuro. A determinação da concentração de C nos extratos fumigados e não-fumigados foi realizada por dicromatometria e a titulação com sulfato ferroso amoniacal 0,033 M. Os resultados de carbono da biomassa microbiana do solo foram expressos em mg C kg^{-1} solo seco.

A respiração basal do solo (RB) foi determinada pela captura do C-CO_2 liberado durante o processo de respiração microbiana por um período de dez dias de incubação na presença de NaOH, método este preconizado por Jenkinson & Powlson (1976). A quantificação ocorreu por meio da titulação do extrato pelo HCl na presença de BaCl_2 . Os resultados da respiração basal do solo foram expressos em $\mu\text{g g}^{-1}$.

O quociente metabólico do solo ($q\text{CO}_2$) foi calculado pela razão entre a taxa de respiração basal do solo por unidade de carbono da biomassa microbiana do solo conforme descrito Anderson & Domsch (1993). Os resultados foram expressos em $\mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ BMS-C h}^{-1}$.

As mensurações do fluxo de CO_2 do solo foram realizadas mensalmente entre fevereiro de 2015 a novembro de 2016, no intervalo entre 7:30 e 13:00 horas (horário local), com analisador de gás por infravermelho portátil (modelo LI- 6400, LI-COR, Lincoln, NE, USA) acoplado a uma câmara de respiração do solo. Durante a medição, a câmara foi acoplada a uma base cilíndrica de PVC, com altura de 0,75 m, inserida no solo a aproximadamente 0,25 m de profundidade. Em cada SAF foram instaladas 5 bases por parcela amostral (vinte/sistema), que permaneceram no mesmo local durante todo o experimento, para minimizar perturbações ao solo.

Amostras de solo para determinação da umidade gravimétrica (Embrapa 1997) foram coletadas paralelamente à medição de fluxo de CO_2 , com um trado de sonda introduzido a 0,1 m de profundidade, a cerca de um metro de distância das bases utilizadas para mensuração do fluxo de CO_2 do solo. Após as coletas, as amostras foram acondicionadas em frascos plásticos hermeticamente vedados, até o procedimento de determinação da massa úmida

(condições de campo) e massa seca em estufa a 105°C por 24 horas em balança analítica. A temperatura do solo foi mensurada a 0,1 m de profundidade, com um sensor de temperatura (Li-6000- 09 TC), acoplado ao aparelho LI-COR 6400, medida realizada simultaneamente com as mensurações do efluxo de CO₂ do solo em todos os pontos de coleta a uma distância de 0,1 m das bases de coleta.

2.2.4 Coleta e processamento de serapilheira

Para avaliação da produção de serapilheira (*litterfall*) foram instalados em janeiro de 2015 cinco coletores por parcela, em cada sistema avaliado. Os coletores foram construídos com arame galvanizado de bitola 12, com área de coleta de 1 m x 1 m, fundo em tela de nylon (malha de 1 mm x 1 mm) 50 cm acima do solo. A serapilheira interceptada pelos coletores foi coletada mensalmente de fevereiro de 2015 a janeiro de 2016.

Após cada coleta, as amostras foram acondicionadas em sacos de papel e secas em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C durante 48 horas, no Laboratório de Análise de Sistemas Sustentáveis da Embrapa Amazônia Oriental, para a retirada do excesso de umidade. Após a retirada do excesso de umidade, em laboratório, as amostras de serapilheira produzida foram classificadas em cinco frações: folhas+pecíolo, galhos < 1 cm, material reprodutivo (frutos, sementes, flores) e miscelânea (todo material que não se enquadrou nas outras frações), que fazem parte da serapilheira fina. Após triado, o material foi acondicionado em estufa à temperatura de 65°C durante 72 horas e posteriormente pesado em balança analítica com precisão de 0,01g.

2.2.5 Produção de raízes finas

A produção de raízes finas (diâmetro ≤ 2 mm) foi estimada pela avaliação do crescimento radicular em sacos telados (*ingrowth cores*) (Cuevas & Medina, 1988; Valverde-Barrantes et al. 2007), também chamados de armadilhas. Sacos cilíndricos com 0,1 m de altura e 0,55 m de diâmetro foram construídos manualmente com tela de poliestireno (malha de 2 mm x 3 mm). Os sacos foram preenchidos com solo coletado, nos primeiros 0,1 m do perfil do solo, em área próxima às parcelas experimentais. Antes do preenchimento dos sacos, o solo foi passado em peneiras com malhas de 4 e 2 mm, nesta seqüência, para a retirada manual dos resíduos de raízes. O preenchimento dos sacos foi feito de tal forma que a

densidade do solo se aproximasse daquela do solo intacto. Foram instaladas dezesseis armadilhas em cada parcela de cada sistema avaliado, a uma distância de 0,1m de distância dos anéis de mensuração do efluxo de CO₂ do solo, na profundidade correspondente à altura das armadilhas (0,1 m), resultando em 64 armadilhas por sistema. Após 2 meses, as armadilhas foram coletadas e em seguida o seu conteúdo era acondicionado em sacos de polietileno e mantidos sob refrigeração 4°C, para que as armadilhas fossem reutilizadas no mesmo local a qual foram retiradas. Esse procedimento de instalação e coleta foi repetido cinco vezes, de abril de 2015 a janeiro de 2016.

O processamento em laboratório consistiu inicialmente na separação manual das raízes e do solo. Para a separação, as amostras foram lavadas com água corrente em duas peneiras com malhas de 2 e 1 mm, o que permitiu recuperar aproximadamente 100% das raízes finas, visto que uma quantidade desprezível de raízes passava pela peneira de 1 mm. Em seguida, com o auxílio de pinças, as raízes finas ≤ 2 mm foram separadas dos demais resíduos. As raízes foram acondicionadas em sacos de papel e secas em estufa a 65 °C por 72h, em seguida pesadas em balança analítica ($\pm 0,0001$ g) para obtenção da massa seca.

2.2.6 Análise estatística

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado. Os dados foram submetidos ao teste de normalidade dos dados, e quando não apresentaram distribuição normal foram transformados (Log 10 e exponencial). As variáveis analisadas (efluxo de CO₂ do solo, umidade gravimétrica do solo, produção de raízes finas e produção de serapilheira) foram submetidas à análise de variância (ANOVA, $p < 0,05$) de dois fatores (sistemas e períodos de coleta) com medidas repetidas no tempo. Para comparação das médias foi realizado o teste Tukey ($p < 0,05$).

Para as análises microbiológicas foi utilizado um delineamento inteiramente casualizado em arranjo fatorial 3 x 2 (três tratamentos x dois períodos). Com isso, os resultados foram submetidos ao teste de normalidade e posteriormente a análise de variância (ANOVA). As médias foram comparadas pelo teste Tukey ($p < 0,05$) quando houve diferença significativa. Foi utilizado para análise estatística e geração de gráficos o programa SigmaPlot 11.0 (Systat Software, San Jose, CA, 2008).

A análise estatística foi realizada utilizando as médias ponderadas de cada sistema, considerando o percentual de representatividade de cada local de amostragem.

2.3 Resultados

O efluxo de CO₂ do solo teve efeito da interação entre os meses de coleta x tratamentos avaliados ($p < 0,001$) (Figura 5B). O período de maior efluxo de CO₂ do solo (fevereiro a junho) foi o de maior umidade do solo e o de maior precipitação pluviométrica (Figura 5D e 5A, respectivamente). Os meses de menor efluxo de CO₂ do solo foram agosto, setembro, outubro e novembro (Figura 5B). Nestes mesmos meses foram observados os menores índices pluviométricos e maiores temperaturas do solo (5A e 5C).

No mês de março o efluxo de CO₂ do solo no SAF- ($6,07 \pm 1,44 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) foi maior do que o observado no SAF+ ($3,00 \pm 0,82 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e na FS ($2,18 \pm 1,09 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (Figura 5B). O efluxo de CO₂ do solo nos meses de abril e maio no SAF- ($6,17 \pm 0,84$ e $5,69 \pm 1,44 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectivamente) foram maiores do que na FS ($3,56 \pm 0,58$ e $3,73 \pm 1,01 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectivamente) (Figura 5B). Nos meses de outubro, novembro e dezembro o efluxo de CO₂ do solo na FS ($3,10 \pm 0,53$; $3,04 \pm 0,69$ e $6,94 \pm 0,96 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectivamente) foram maiores do que observado no SAF- ($1,60 \pm 0,39$; $1,44 \pm 0,25$ e $3,46 \pm 0,65 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectivamente) (5B). Não houve diferença significativa entre os tratamentos para o efluxo anual de C do solo (Figura 6A).

A temperatura do solo teve efeito da interação entre os meses de coleta x tratamentos avaliados ($p < 0,001$) (Figura 5C). Nos meses de setembro, outubro, novembro e dezembro de 2015 o solo apresentou as maiores temperaturas do ano, variando entre $26,77 \pm 1,48$ (setembro) e $27,60 \pm 1,35$ °C (dezembro) (Figura 5C). Nos meses de fevereiro, março, julho e novembro observaram-se maiores temperaturas do solo nos SAF, em relação à FS (Figura 5C). O sistema SAF- ($27,16 \pm 0,08$ °C) apresentou maior média anual de temperatura do solo, seguida pelo SAF+ ($26,12 \pm 0,14$ °C) e a menor média anual foi encontrada na FS ($25,33 \pm 0,06$ °C) (Figura 6B).

A umidade gravimétrica teve efeito da interação entre os meses de coleta x tratamentos avaliados ($p=0,007$) (Figura 5D). Nos meses de março ($26,86 \pm 2,52$ %) e maio ($27,25 \pm 1,55$ %) observou-se maior umidade do solo, em relação aos demais meses do ano (Figura 5D). A umidade do solo nos meses de março e junho foi maior na FS ($29,49 \pm 2,49$ e $25,36 \pm 1,27$ %), em relação aos SAF (SAF+: $25,28 \pm 1,58$ e $22,94 \pm 0,57$ %; SAF-: $25,82 \pm 0,81$ e $22,98 \pm 2,20$ %, respectivamente) (Figura 5D).

Houve efeito da interação entre período de coleta x tratamentos no CBM ($p < 0,001$) (Figura 7A). O teor de CBM foi maior no período menos chuvoso (Outubro_2015) em relação ao mais chuvoso (Maio_2015) (Figura 7A), em todos os tratamentos. Na coleta de Maio_2015

o teor de CBM foi maior na FS ($150,36 \pm 10,71$ mg C kg⁻¹ solo seco), seguida pelo SAF+ ($102,53 \pm 4,30$ mg C kg⁻¹ solo seco) e menor no SAF- ($67,16 \pm 1,63$ mg C kg⁻¹ solo seco) (Figura 7A). Na coleta de Outubro_2015 o teor de CBM foi maior na FS e no SAF- ($458,92 \pm 73,34$ e $222,81 \pm 6,27$ mg C kg⁻¹ solo seco) em relação ao SAF+ ($443,03 \pm 33,79$ mg C kg⁻¹ solo seco) (Figura 7A). Anualmente o teor de CBM foi maior na FS e no SAF- ($304,64 \pm 32,16$ e $255,09 \pm 16,35$ mg C kg⁻¹ solo seco, respectivamente), em relação ao sistema SAF+ ($162,67 \pm 3,85$ mg C kg⁻¹ solo seco) (Figura 8A). A atividade microbiana (RB) só teve efeito do período de coleta, sendo maior em todos os sistemas na coleta de Maio_2015 (Figura 7B).

Houve efeito da interação período de coleta x tratamentos no qCO_2 ($p < 0,001$) (Figura 7C). Na coleta de Maio_2015, em todos os sistemas, o qCO_2 foi maior em relação a coleta de Outubro_2015 (Figura 7C). Na coleta de Maio_2015 o SAF- teve maior qCO_2 ($0,48 \pm 0,03$ mg C-CO₂ g⁻¹ BMS-C h⁻¹), seguido do SAF+ ($0,45 \pm 0,06$ mg C-CO₂ g⁻¹ BMS-C h⁻¹) e menor na FS ($0,36 \pm 0,06$ mg C-CO₂ g⁻¹ BMS-C h⁻¹) (Figura 7C). Anualmente o qCO_2 foi maior no SAF-, seguido do SAF+ e menor na FS ($3,80 \pm 0,26$; $2,71 \pm 0,30$ e $1,48 \pm 0,24$ mg C-CO₂ g⁻¹ BMS-C h⁻¹) (Figura 8C).

A produção de serapilheira total (*litterfall*) teve efeito da interação entre meses de coleta x tratamentos ($p < 0,001$) (Figura 9B). O mês de maior produção de serapilheira, independentemente do tratamento, foi o mês de maio ($1,05 \pm 0,94$ Mg ha⁻¹) (Figura 9B). Nos meses de janeiro, fevereiro, abril, junho, agosto, outubro, novembro e dezembro a FS teve maior produção de serapilheira, em relação aos SAF (Figura 9B). Nos meses de maio e setembro o SAF+ produziu ($0,91 \pm 0,28$ e $0,71 \pm 0,21$ Mg ha⁻¹) 78,72 e 71,83% a mais de serapilheira do que o SAF- ($0,17 \pm 0,03$ e $0,20 \pm 0,06$ Mg ha⁻¹) (Figura 9B). Na média anual de produção de serapilheira a FS ($12,67 \pm 0,84$ Mg ha⁻¹) produziu mais serapilheira, seguida pelo SAF+ ($5,35 \pm 1,08$ Mg ha⁻¹) e com menor produção o SAF- ($2,20 \pm 0,32$ Mg ha⁻¹) (Figura 9C).

A produção de raízes finas teve efeito da interação bimestres x tratamento ($p < 0,001$) (Figura 10B). No primeiro bimestre (Fev-Mar) e no último (Dez-Jan) se observou maior produção de raízes finas (Figura 10B), e estes bimestres caracterizam-se como início e transição de precipitação pluviométrica (Figura 10A), respectivamente. No quarto (Ago-Set) e sexto (Dez-Jan) bimestres a FS apresentou maior produção de raízes finas ($0,46 \pm 0,04$ e $0,64 \pm 0,03$ Mg ha⁻¹ bimestre⁻¹, respectivamente) do que o SAF+ ($0,21 \pm 0,02$ e $0,31 \pm 0,03$ Mg ha⁻¹ bimestre⁻¹, respectivamente) e o SAF- ($0,21 \pm 0,04$ e $0,35 \pm 0,03$ Mg ha⁻¹ bimestre⁻¹, respectivamente) (figura 10B). No terceiro (Jun-Jul) e quinto bimestre (Out-Nov) o SAF- produziu mais raízes finas ($0,38 \pm 0,01$ e $0,35 \pm 0,03$ Mg ha⁻¹ bimestre⁻¹, respectivamente) que o SAF+ ($0,120 \pm 0,02$ e $0,16 \pm 0,03$ Mg ha⁻¹ bimestre⁻¹, respectivamente) (Figura 10B). A FS teve

maior produção anual de raízes finas ($3,01 \pm 0,23 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), seguida pelo SAF- ($2,24 \pm 0,10 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e menor no SAF+ ($1,56 \pm 0,12 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) (Figura 11A). E também a FS estocou mais raízes finas ($2,26 \pm 0,04 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), seguida pelo SAF+ ($1,73 \pm 0,08 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e menor estoque no SAF- ($1,04 \pm 0,20 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) (Figura 11B).

2.4 Discussão

2.4.1 Efluxo de CO₂ do solo

A variação das médias de efluxo de CO₂ do solo encontradas neste estudo ($1,44$ a $8,33 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) estão compatíveis com valores relatados em outros trabalhos realizados em floresta tropical na Amazônia (Sotta et al. 2004; Sotta et al., 2006; Pinto-Júnior et al., 2009; Zanchi et al. 2009; Zanchi et al., 2012) e sistemas agroflorestais (Ramos, 2016; Silva et al., 2016). As maiores médias de efluxo de CO₂ do solo foram verificadas no período de maior produção de raízes finas, que provavelmente tiveram maior gasto de energia para crescimento e maior respiração liberando CO₂. Neste período, também se observou maior respiração ou atividade microbiana e maiores taxas de $q\text{CO}_2$ do solo. A maior produção de raízes finas, atividade microbiana e maior perda de C-CO₂ pela metabolização da biomassa microbiana do solo (BMS), neste período, explica o maior efluxo de CO₂ do solo dos tratamentos, pois este é resultante da respiração autotrófica das raízes e micorrizas, da respiração heterotrófica dos microrganismos do solo, bem como da liberação de CO₂ pela oxidação química do carbono proveniente da decomposição (Ryan & Law, 2005).

Em estudo realizado na Indonésia em monocultivo de palma de óleo e em uma floresta, observou-se que 54% na floresta e 72% no plantio de palma de óleo do efluxo de CO₂ mensurado foram provenientes da respiração heterotrófica que aumenta com a adição de serapilheira no solo (Hergoualc'h et al., 2017), evidenciando a importância da respiração microbiana como fonte de C-CO₂ para atmosfera.

A disponibilidade de água e a temperatura do solo são os principais fatores abióticos que controlam o efluxo de CO₂ do solo (Vincent et al., 2006). Neste estudo e em outros realizados na região amazônica em florestas e SAF verificou-se maior efluxo de CO₂ do solo no período mais chuvoso e maior umidade no solo (Sotta et al., 2004; Pinto-Júnior et al., 2009; Zanchi et al., 2009; Zanchi et al., 2012; Silva et al., 2016; Ramos, 2016), pois solos tropicais que apresentam umidade e temperatura elevadas, oferecem condições bastante

propícias para produção de CO₂ com condições favoráveis para decomposição da matéria orgânica, a respiração das raízes e a respiração microbiana.

O SAF- no período mais chuvoso teve maior efluxo de CO₂ do solo do que o SAF+ (março) e a FS (abril e maio), provavelmente devido à maior perda de C-CO₂ pela atividade da biomassa microbiana do solo que apresentou maior taxa de quociente metabólico (qCO_2) neste sistema, em relação aos demais tratamentos neste período. O qCO_2 representa a taxa de respiração específica da biomassa microbiana, expressa em quantidade de CO₂ liberado pela quantidade de carbono da biomassa microbiana ou comunidade microbiana em função do tempo (Anderson & Domsch, 1993). Neste sistema também houve uma coleta com maior produção de raízes finas (bimestre jun-jul), o que provavelmente também contribuiu para maior efluxo de CO₂ do solo neste sistema, pois a respiração autotrófica das raízes e micorrizas são responsáveis por parte do C-CO₂ liberado via respiração do solo (Ryan & Law, 2005). No mês de maio também houve poda das duas espécies que compõe esse SAF (*Gliricidia sepium* Jacq e *Inga edulis* Mart), provavelmente estimulando a produção de raízes finas em busca de nutrientes no solo para recomposição dos galhos e folhas removidos das plantas.

No período de menor precipitação (outubro a dezembro) observou-se maior efluxo de CO₂ do solo na FS, em relação ao SAF-. Este resultado pode estar relacionado à maior produção de raízes finas pela floresta no período menos chuvoso (bimestres: ago-set e dez-jan), em relação aos SAF. Como a FS neste período emitiu mais raízes finas, provavelmente teve maior efluxo de CO₂ via respiração autotrófica das raízes com gasto de energia para emissão de mais raízes finas pela vegetação. Os altos índices de crescimento de raízes finas nas camadas superficiais do solo de ecossistemas florestais, as quais concentram grande quantidade de matéria orgânica, representam um mecanismo estratégico de captura de nutrientes em solos de baixa fertilidade (Vogt et al., 1996; Laclau et al., 2004) e de água em situações de baixa disponibilidade hídrica (Blair & Perfecto 2001), como evidenciado neste estudo no período de menor umidade do solo e precipitação pluviométrica.

Em solos de turfa na Indonésia durante o ano de 2015, em condições de El Niño (coleta no mês de setembro), na floresta avaliada observou-se efluxo de CO₂ do solo 38% maior do que foi mensurado no monocultivo de palma de óleo (Swails et al., 2019), evidenciando que provavelmente em períodos de seca extrema a floresta tem maior ação da atividade microbiana liberando C-CO₂ para atmosfera. No mesmo período de menor precipitação pluviométrica na região amazônica também evidenciamos maior efluxo de CO₂ do solo na FS. No entanto, em relação ao efluxo de CO₂ total do solo nos solos de turfas na

Indonésia o monocultivo de palma de óleo apresentou efluxo de CO₂ do solo 22% maior do que o encontrado na floresta (Swails et al., 2019), enquanto que no nosso estudo em que a palma de óleo é consorciada com SAF não houve diferença significativa em relação ao efluxo de C-CO₂ entre os SAF e a FS, evidenciando que estes sistemas podem ser uma alternativa viável de substituição do monocultivo de palma de óleo para diminuir as emissões de CO₂ do solo, principalmente o sistema mais diversificado.

2.4.2 Variáveis abióticas e microbiológicas analisadas

Altas taxas de deposição de matéria orgânica na superfície do solo influenciam na manutenção de condições de temperatura e umidade favoráveis à atividade microbiana relacionada à decomposição em ecossistemas florestais (Davidson et al., 2000; Peña et al., 2005; Davidson & Janssens, 2006). Neste estudo observamos que a diferença na deposição de serapilheira produzida pelos tratamentos, influenciou nas variáveis microbiológicas e abióticas mensuradas, observando-se maior controle nos tratamentos com maior quantidade de indivíduos na área, maior diversidade de espécies e maior deposição de serapilheira.

As médias de umidade do solo observadas neste estudo são compatíveis com os valores encontrados por Santiago et al. (2013) e Silva et al. (2016) na mesma área experimental deste artigo e por Sotta et al. (2006) em áreas de floresta em Caxiuanã, Pará. No período de maior precipitação pluviométrica (jan-jun) observaram-se as maiores médias de umidade do solo (março e maio) nos tratamentos avaliados. A umidade do solo foi maior na FS nos meses de março e julho, em relação aos SAF, este resultado provavelmente está relacionado à maior deposição de serapilheira produzida na FS nos meses avaliados, em relação aos SAF com palma, assim promovendo maior manutenção e conservação da umidade do solo, pois reduz a perda de água por evaporação (Tapia-Coral et al., 2005).

As médias de temperatura do solo observadas neste estudo estão de acordo com outro estudo realizado na mesma área experimental (Silva et al., 2016) e outros estudos desenvolvidos na região amazônica (Sotta et al. 2004; Sotta et al. 2006; Zanchi et al. 2009). As maiores médias de temperatura do solo foram observadas no período menos chuvoso (set. a dez.) com temperatura variando entre 26,77 e 27,60 °C, este resultado está relacionado ao menor regime pluviométrico neste período, pois este exerce grande influência na incidência de radiação solar à superfície, portanto, de grande contribuição para a variabilidade da temperatura do solo no decorrer do ano (Carneiro et al., 2014). Segundo Carneiro et al. (2014) a presença de água no solo afeta o fluxo de calor, ou seja, a presença de umidade no solo

modifica a amplitude de temperatura ao nível de superfície por ocasião da evaporação, controlando as variações de temperatura no solo.

Nos meses de fevereiro, março, julho e novembro a temperatura do solo nos SAF, foi maior do que observado na FS ($\approx 1,31$ e $1,52$ °C, SAF+ e SAF-, respectivamente), provavelmente houve influência do horário de coleta nestes resultados, pois nestes meses a coleta iniciou às 7:30h na FS, período de menor incidência de radiação solar no solo e finalizando próximo às 13h nos SAF. Nos horários de 11 às 13h há maior incidência de radiação solar global no solo, pelo fato de que a radiação solar penetra no dossel de florestas com maior intensidade, nesses horários, em virtude da inclinação dos raios solares (Carneiro et al., 2014). Em monocultivo de palma de óleo em solos de turfa na Indonésia também observou-se maior temperatura em relação a floresta ($+0,9$ °C) no período mais seco (Swails et al., 2019).

A média anual da temperatura do solo foi maior no SAF-, seguida pelo SAF+ e menor na FS. Silva et al. (2016) também encontrou maior temperatura do solo no SAF-, durante outro experimento na mesma área de estudo. Possivelmente este resultado foi observado pelo menor número de indivíduos neste SAF em relação aos demais tratamentos (Tabela 1). Quanto menor o número de indivíduos em um agroecossistema e menor cobertura do solo, geralmente, há maior absorção de radiação incidente (Sampaio et al. 2007) e conseqüentemente maior temperatura no solo. A cobertura vegetal auxilia na retenção de água, reduz a evaporação e mantém temperaturas mais amenas no solo (Oliveira et al. 2005). A serapilheira desempenha funções relevantes, tais como a redução da perda de água por evaporação e flutuação da temperatura na superfície do solo (Tapia-Coral et al., 2005), assim no sistema SAF- em que há menor deposição de serapilheira e menor estoque ou camada de serapilheira (dados não apresentados neste artigo) encontramos maiores temperaturas no solo no período menos chuvoso.

Os teores de CBM observadas estão de acordo com outro estudo realizado na mesma área experimental (Silva et al., 2016) e em outros estudos realizados na mesma região (Rangel-Vasconcelos et al., 2005; Lopes et al., 2011; Melo et al. 2012; Smith et al., 2012; Silva Junior et al., 2018). O teor de CBM foi maior no período menos chuvoso (outubro), o que não era esperado, no entanto, outros trabalhos na mesma região encontraram resultados semelhantes (Rangel-Vasconcelos et al., 2005; Lopes et al., 2011). Este resultado pode estar relacionado a um evento de chuva uma semana antes da realização da coleta que provavelmente auxiliou na disponibilidade de nutrientes no solo, assim estimulando o crescimento da população de microrganismo da BMS.

Nos sistemas avaliados no período menos chuvoso (setembro a dezembro) ocorreram as maiores taxas de produção de serapilheira do ano e provavelmente houve baixa taxa de decomposição do material vegetal durante este período, levando ao acúmulo de material orgânico pouco decomposto no solo. Como ocorreram alguns eventos de chuva durante este período, possivelmente houve mineralização de nutrientes do material orgânico depositado e da biomassa microbiana do solo, estimulando o crescimento de microrganismos em busca dos nutrientes disponibilizados no ambiente.

O CBM no período mais chuvoso foi maior na FS, seguida pelo SAF+ e menor no SAF-. Este resultado pode estar relacionado à menor eficiência da população microbiana dos SAF em fixar CBM no solo, pois possivelmente está ocorrendo oxidação do carbono das células destes microrganismos (respiração de manutenção dos microrganismos vivos) para a sua manutenção e adaptação ao solo (Anderson & Domsch, 1993; Islam & Weil, 2000), portanto, esta população microbiana se encontra em condições adversas ou estressantes nestes sistemas.

O maior teor de CBM na FS e a menor taxa de $q\text{CO}_2$ confirma a maior eficiência da população microbiana deste tratamento em imobilizar C no solo. Quanto menor o valor de $q\text{CO}_2$ de um ecossistema e maior CBM, significa que está ocorrendo maior imobilização de C nas células dos microrganismos presentes no local (Anderson & Domsch, 1993). Este resultado sugere que há maior densidade de fungos na composição da BMS da FS em relação aos SAF, durante o período menos chuvoso, pois os fungos são mais efetivos no uso de sua energia, do que bactérias, com maior desenvolvimento da biomassa ativa (Ohtonen et al., 1999), assim auxiliando nas menores taxas de perda de C- CO_2 pela atividade microbiana. Mudanças na eficiência da BMS em imobilizar C nas células microbianas, podem estar relacionadas a mudanças na estrutura da comunidade microbiana do solo (relação fungo/bactéria) quando há conversão de uma floresta para agroecossistemas, provavelmente o que ocorreu neste estudo na conversão de uma floresta sucessional para SAF com palma de óleo.

A respiração basal foi maior no período mais chuvoso e maior umidade do solo, assim como encontrado em outros estudos na região amazônica (Rangel-Vasconcelos et al., 2005; Lopes et al., 2011; Rangel-Vasconcelos et al., 2012; Silva-Júnior et al., 2018), sugerindo que a atividade microbiana é estimulada pelo aumento da disponibilidade de água no solo. No período menos chuvoso houve a menor atividade microbiana e maior C-BMS na FS, indicando que no período da coleta o tratamento estava imobilizando mais C em seus tecidos do que mineralizando.

Na coleta realizada no mês de maio, que representa o período mais chuvoso, o $q\text{CO}_2$ foi maior que no período menos chuvoso. Neste mesmo período, o valor de $q\text{CO}_2$ no SAF- foi maior, seguido pelo SAF+ e menor na FS, sugerindo que o sistema que mais perde C- CO_2 via respiração microbiana é o SAF-, possivelmente isso ocorre pela menor deposição de serapilheira no solo deste tratamento, em relação aos demais, o que possivelmente gera menor disponibilidade de nutrientes para a BMS e maior estresse na microbiota do solo.

2.4.3 Produção de serapilheira e raízes finas

A produção de raízes finas e de serapilheira (*litterfall*) são os principais fluxos que compõem a ciclagem de matéria orgânica e nutrientes em ecossistemas (Vitousek & Sanford, 1986; Nadelhoffer & Raich, 1992), além de serem os principais componentes da produção primária líquida acima e abaixo do solo (Cuevas et al., 1991; Clark et al., 2001a; Clark et al., 2001b). Os resultados encontrados de produção de serapilheira neste estudo estão de acordo com valores encontrados em florestas sucessionais na Amazônia na faixa de 8,04 a 12,70 Mg ha⁻¹ano⁻¹ (Barlow et al., 2007; Almeida et al., 2015; Pereira et al., 2017) e em sistemas agroflorestais (Corrêa et al., 2006; Brancher, 2010).

Nos tratamentos avaliados a maior produção de serapilheira foi observada no mês de maio, período de transição do período mais chuvoso para o menos chuvoso. A maior produção de serapilheira principalmente no período de menor precipitação pluviométrica, normalmente se dá pela perda de uma grande quantidade de folhas, provavelmente como estratégia para tolerar o estresse hídrico pela redução da área da evapotranspiração (Borchert et al., 2002), no entanto também há a característica de senescência de algumas espécies. Em outros estudos realizados em florestas na Amazônia e em outras regiões tropicais observaram-se também variações na produção de serapilheira associadas com a variação mensal da precipitação pluviométrica (Cuevas & Medina, 1986; Smith et al., 1998; Vasconcelos et al., 2004; Barlow et al., 2007; Pereira et al., 2017).

As variações na produção de serapilheira em função da precipitação pluviométrica e temperatura do ar, durante o ano, estão associadas a uma estratégia das plantas de controle de perda de água por transpiração no período mais quente, com a abscisão de folhas, galhos, frutos, sementes e qualquer componente vegetal (Machado et al., 2008; Sanches et al., 2008; Machado et al., 2015). No entanto, na região amazônica, a maior produção de serapilheira em períodos mais quentes está associada à renovação foliar das árvores para melhorar o

aproveitamento da radiação fotossinteticamente ativa, mesmo diante de pouco recurso hídrico disponível no solo (Kim et al., 2012).

Nos meses de janeiro, fevereiro, abril, junho, agosto, outubro, novembro e dezembro a FS produziu mais serapilheira do que os SAF. A conversão de florestas estruturalmente diversificadas para plantações de sistemas agrícolas tem impacto negativo para a produção de serapilheira (Hättenschwiler et al., 2005; Hertel et al., 2009). Alguns estudos realizados anteriormente mostraram que florestas tropicais contêm maior produção anual de serapilheira do que sistemas agroflorestais de cacau (Hertel et al., 2009; Triadiati et al., 2011), como observado neste estudo.

O SAF+ nos meses de maio e setembro produziu mais serapilheira que o SAF-, e também maior produção total anual. Esse resultado provavelmente está relacionado à diferença no número de indivíduos que compõe os sistemas e a diversidade de espécies, pois o SAF+ apresenta maior número de indivíduos por unidade de área e maior diversidade de espécies no sistema agroflorestral, em relação ao SAF- (Tabela 1). A composição das espécies utilizadas e suas características ecológicas podem ser fatores importantes na quantidade de serapilheira produzida (Machado et al., 2008), assim como sistemas mais adensados empregam alta densidade de plantas, e normalmente alta diversidade de espécies (Piña-Rodrigues et al., 1997) possivelmente com maior produção de serapilheira.

No primeiro e último bimestre observou-se maior produção de raízes fina, e também alta e média precipitação pluviométrica, respectivamente. A maior produção de raízes finas nestes bimestres pode estar relacionada à quantidade de água no solo que favorece a mineralização e disponibilidade de nutrientes pela microbiota do solo. As plantas investem muito na produção de raízes finas para absorção de água e nutrientes do solo em relação às raízes grossas (Blair e Perfecto 2001), então neste período de maior produção de raízes finas houve também maior atividade microbiana provavelmente mineralizando e disponibilizando nutrientes no solo o que estimulou maior emissão de raízes finas pelas plantas presentes nestes tratamentos.

Durante o quarto (Ago-Set) e último (Dez-Jan) bimestres a FS produziu mais raízes finas que os SAF. A produção anual e estoque de raízes finas também foram maiores neste tratamento, em relação aos SAF. Outros estudos na região amazônica também evidenciaram maior produção de raízes finas em floresta sucessional, em relação a agroflorestas (Cuevas et al., 1991; Smith et al., 2002). Na floresta sucessional observou-se maior produção de serapilheira, maior taxa de decomposição e menor tempo de renovação da vegetação (dados não apresentados neste artigo),

consequentemente maior mineralização e disponibilidade de nutrientes, o que provavelmente estimulou a produção de raízes finas na FS para absorção dos nutrientes disponíveis no solo.

O SAF- produziu mais raízes finas que o SAF+ no terceiro (Jun-Jul) e quinto (Out-Nov) bimestres do ano, e também teve maior produção anual de raízes finas, em relação ao SAF+. A maior produção de raízes no SAF- em relação ao SAF+, está relacionada à maior ciclagem de raízes finas neste sistema com maior taxa de decomposição e tempo de renovação de raízes (dados n, em relação ao SAF+. E provavelmente há menor disponibilidade de nutrientes no solo do SAF-, pois há menor taxa de deposição e decomposição da serapilheira neste sistema, em relação ao SAF+.

A produção de serapilheira é o processo responsável pela maior transferência de nutrientes da biomassa vegetal para o solo, pois a deposição desse material e a sua conseqüente decomposição disponibilizam nutrientes às plantas (Vitousek & Sanford, 1986), e associado a isso o crescimento de raízes finas nas camadas superficiais do solo, as quais se concentram grande quantidade de material orgânico depositado via serapilheira, representam um mecanismo estratégico de captura de nutrientes em solos de baixa fertilidade (Vogt et al., 1996; Laclau et al., 2004), assim no SAF- provavelmente há menor disponibilidade de nutrientes pela menor deposição de serapilheira no solo o que estimula maior crescimento de raízes finas em busca de nutrientes no solo.

2.5 Conclusões

O efluxo de CO₂ do solo e as variáveis bióticas e abióticas foram sensíveis a sazonalidade da precipitação pluviométrica, sendo maiores no período mais chuvoso, exceto o carbono da biomassa microbiana.

Sistemas agroflorestais com maior diversidade de espécies, consorciados com a palma de óleo, se mostram como uma alternativa viável de produção da palma na região amazônica com menores emissões de C-CO₂ para atmosfera via metabolismo microbiano e radicular, maior acúmulo de C em compartimentos importantes como raízes finas, biomassa microbiana e serapilheira.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, E. J.; LUIZÃO, F.; RODRIGUES, D. J. Litterfall production in intact and selectively logged forests in southern of Amazonia as a function of basal area of vegetation and plant density. **Acta Amazonica**, v.45, p.157-166, 2015.
- ANDERSON, T. H.; DOMSCH, K. H. The metabolic quotient for CO₂ (*q*CO₂) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 25, p. 393-395, 1993.
- BAENA, A. R. C.; FALESI, I. C. **Avaliação do potencial químico e físico dos solos sob diversos sistemas de uso da terra na Colônia Agrícola de Tomé-Açu, Estado do Pará**. Boletim de Pesquisa, 18. Embrapa Amazônia Oriental, 1999. 23 p.
- BARLOW, J.; GARDNER, T. A.; FERREIRA, L. V.; PERES, C. A. Litter fall and decomposition in primary, secondary and plantation forests in the Brazilian Amazon. **Forest Ecology and Management**, v. 247, p. 91-97, 2007.
- BENTES, E. S.; HOMMA, A. K. O. **Importação e exportação de óleo e palmiste de dendezeiro no Brasil (2010-2015)**. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2016. 34 p. (Boletim de pesquisa e desenvolvimento).
- BLAIR, B. C.; PERFECTO I. Nutrient content and substrate effect on fine root density and size distribution in a Nicaraguan rain forest. **Biotropica**, v. 33, p. 697–701. 2001.
- BORCHERT, R.; RIVERA, G.; HAGNAUER, W. Modification of vegetative phenology in a tropical semi-deciduous forest by abnormal drought and rain. **Biotropica**, v. 34, p. 27–39, 2002.
- BRANCHER, T. Estoque e ciclagem de carbono de sistemas agroflorestais em Tomé-Açu, Amazônia Oriental. Dissertação de mestrado (Mestrado em Ciências Ambientais), Universidade Federal do Pará, Belém, PA. 55 p.
- CARNEIRO, R. G.; MOURA, M. A. L.; SILVA, V. DE P. R. da; SILVA JUNIOR, R. S.; ANDRADE, A. M. D. de; SANTOS, A. B. dos. Variabilidade da temperatura do solo em função da liteira em fragmento remanescente de mata atlântica, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, p.99-108, 2014.
- CARVALHO, W. R. 2011. **Estoque de carbono e fracionamento físico da matéria orgânica do solo de cultivo de palma de óleo em sistemas agroflorestais na Amazônia Oriental**. Dissertação de Mestrado, (Mestrado em Agronomia), Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, Pará. 75 p.
- CLARK, D. A.; BROWN, S.; KICKLIGHTER, D. W.; CHAMBERS, J. Q.; THOMLINSON, J. N. Measuring net primary production in forests: concepts and field methods. **Ecological Applications**, v. 11, p. 356-370, 2001a.
- CLARK, D. A.; BROWN, S.; KICKLIGHTER, D. W.; CHAMBERS, J. Q.; THOMLINSON, J. N.; HOLLAND, E. A. Net primary production in tropical forests: an evaluation and synthesis of existing field Data. **Ecological Applications**, v. 11, p. 371-384, 2001b.

CORREA, F. L. de O.; RAMOS, J. D.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; Müller, M. W. Produção de serapilheira em sistema agroflorestal multiestratificado no Estado de Rondônia, Brasil. **Ciência Agrotecnica**, v. 30, p. 1099-1105, 2006 .

CUEVAS, E.; MEDINA, E. Nutrient dynamics within amazonian forest ecosystems I. Nutrient flux in fine litter fall and efficiency of nutrient utilization. **Oecologia**, v. 68, p. 466-472, 1986.

CUEVAS, E.; MEDINA, E. Nutrient dynamics within amazonian forests II. Fine root growth, nutrient availability and leaf litter decomposition. **Oecologia**, v. 76, p. 222-235. 1988.

CUEVAS, E.; BROWN, S.; LUGO, A. E. Above- and belowground organic matter storage and production in a tropical pine plantation and a paired broadleaf secondary forest. **Plant and Soil**, v. 135, p. 257-268, 1991.

DAVIDSON, E. A.; JANSSENS, I. A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. **Nature**, v. 440, p. 165-173, 2006.

DAVIDSON, E. A.; VERCHOT, L. V.; CATTÂNIO, J. H.; ACKERMAN, L. I.; CARVALHO, J.E.M. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia. **Biogeochemistry**, v.48, p. 53–69. 2000.

DAVIDSON, E. A.; SAVAGE, K.; BOLSTAD, P.; CLARK, D. A.; CURTIS, P. S.; ELLSWORTH D, S.; et al. Belowground carbon allocation in forests estimated from litterfall and IRGA-based soil respiration measurements. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 113, p. 39–51, 2002.

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

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3.ed. Brasília, 2013. 353p.

GIARDINA, C. P.; BINKLEY, D.; RYAN, M.G.; FOWNES, J. H.; SENOCK, R. S. Belowground carbon cycling in a humid tropical forest decreases with fertilization. **Oecologia**, v. 139, p. 545–550, 2004.

HANSON, P. J.; EDWARDS, N. T.; GARTEN, C.T.; ANDREWS, J. A. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: a review of methods and observations. **Biogeochemistry**, v. 48, p. 115–146, 2000.

HATTENSCHWILER, S.; TIUNOV, A. V.; SCHEU, S. Biodiversity and litter decomposition in terrestrial ecosystems. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, v. 36, p. 191-218, 2005.

HERTEL D.; HARTEVELD M. A.; LEUSCHNER, C. Conversion of a tropical forest into agroforest alters the fine root-related carbon flux to the soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 41, p. 481-490, 2009.

- HOGBERG, P.; NORDGREN, A.; BUCHMANN, N.; TAYLOR, A.F.S.; EKBLAD, A.; HOGBERG, M. N; et al. Large-scale forest girdling shows that current photosynthesis drives soil respiration. **Nature**, v. 411, p. 789–792, 2001.
- ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh. **Agriculture Ecosystems and Environment**, v. 79, p. 9-16, 2000.
- JENKINSON, D. S. & POWLSON, D. S. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil-I. Fumigation with chloroform. **Soil Biology & Biochemistry**, v.8, p. 167-177, 1976.
- KIM, Y.; KNOX, R. G.; LONGO, M.; MEDVIGY, D.; HUTYRA, L. R.; PYLE, E. H.; WOFSEY, S. C.; BRAS, R. L.; MOORCROFT, P. R. Seasonal carbon dynamics and water fluxes in an Amazon rainforest. **Global change biology**, v.18, p.1-11, 2012.
- KOTOWSKA, M. M.; HERTEL, D.; TRIADIATI; MIFTAHUDIN; ANAS, I. Transformation of lowland rainforest into oil palm plantations results in changes of leaf litter production and decomposition in Sumatra, Indonesia. **Journal of Biodiversity and Environmental Sciences**, v.6, p.546-556, 2015.
- LACLAU, J.P. TOUTAIN F; M'BOU, A. T.; ARNAUD, M.; JOFFRE, R.; RANGER, J. The function of the superficial root mat in the biogeochemical cycles of nutrients in Congolese eucalyptus plantations. **Annals of Botany**, v. 93, p. 249-261, 2004.
- LOPES, E. L. N.; FERNANDES, A. R.; RUIVO, M. de L. P.; CATTANIO, J. H.; SOUZA, G. F. de. Microbial biomass and soil chemical properties under different land use systems in northeastern Pará. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 1127-1139, 2011.
- MACHADO M.R.; PIÑA-ROGRIGUES, F. C. M.; PEREIRA, M. G. Produção de serapilheira como bioindicador de recuperação em plantio adensado de revegetação. **Árvore**, v. 32, p. 143-151, 2008.
- MACHADO, D. L.; PEREIRA, M. G.; CORREIA, M. E. F.; DINIZ, A. R.; SANTOS, L. L.; MENEZES, C. E. G. Ciclagem de nutrientes em diferentes estágios sucessionais da mata atlântica na bacia do Rio Paraíba do Sul, RJ. **Bioscience jornal**, v.31, p.1222-1237, 2015.
- MELO, V. S.; DESJARDINS, T.; SILVA JR, M. L.; SANTOS, E. R.; SARRAZIN, M.; SANTOS, M. M. L. S. Consequences of forest conversion to pasture and fallow on soil microbial biomass and activity in the eastern Amazon. **Soil Use and Management**, v. 28, p. 530–535, 2012.
- NADELHOFFER, K. J.; RAICH, J. W. Fine root production estimates and belowground carbon allocation in forest ecosystems. **Ecology**, v. 73, p. 1139-1147, 1992.
- OHTONEN, R.; FRITZE, H.; PENNANEN, T.; JUMPPONEN, A.; TRAPPE, J. Ecosystem properties and microbial community changes in primary succession on glacier forefront. **Ecologia**, v. 119, p. 239-246, 1999.

OLIVEIRA, M. L. de; RUIZ, H. A.; COSTA, L. M. da; SCHAEFER, C. E. G. R. Flutuações de temperatura e umidade do solo em resposta à cobertura vegetal. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, p. 535-539, 2005.

PEÑA, M. L. P. Et al. Respiração microbiana como indicador da qualidade do solo em ecossistema florestal. **Curitiba**, v. 35, p. 117-127, 2005.

PEREIRA, D. N.; MARTINS, W. B. R.; ANDRADE, V. M. S.; OLIVEIRA, F. A. Influência da remoção de serapilheira no teor de fósforo e potássio na Amazônia Oriental. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.12, p.380-385, 2017.

PIÑA-RODRIGUES, F. C. M.; REIS, L. L.; MARQUES, S. S. Sistemas de plantio adensado para a revegetação de áreas degradadas da Mata Atlântica: bases ecológicas e comparações de custo-benefício com o sistema tradicional. **Floresta e Ambiente**, v. 4, p. 30-41, 1997.

PINTO-JUNIOR, O. B.; SANCHES, L.; DALMOLIN, A.C.; NOGUEIRA, J. S. Efluxo de CO₂ do solo em floresta de transição Amazônia Cerrado e em área de pastagem. **Acta Amazonica**, v. 39, p. 813-822, 2009.

RAICH, J. W.; SCHLESINGER, W. H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. **Tellus**, v. 44, p. 81-99, 1992.

RAMDANI, F.; HINO, M. Land Use Changes and GHG Emissions from Tropical Forest Conversion by Oil Palm Plantations in Riau Province, Indonesia. **Plos One**, v. 8, p. 1-6, 2013.

RAMOS, H. M. N. **Estoque e fluxo de carbono em sistemas agroflorestais com palma de óleo na Amazônia Oriental**. Tese de Doutorado (Doutorado em Agronomia) Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, Pará. 111 p.

RANGEL-VASCONCELOS, L. G. T.; ZARIN, D. J.; CARVALHO, C. J. R.; SANTOS, M. M. L.; VASCONCELOS, S. S.; OLIVEIRA, F. A. Carbono, nitrogênio e atividade da biomassa microbiana de um solo sob vegetação secundária de diferentes idades na Amazônia Oriental. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 44, p. 49-63, 2005.

RYAN, M.G.; LAW, B.E. Interpreting, measuring, and modeling soil respiration. **Biogeochemistry**, v. 73, p. 3-27, 2005.

SAMPAIO, G.; NOBRE, C.; COSTA, M.H.; SATYAMURTY, P.; BRITALDO, S.S.F.; CARDOSO, M. Regional climate change over eastern Amazonia caused by pasture and soybean cropland expansion. **Geophysical Research Letters**, v. 34, p. 1-7, 2007.

SANCHES, L.; VALENTINI, C. M. A.; PINTO JÚNIOR, O. B.; NOGUEIRA, J. S.; VOURLITIS, G. L.; BIUDES, M. S.; SILVA, C. J.; BAMBI, P.; LOBO, F. A. Seasonal and interannual litter dynamics of a tropical semideciduous forest of the southern Amazon Basin, Brazil. **Journal of geophysical research**, v.113, p.1-9, 2008.

SANTIAGO, W. R.; VASCONCELOS, S. S.; KATO, O. R.; BISPO, C. J. C.; RANGEL-VASCONCELOS, L. G. T.; CASTELLANI, D. C. Nitrogênio mineral e microbiano do solo em sistemas agroflorestais com palma de óleo na Amazônia oriental. **Acta Amazonica**, V. 43, P. 395-406, 2013.

SILVA, C. M. da; VASCONCELOS, S. S.; JÚNIOR, M. M.; BISPO, C. J. C.; KATO O. R.; JUNIOR, A. C. da S.; et al. Variação temporal do efluxo de CO₂ do solo em sistemas agroflorestais com palma de óleo na Amazônia Oriental. **Acta Amazonica**, v. 46, p. 1-12, 2016.

SILVA JUNIOR, A. C. da; RUIVO, M. de L. P.; SILVA C. M. da; SILVA, C. M. da; OKUMURA, R. S. Seasonal variation of soil attributes in oil palm plantations in the Eastern Amazon. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.13, p. 1-8, 2018.

SMITH, K.; GHOLZ, H. L.; OLIVEIRA, F. de A. Litterfall and nitrogen-use efficiency of plantations and primary forest in the eastern brazilian Amazon. **Forest Ecology and Management**, v. 109, p. 209-220, 1998.

SMITH, C. K.; OLIVEIRA, F. de A.; GHOLZ, H. L.; BAIMA, A. Soil carbon stocks after forest conversion to tree plantations in lowland Amazonia, Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 164, p. 257–263. 2002.

SMITH, D.R.; TOWNSEND, T.J.; CHOY, A.W.K.; HARDY, I.C.W.; SJÖGERSTEN, S. Short-term soil carbon sink potential of oil palm plantations. **Global Change Biology Bioenergy**, v. 4, p. 588-596, 2012.

SOTTA, E. D.; MEIER, P.; MALHI, Y.; NOBRE, A. D.; HODNETT, M.; GRACE, J. Soil CO₂ efflux in a tropical forest in central Amazon. **Global Change Biology**, v.10, p.601-617, 2004.

SOTTA, E. D.; VELDKAMP, E.; GUIMARÃES, B. R.; PAIXÃO, R. K.; RUIVO, M. L. P. ; ALMEIDA, S. S. Landscape and climatic controls on spatial and temporal variation in soil CO₂ efflux in an Eastern Amazonian rainforest, Caxiuanã, Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 237, p. 57-64, 2006.

STRAATEN, O. V.; VELDKAMP, E.; KOHLER, M.; ANAS, I. Drought effects on soil CO₂ efflux in a cacao agroforestry system in Sulawesi, Indonesia. **Biogeoscience discuss**, v. 6, p. 11541-11576, 2009.

SWAILS, E.; HERTANTI, D.; HERGOUALC'H, K.; VERCHOT, L.; LAWRENCE, D. The response of soil respiration to climatic drivers in undrained forest and drained oil palm plantations in an Indonesian peatland. **Biogeochemistry**, v. 142, p. 37–51, 2019.

TAPIA-CORAL, S. C; LUIZÃO, F. J.; WANDELLI, E.; FERNANDES, E. C. M. Carbon and nutrient stocks in the litter layer of agroforestry systems in central Amazonia, Brazil. **Agroforestry Systems**, v. 65, p. 33-42. 2005.

TRIADIATI, T. S.; GUHARDJA E.; SUDARSONO, Q. I.; LUESCHNER, C. Litterfall production and leaf-litter decomposition at natural forest and cacao agroforestry in Central Sulawesi, Indonesia. **Asian Journal of Biological Science**, v. 4, p. 221-234, 2011.

VALVERDE-BARRANTES, O. J.; RAICH, J. W.; RUSSEL, A. E. Fine-root mass, growth and nitrogen content for six tropical tree species. **Plant and Soil**, v. 290, p. 357-370. 2007.

VANCE, E. D.; BROOKES, P. C.; JENKINSON, D. S. An extraction method for measuring soil microbial biomass-C. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 19, p. 703-707, 1987.

VASCONCELOS, S. S.; ZARIN, D. J.; ARAÚJO, M. M.; RANGEL- VASCONCELOS, L. G. T.; CARVALHO, C. J. R.de ; STAUDHAMMER, C. L. ; OLIVEIRA, F. de A. Effects of seasonality, litter removal and dry-season irrigation on litterfall quantity and quality in eastern Amazonian forest regrowth, Brazil. **Journal of Tropical Ecology**, v. 24, p. 1-12, 2008.

VINCENT, G.; SHAHRIARI, A. R.; LUCOT, E.; BADOT, P-M.; EPRON, D. Spatial and seasonal variations in soil respiration in a temperate deciduous forest with fluctuating water table. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 38, p. 2527–2535. 2006.

VITOUSEK, P. M.; SANFORD JR., R. L. Nutrient cycling in moist tropical forest. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v. 17, p. 137-167, 1986.

VOGT, K. A. Vogt, D. J.; Palmiotto, P. A.; Boon, P.; O'Hara, J.; Asbjornsen , H. Review of root dynamics in forest ecosystems grouped by climate, climatic forest type and species. **Plant and Soil**, v. 187, p. 159-219. 1996.

ZANCHI, F. B.; DA ROCHA, H. R.; DE FREITAS, H. C.; KRUIJT, B.; WATERLOO, M.J.; MANZI, A. O. Measurements of soil respiration and simple models dependent on moisture and temperature for an Amazonian southwest tropical Forest. **Biogeosciences Discuss**, v. 6, p. 6147-6177, 2009.

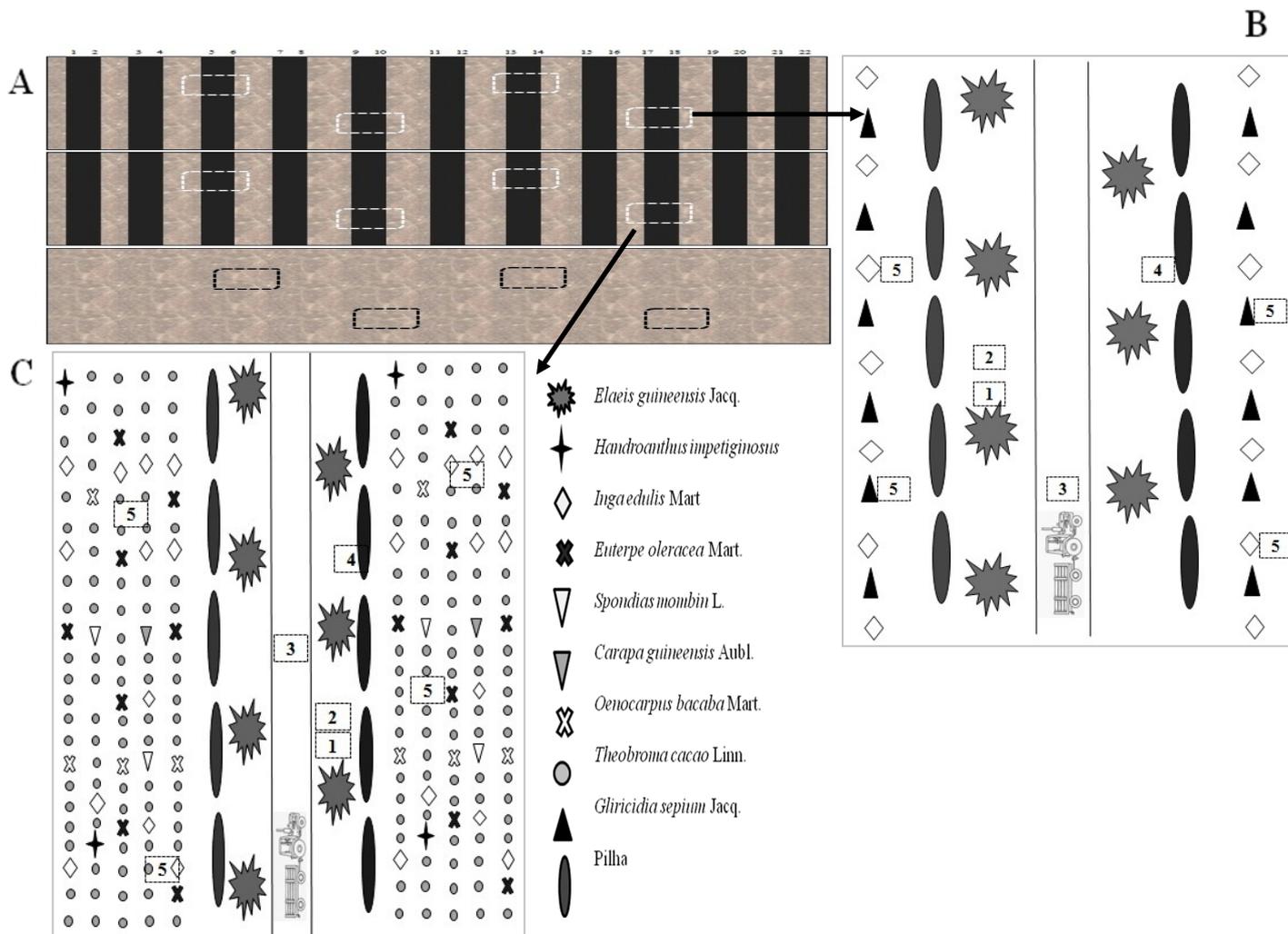
ZANCHI, F. B.; WATERLOO, M.; KRUIJT, B.; KESSELMEIER, J.; LUIZÃO, F. J.; MANZI, A. O. ; DOLMAN, A. J. Soil CO₂ efflux in Central Amazonia: environmental and methodological effects. **Acta Amazonica**, v. 42, p.173 – 184, 2012.

Figura 1. Mapa de localização da área de estudo.



Fonte: **autor.**

Figura 2. Croquis dos sistemas agroflorestais com palma de óleo: a) linhas sólidas retangulares pretas são as linhas duplas de palma de óleo, as tiras cinza são de plantio das demais espécies que compõe os SAF e os retângulos tracejados representam a disposição das parcelas amostras nos 2 ha de plantio de cada sistema avaliado. Representação mais detalhada do arranjo das espécies: b) sistema agroflorestal com palma de óleo e menor diversidade de espécies (SAF-) e c) sistema agroflorestal com palma de óleo e maior diversidade de espécies (SAF+). Em b e c os números demonstram os pontos de coleta dentro de cada parcela amostral (1: 0,6 m de distância da base da palma, 2: 2,0 m de distância da base da palma, 3: caminho de colheita, 4: empilhamento de folhas de poda da palma de óleo e 5: linha de plantio SAF).



Fonte: autor.

Figura 3. Sistema agroflorestal menos diversificado com palma de óleo (SAF-). a) Linha dupla de plantio da palma e da linha de SAF e b) Linha das espécies consorciadas.



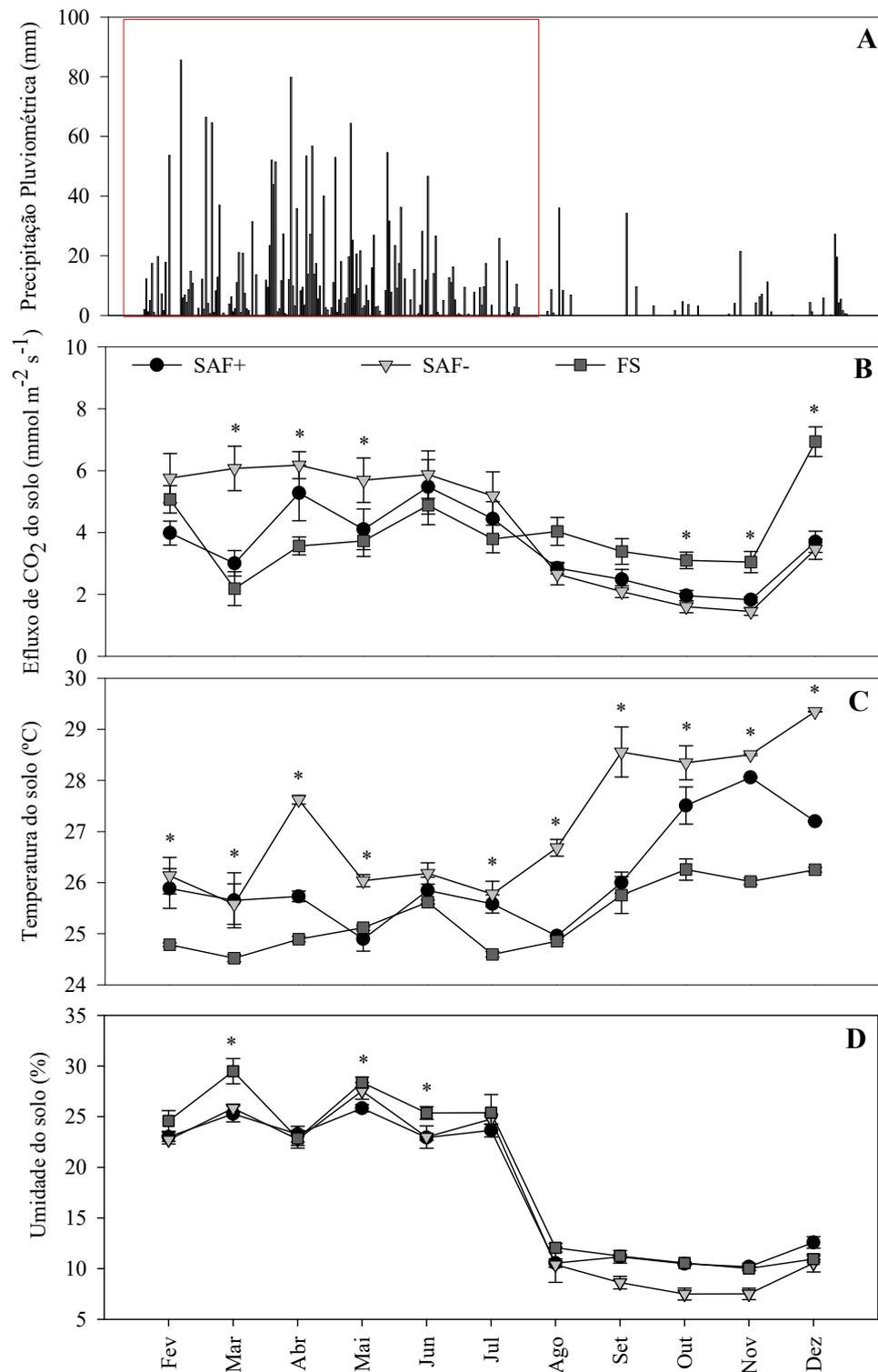
Fonte: autor.

Figura 4. Sistema agroflorestal mais diversificado com palma de óleo (SAF+). a) Linha dupla de plantio da palma e da linha de SAF e b) Linha das espécies consorciadas.



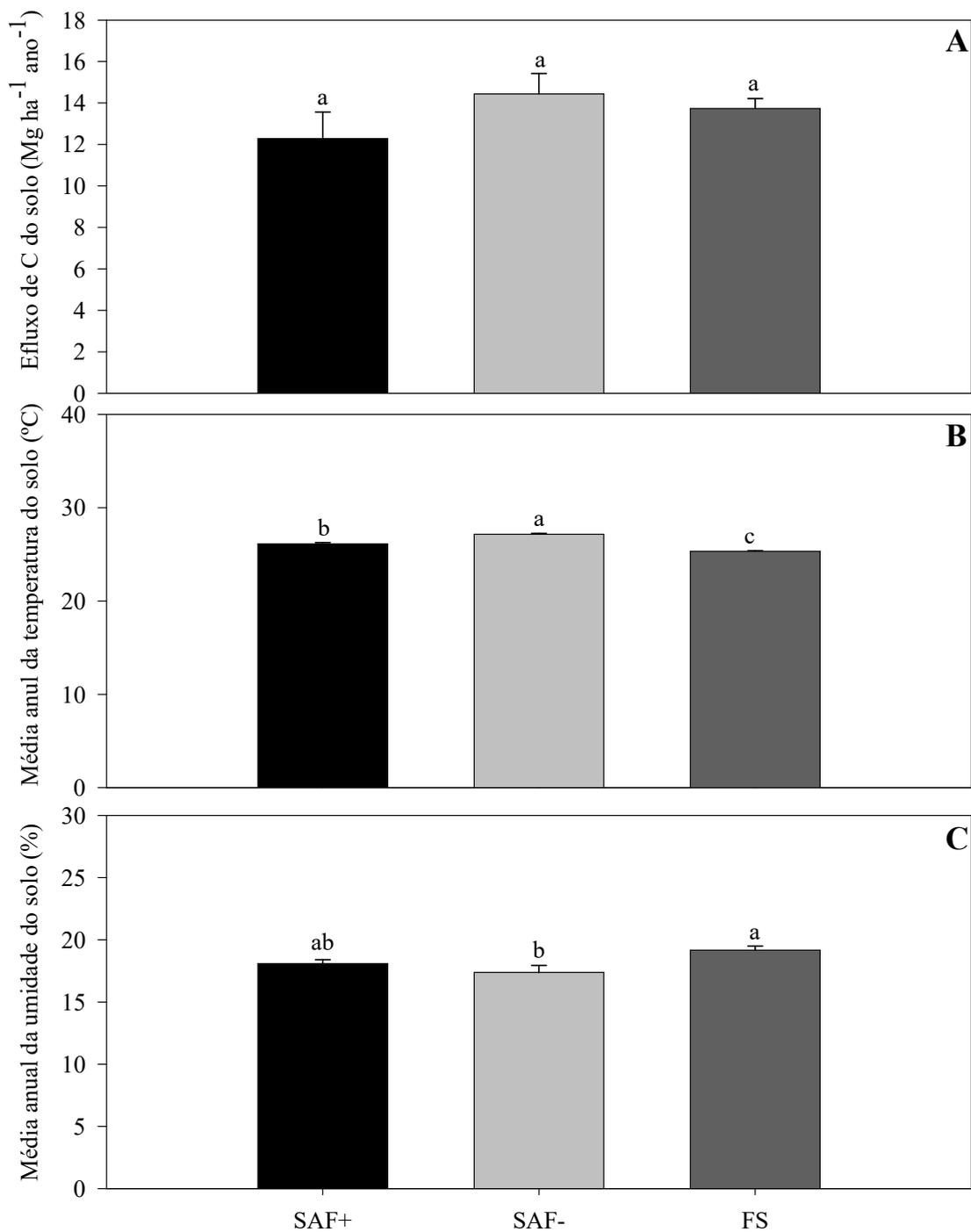
Fonte: autor.

Figura 5. Precipitação pluviométrica (A), Efluxo de CO₂ do solo (B), Temperatura do solo (C) e umidade gravimétrica do solo (D) em sistemas agroflorestais com palma de óleo em Tomé-Açu, PA. SAF+: sistema agroflorestal mais diversificado com palma de óleo; SAF-: sistema agroflorestal menos diversificado com palma de óleo; FS: floresta sucessional.*Diferença significativa entre os sistemas pelo teste de Tukey 0,05%.



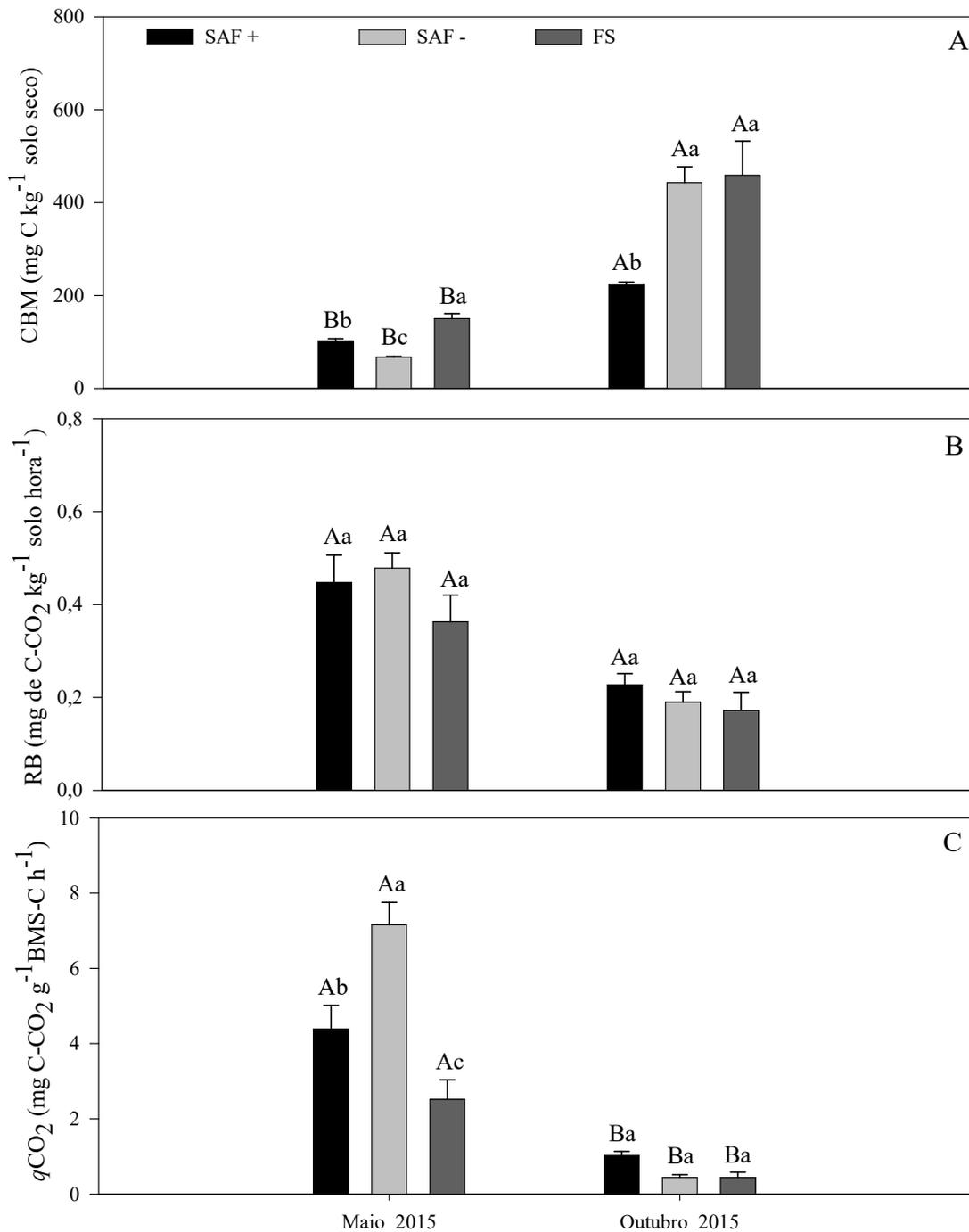
Fonte: autor.

Figura 6. Efluxo anual de CO₂ do solo (A), Média anual da temperatura do solo (B) e Média anual da umidade gravimétrica do solo (C) em sistemas agroflorestais com palma de óleo em Tomé-Açu, PA. SAF+: sistema agroflorestal mais diversificado com palma de óleo; SAF-: sistema agroflorestal menos diversificado com palma de óleo; FS: floresta sucessional. Letras maiúsculas iguais não diferem os anos de coleta, em cada tratamento, pelo teste de Tukey 5%. Letras minúsculas iguais não diferem os tratamentos, em cada ano de coleta, pelo teste de Tukey 5%.



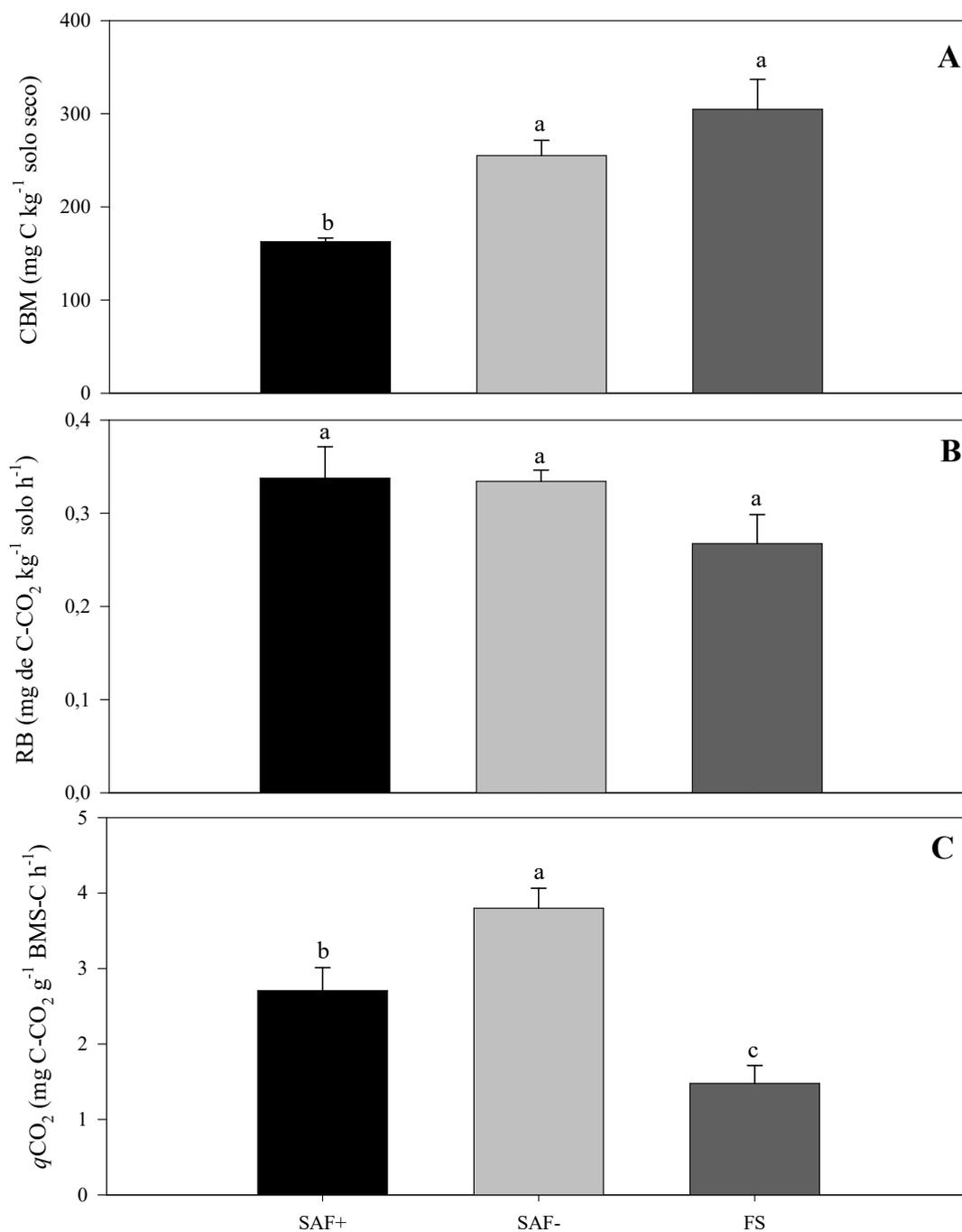
Fonte: autor.

Figura 7. Carbono da biomassa microbiana do solo (A), respiração basal (B) e quociente metabólico (C) em sistemas agroflorestais com palma de óleo em Tomé-Açu, PA. SAF+: sistema agroflorestal mais diversificado com palma de óleo; SAF-: sistema agroflorestal menos diversificado com palma de óleo; FS: floresta sucessional. Letras maiúsculas iguais não diferem os anos de coleta, em cada tratamento, pelo teste de Tukey 5%. Letras minúsculas iguais não diferem os tratamentos, em cada ano de coleta, pelo teste de Tukey 5%.



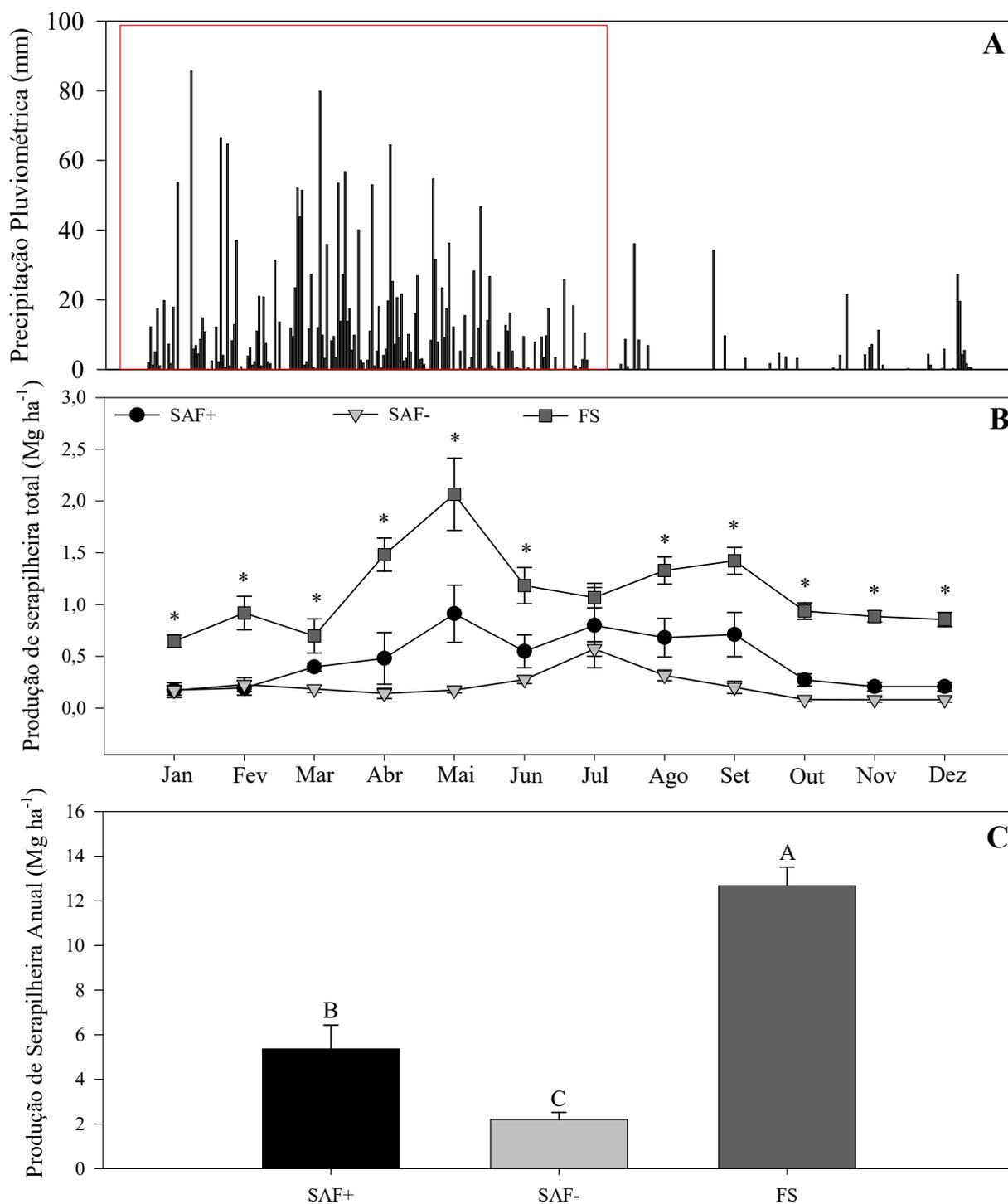
Fonte: autor.

Figura 8. Média anual do carbono da biomassa microbiana do solo (A), respiração basal (B) e quociente metabólico (C) em sistemas agroflorestais com palma de óleo em Tomé-Açu, PA. SAF+: sistema agroflorestal mais diversificado com palma de óleo; SAF-: sistema agroflorestal menos diversificado com palma de óleo; FS: floresta sucessional. Letras maiúsculas iguais não diferem os anos de coleta, em cada tratamento, pelo teste de Tukey 5%. Letras minúsculas iguais não diferem os tratamentos, em cada ano de coleta, pelo teste de Tukey 5%.



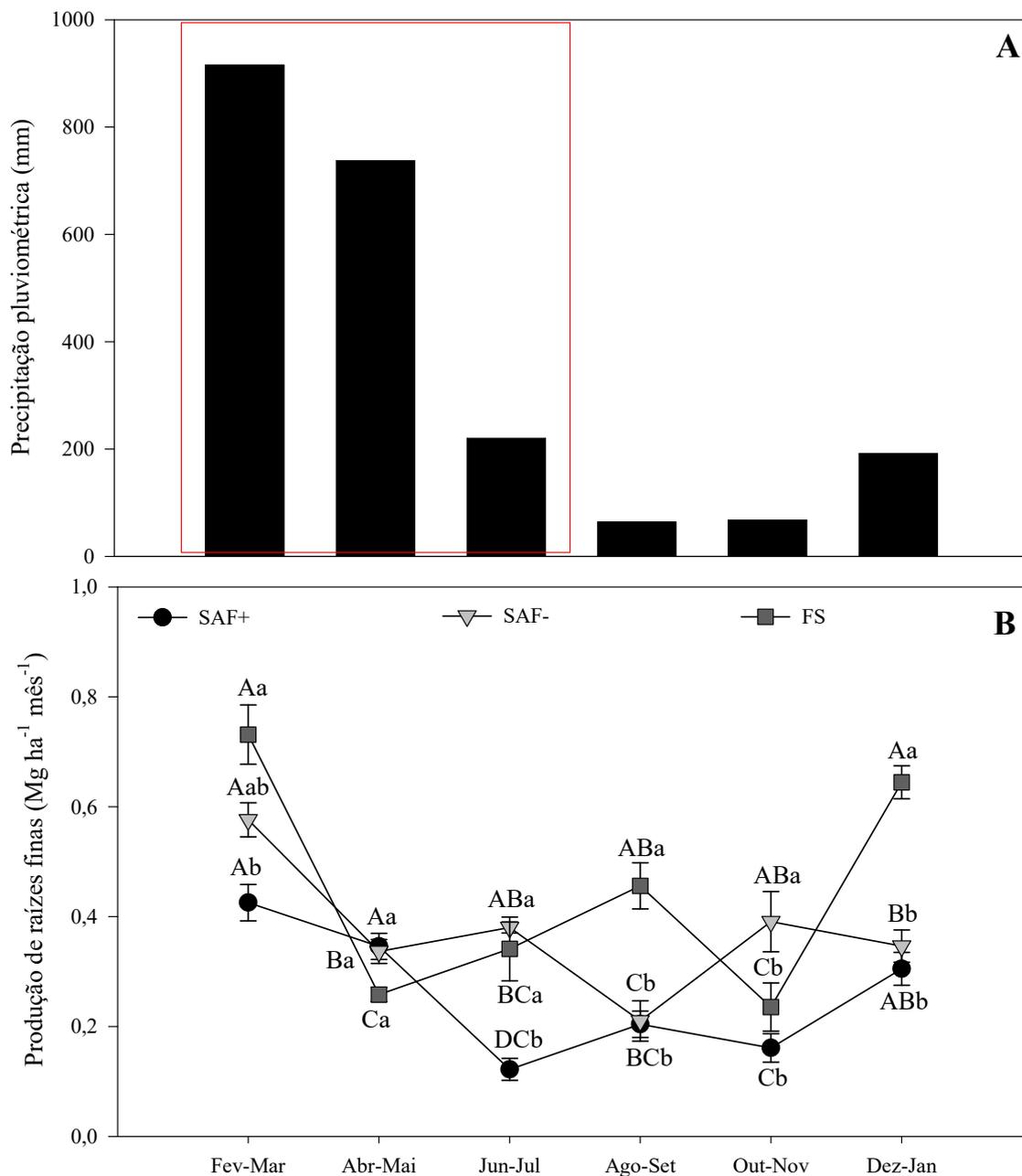
Fonte: autor.

Figura 9. Precipitação pluviométrica (A), Produção de serapilheira (B) e Produção anual de serapilheira (C) em sistemas agroflorestais com palma de óleo em Tomé-Açu/PA. SAF+: sistema agroflorestal mais diversificado com palma de óleo; SAF-: sistema agroflorestal menos diversificado com palma de óleo; FS: floresta sucessional.*Diferença significativa entre os sistemas ($p < 0,001$). Letras maiúsculas comparam os sistemas pelo teste de Tukey a 5%.



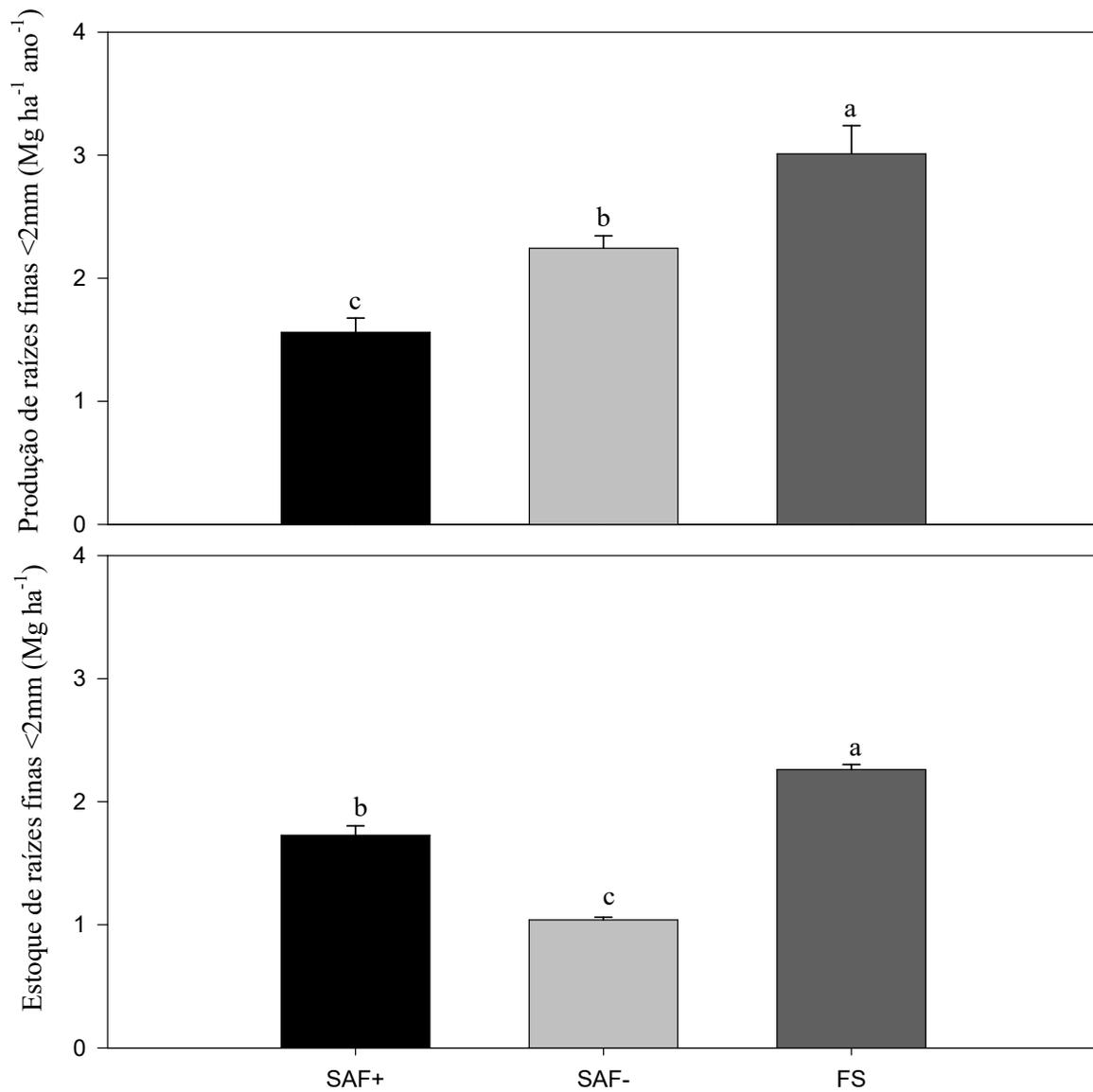
Fonte: autor.

Figura 10. Precipitação pluviométrica acumula bi mensalmente (A) e Produção de raízes finas bimensais (B), em sistemas agroflorestais com palma de óleo em Tomé-Açu, PA. SAF+: sistema agroflorestal mais diversificado com palma de óleo; SAF-: sistema agroflorestal menos diversificado com palma de óleo; FS: floresta sucessional. Letras maiúsculas comparam os bimestres de coleta em cada tratamento, pelo teste de Tukey 5%. Letras minúsculas comparam os tratamentos em cada bimestre, pelo teste de Tukey 5%.



Fonte: autor.

Figura 11. Produção anual de raízes finas (A) e estoque de raízes finas (B) em sistemas agroflorestais com palma de óleo em Tomé-Açu, PA. SAF+: sistema agroflorestal mais diversificado com palma de óleo; SAF-: sistema agroflorestal menos diversificado com palma de óleo; FS: floresta sucessional. Letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey 5%.



Fonte: autor.

Tabela 1. Espécies que compõe os sistemas agroflorestais consorciados com palma de óleo em Tomé-açu, PA.

Espécies	SAF+			SAF-		
	Densidade (Ind. ha ⁻¹)	h (m)	DAP (cm)	Densidade (Ind. ha ⁻¹)	h (m)	DAP (cm)
<i>Acacia mangium</i> Willd	2	7,29±5,13	13,1±4,16			
<i>Bertholletia excelsa</i> Kunth	2	4,22±1,07	6,57±2,92			
<i>Calophyllum brasiliense</i> C.	6	4,77±1,04	5,38±2,57			
<i>Carapa guineensis</i> Aubl.	7	7,92±2,74	14,09±4,04			
<i>Elaeis guineensis</i> Jacq.	40	4,32±2,14	80,95±19,63	39	5,89±2,66	87,07±5,61
<i>Euterpe oleracea</i> Mart.	61	5,18±1,76	9,08±3,93			
<i>Gliricidia sepium</i> Jacq.	69	3,08±0,51	6,89±1,97	213	5,80±1,04	6,80±1,41
<i>Handroanthus impetiginosus</i>	18	7,15±2,31	13,07±9,13			
<i>Inga edulis</i> Mart	10	4,99±2,85	11,52±4,04	74	1,66±0,94	5,46±2,04
<i>Mangifera indica</i> L.	6	5,01±3,25	2,3±1,71			
<i>Oenocarpus bacaba</i> Mart.	7	5,77±3,42	19,03±6,06			
<i>Sclerolobium paraense</i> Huber	2	14,38±2,49	19,4±11,25			
<i>Spondias mombin</i> L.	5	8,68±3,95	17,20±10,17			
<i>Swietenia macrophylla</i>	3	10±2,54	18,62±9,26			
<i>Theobroma cacao</i> Linn.	295	4,12±0,95	6,47±2,45			
<i>Theobroma grandiflorum</i> (Willd. Ex Spreng) K. Schum	2	4,20±1,08	2,71±0,85			

Estimativa de Altura (h) e diâmetro a altura do peito (DAP) são média ± erro-padrão (N=4).

Tabela 2 Tipos e quantidade de fertilizantes aplicados nos sistemas agroflorestais com Palma de Óleo, Tomé-Açu, PA.

Corretivo/fertilizante	Unidade	Palma de óleo				Culturas consorciadas*
		2008	2009	2010	2011	2008
Calcário dolomítico	kg planta ⁻¹	1300		1	1,5	0,3
Fosfato de ARAD	kg planta ⁻¹	0,3				10
Moinho de carvão ¹	kg planta ⁻¹	10				4
Composto orgânico	kg planta ⁻¹	8	8			10
Cama de frango ²	kg planta ⁻¹	10				
Farinha de ossos ³	kg planta ⁻¹		1	0,5	0,5	
Torta de mamona ⁴	kg planta ⁻¹		2	2	4	
FTE BR 12 ⁵	kg planta ⁻¹			0,3	0,2	
Cachos vazios de palma de óleo	kg planta ⁻¹			100	100	
Bórax	kg planta ⁻¹			0,1	0,1	

*cacau, açaí, bacaba e banana. ¹N: 0,51%; P: 3,36%; K: 4,85%; Mg: 2,7%. ²N: 2,58%; P₂O₅: 2,77%; K₂O: 2,31%; C/N: 7. ³N: 2%; P₂O₅: 20%; K₂O: 0,12%; C/N: 9. ⁴N: 5,44%; P₂O₅: 1,91%; K₂O: 1,54%; C/N: 10. ⁵Fritted trace elements. Zn: 9%; B: 1,8%; Cu: 0,8%; Mn: 2%; Fe: 3,5%; Mo: 0,1%

3. DINÂMICA DO CARBONO E NITROGÊNIO EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS COM PALMA DE ÓLEO NA AMAZÔNIA ORIENTAL

RESUMO

O incremento de carbono (C) no solo depende da quantidade e qualidade do insumo fornecido pelos componentes arbóreos e não-arbóreos do sistema. Objetivou-se avaliar a dinâmica do carbono e nitrogênio em sistemas agroflorestais com palma de óleo na Amazônia oriental. Foram avaliados dois sistemas agroflorestais com palma de óleo (SAF): mais diversificado (SAF+) e menos diversificado (SAF-) e uma floresta sucessional (FS). Nós quantificamos os estoques de carbono e nitrogênio na serapilheira e no solo, produção de serapilheira e raízes, e posteriormente estimamos a taxa de decomposição e tempo de renovação da serapilheira e raízes. Com a conversão da FS em SAF com palma de óleo, houve um incremento de 10,06 Mg C ha⁻¹ no solo do SAF+ e 5,53 Mg C ha⁻¹ no solo do SAF-. O SAF+ estocou mais carbono no solo, que o SAF- e a FS. A FS estoca e produz mais serapilheira, em relação aos SAF. A taxa de decomposição foi maior na FS, em relação aos SAF, assim estes tendo maior tempo para renovação. Já para taxa de decomposição de raízes, observou-se ciclagem mais rápida no SAF- em relação ao SAF+ e a FS. No SAF- há maior deposição de N e menor relação C/N na serapilheira anual em relação ao SAF+ e a FS. A conversão de uma floresta sucessional para sistemas agroflorestais com palma de óleo promoveu incremento de C no solo. A conversão de uma floresta sucessional para sistemas agroflorestais com palma de óleo promoveu diminuição nas taxas de estoque e deposição de serapilheira, e estoque de raízes finas. O sistema agroflorestal mais diversificado tem maior acúmulo de C no solo e maior taxa de produção e estoque de serapilheira, e estoque de raízes finas.

Palavras-chave: Serapilheira. Diversidade florestal. Dendê.

ABSTRACT

The increment of carbon (C) in the soil depends on the quantity and quality of the input provided by the tree and non-arboreal components of the system. The objective of this study was to evaluate the dynamics of carbon and nitrogen in agroforestry systems with oil palm in eastern Amazonia. Two agroforestry systems with oil palm (AFS) were

evaluated: more diversified (AFS+) and less diversified (AFS -) and a successional forest (SF). We quantified the carbon and nitrogen stocks in litter and soil, litter production and roots, and later estimated the rate of decomposition and renewal time of litter and roots. With the conversion of SF to AFS with oil palm, there was an increase of 10.06 Mg C ha⁻¹ in AFS+ soil and 5.53 Mg C ha⁻¹ in AFS- soil. AFS+ stored more carbon in the soil than AFS- and SF. SF is stockpiled and produces more litter than AFS. The rate of decomposition was higher in SF, in relation to AFS, so they have a longer time to renew. As for the rate of root decomposition, faster cycling was observed in SAF- in relation to AFS+ and SF. In AFS - there is greater deposition of N and lower C / N ratio in annual litter compared to AFS+ and SF. The conversion of a successional forest to agroforestry systems with oil palm promoted an increase of C in the soil. The conversion of a successional forest to agroforestry systems with oil palm promoted a decrease in the rates of litter deposition and deposition, and fine root stock. The most diversified agroforestry system has higher C accumulation in the soil and higher rate of litter production and stock, and fine root stock.

Key words: Litter. Forest diversity. Oil palm

3.1 Introdução

O cultivo da palma de óleo (*Elaeis guineensis* Jacq., família Arecaceae) atualmente configura-se como um componente agrícola importante para a região Amazônica, especialmente no estado do Pará, que se destaca como o principal produtor do Brasil, respondendo por 57,19% da área total plantada, 85,18% da produção e a produtividade média de 16,41 t/ha de cachos de frutos frescos, superior à nacional (11,01 t/ha) (Bente & Homma, 2016). Embora represente um dos principais sistemas de produção agrícola na região, o cultivo de palma de óleo tem sido muito criticado em relação aos seus impactos sociais e ambientais (Law et al., 2009; Frazão et al., 2013; Ramdani & Rino, 2013).

A produção de palma de óleo integrada a sistemas agrofloretais (SAF) pode representar uma estratégia viável na Amazônia de produção sustentável da cultura e estoque de carbono no solo (Carvalho et al., 2014; Ramos et al., 2017). Os SAF são caracterizados pelo cultivo integrado de espécies agrícolas e silviculturais na mesma

área (Nair, 1993) e têm sido recomendados para regiões tropicais devido aos benefícios sociais, econômicos e ambientais associados a estes sistemas.

Estudos anteriores demonstraram que o cultivo de palma de óleo em sistemas agroflorestais jovens (2,5 anos de idade), contendo diversas espécies herbáceas, arbustivas e florestais, acumula mais C no solo (média de 17 Mg ha⁻¹) em relação a SAF tradicionais da Amazônia, sem palma de óleo (Carvalho et al., 2014). Estudos complementares são necessários para avaliar o efeito de longo prazo do cultivo de sistemas agroflorestais com palma de óleo sobre os estoques de C e N (nitrogênio) e de outros componentes do ciclo do C que contribuem para seu acúmulo e deposição no solo, como a serapilheira e a matéria orgânica do solo.

A diversificação do cultivo da palma de óleo com SAF é a possibilidade de estoque de carbono no solo em compartimentos importantes como as raízes e serapilheira (Ramos et al., 2017). A biomassa de raízes finas em ecossistemas é muito importante para o ciclo global do carbono, uma vez que essa biomassa constitui potencial reservatório de carbono no solo e tem rápida ciclagem, porém pouco se sabe dessas reservas em muitos sistemas agrícolas. Outro importante indicador de impactos ambientais em agroecossistemas é a serapilheira, pois tem funções extremamente importantes, sobretudo em solos tropicais da Amazônia que são pobres em nutrientes, assim são a principal via de transferência de nutrientes para o solo e deste para as plantas pela absorção radicular (Selle, 2007), protege o solo contra erosão (Moraes et al., 1999), regula os processos hidrológicos superficiais (Sato, 2008). Neste sentido, a serapilheira e as raízes finas podem e devem ser utilizadas para monitorar a dinâmica do carbono e outros nutrientes em um agroecossistema.

Entender a dinâmica do carbono e nitrogênio em sistemas agroflorestais consorciados com palma de óleo representa uma ferramenta importante para a adoção de práticas e técnicas mais sustentáveis no contexto do cultivo da palma de óleo na região amazônica e podem proporcionar o entendimento da ciclagem e acúmulo do carbono no solo pela deposição da serapilheira e raízes no solo. Neste contexto, objetivou-se com este estudo avaliar a dinâmica do carbono e nitrogênio em sistemas agroflorestais com palma de óleo na Amazônia oriental.

3.2 Material e Métodos

3.2.1 Área de estudo

A descrição da área de estudo está apresentada no Capítulo 1.

3.2.2 Delineamento experimental

Foram estabelecidas quatro parcelas amostrais aleatoriamente de 900 m² (30 x 30 m) em todas as áreas experimentais (Figura 2A). Nos sistemas agroflorestais as parcelas foram delimitadas a fim de incluir uma linha dupla de palma de óleo no centro da parcela e as linhas de plantio das espécies que compõe o SAF nas laterais da parcela (Figura 2A). Nos SAF, foram selecionados cinco pontos de amostragem: 0,6 m da base da palma de óleo; 2,0 m da base da palma de óleo; caminho de colheita; empilhamento de folhas de poda da palma de óleo e linha de plantio SAF (Figura 2b e 2c). Estes pontos foram escolhidos por que alguns trabalhos já realizados em plantios de palma de óleo, já verificaram que são importantes que se sigam estes pontos amostrais de maior representatividade de diferenças de manejo do cultivo da palma de óleo, principalmente em relação à entrada de material orgânico no sistema e compactação do solo (Frazão et al., 2013; Ramos et al., 2017). Na floresta sucessional foram escolhidos quatro pontos aleatórios para amostragem.

3.2.3 Carbono e nitrogênio total do solo

As coletas de solo foram realizadas com trado, em maio de 2015, cinco amostras compostas por três amostras simples, na profundidade de 0,1 m. Em laboratório, as amostras foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneirada de malha 2 mm para obtenção de terra fina seca ao ar – TFSA. Em seguida, as amostras de TFSA foram maceradas em gral de ágata e passadas em peneira de 100 mesh para análise elementar de carbono total do solo (CT) e nitrogênio total do solo (NT). Amostras indeformadas de solo foram coletadas em anel volumétrico (5 x 5 cm), na camada de 0-10 cm, para pelo estimar a densidade do solo pelo método do anel volumétrico (EMBRAPA, 1997). O estoque de carbono foi calculado usando-se a equação: $ECS = (d \times h \times C) / 10$, em que C é o teor de C no solo (g kg⁻¹), d é a densidade aparente do solo (kg dm⁻³) e h é a espessura da camada amostrada (cm).

A acumulação líquida de carbono no solo (ΔECS) nos sistemas com palma de óleo foi estimada usando a equação: $\Delta ECS = ECS \text{ sistemas agroflorestais} - ECS \text{ área de}$

referência (CARVALHO et al., 2014). Para este cálculo, foram consideradas duas hipóteses: (a) o estoque de C do solo da área de referência representa condições mais próximas de um ecossistema de recuperação natural, servindo como uma base comparativa para sistemas alternativos e (b) o nível de estoque de C, utilizado como base para cálculo, desse tipo de ecossistema, de florestas sucessionais, não variou significativamente no tempo de avaliação da pesquisa (Neumann-Cosel et al., 2011; Perrin et al., 2014).

3.2.4 Coleta e processamento de serapilheira

Para avaliação da produção de serapilheira (*litterfall*) foram instalados em janeiro de 2015 cinco coletores por parcela, em cada sistema avaliado. Os coletores foram construídos com arame galvanizado de bitola 12, com área de coleta de 1 m x 1 m, fundo em tela de nylon (malha de 1 mm x 1 mm) 50 cm acima do solo. A serapilheira interceptada pelos coletores foi coletada mensalmente de fevereiro de 2015 a janeiro de 2016.

Após cada coleta, as amostras foram acondicionadas em sacos de papel e secas em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C durante 48 horas, no Laboratório de Análise de Sistemas Sustentáveis da Embrapa Amazônia Oriental, para a retirada do excesso de umidade. Após a retirada do excesso de umidade, em laboratório, as amostras de serapilheira produzida foram classificadas em cinco frações: folhas+pecíolo, galhos < 1cm, galhos > 1 cm, material reprodutivo (frutos, sementes, flores) e miscelânea (todo material que não se enquadrou nas outras frações). Após triado, o material foi acondicionado em estufa à temperatura de 65°C durante 72 horas e posteriormente pesado em balança analítica com precisão de 0,01g. Após a obtenção da massa das amostras o material foi unido em uma fração: liteira fina (material lenhoso com diâmetro \leq 1 cm, folhas, material reprodutivo e miscelânea) para ser moído em moinho tipo Willey e posteriormente ser realizada a análise de carbono (C) e nitrogênio (N) total da serapilheira produzida, em analisador elementar.

A serapilheira estocada no solo foi coletada com moldura de área 0,25 m² (0,5 m x 0,5 m) e 0,10 m de altura em maio (mais chuvoso) e novembro de 2015 (menos chuvoso). O material coletado foi acondicionado em sacos de papel e levados para o laboratório de análise de sistemas sustentáveis (LASS) da Embrapa Amazônia Oriental. No laboratório as amostras foram classificadas em: material lenhoso com diâmetro > 1

cm, material lenhoso com diâmetro ≤ 1 cm, folhas, material reprodutivo e miscelânea. Em seguida, as amostras foram colocadas em estufa de circulação forçada, por 72 horas, para a obtenção da massa seca constante em balança digital. Após a obtenção da massa das amostras o material foi unido em uma fração: liteira fina (material lenhoso com diâmetro ≤ 1 cm, folhas, material reprodutivo e miscelânea) para ser moído em moinho tipo Willey e posteriormente ser realizada a análise de C e N total da serapilheira estocada no solo, em analisador elementar.

3.2.5 Produção e estoque de raízes finas

A produção de raízes finas (diâmetro ≤ 2 mm) foi estimada pela avaliação do crescimento radicular em sacos telados (*ingrowth cores*) (Cuevas & Medina, 1988; Valverde-Barrantes et al. 2007), também chamados de armadilhas. Sacos cilíndricos com 0,1 m de altura e 0,55 m de diâmetro foram construídos manualmente com tela de poliestireno (malha de 2 mm x 3 mm). Os sacos foram preenchidos com solo coletado, nos primeiros 0,1 m do perfil do solo, em área próxima às parcelas experimentais. Antes do preenchimento dos sacos, o solo foi passado em peneiras com malhas de 4 e 2 mm, nesta seqüência, para a retirada manual dos resíduos de raízes. O preenchimento dos sacos foi feito de tal forma que a densidade do solo se aproximasse daquela do solo intacto. Foram instaladas dezesseis armadilhas em cada parcela de cada sistema avaliado, a uma distância de 1 m de distância dos anéis de mensuração do efluxo de CO₂ do solo, na profundidade correspondente à altura das armadilhas (0,1 m). Após 2 meses, as armadilhas foram coletadas e em seguida o seu conteúdo era acondicionado em sacos de polietileno e mantidos sob refrigeração 4°C, para que as armadilhas fossem reutilizadas no mesmo local a qual foram retiradas. Esse procedimento de instalação e coleta foi repetido cinco vezes, de abril de 2015 a janeiro de 2016.

O processamento em laboratório consistiu inicialmente na separação manual das raízes e do solo. Para a separação, as amostras foram lavadas com água corrente em duas peneiras com malhas de 2 e 1 mm, o que permitiu recuperar aproximadamente 100% das raízes finas, visto que uma quantidade desprezível de raízes passava pela peneira de 1 mm. Em seguida, com o auxílio de pinças, as raízes finas ≤ 2 mm foram separadas dos demais resíduos. As raízes foram acondicionadas em sacos de papel e secas em estufa a 65 °C por 72h, em seguida pesadas em balança analítica ($\pm 0,0001$ g) para obtenção da massa seca.

O estoque de raízes finas foi mensurado com a coleta de amostras de solo com trado cilindro de 0,1 m de altura e 0,05 m de diâmetro na instalação do experimento, o processamento e classificação das amostras se deram como explicado anteriormente para classificação das raízes provenientes das armadilhas.

3.2.6 Decomposição e renovação da serapilheira e raízes

A taxa de decomposição da serapilheira e das raízes (K_L) foi calculada pela razão entre a deposição e o estoque de serapilheira e raízes anual (Equação 1), conforme proposto por Olson (1963). Após o cálculo de K_L , calculou-se o tempo médio de renovação da serapilheira e das raízes acumuladas, pela equação de Hopkins (1966) (Equação 2).

$$K_L = \frac{L}{X} \text{ (Equação 1)}$$

$$t_R = \frac{1}{K_L} \text{ (Equação 2)}$$

Onde:

K_L = Coeficiente de decomposição;

t_R = Tempo médio de renovação da serapilheira (anos)

L = massa de serapilheira depositada ($Mg \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e;

X = massa de serapilheira acumulada anualmente ($Mg \text{ ha}^{-1}$).

3.2.7 Análise estatística

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado. Os dados foram submetidos ao teste de normalidade dos dados e quando não apresentaram distribuição normal, foram transformados (Log 10 e exponencial). As variáveis analisadas foram submetidas à análise de variância de um fator (ANOVA, $p < 0,05$) e teste Tukey ($p < 0,05$) para comparação das médias. A análise estatística foi realizada utilizando as médias ponderadas de cada sistema, considerando o percentual de representatividade de cada local de amostragem.

3.3 Resultados

3.3.1 Estoque e acúmulo de carbono e nitrogênio no solo

O estoque de C no solo foi maior no SAF+ (média \pm erro-padrão; $33,85 \pm 0,95$ Mg C ha⁻¹), seguido pelo SAF- ($29,32 \pm 0,81$ Mg C ha⁻¹) e menor na FS ($23,79 \pm 0,50$ Mg C ha⁻¹) (Figura 1A). Após 8 anos de conversão da FS para o sistema de cultivo com SAF+ houve um incremento no solo de $10,06$ Mg C ha⁻¹ e $5,53$ Mg C ha⁻¹ no sistema SAF- (Figura 1C).

3.3.2 Turnover da serapilheira fina

A maior produção de serapilheira fina foi na FS ($10,12 \pm 0,65$ Mg ha⁻¹), seguida pelo SAF+ ($3,53 \pm 0,62$ Mg ha⁻¹) e menor no SAF- ($1,98 \pm 0,25$ Mg ha⁻¹) (Figura 2A). O maior estoque de serapilheira fina foi na FS ($4,97 \pm 0,02$ Mg ha⁻¹), seguido pelo SAF+ ($3,85 \pm 0,09$ Mg ha⁻¹) e menor no SAF- ($2,63 \pm 0,00$ Mg ha⁻¹) (Figura 2B).

O índice de decomposição (K_L) foi significativamente maior na FS ($2,03 \pm 0,13$), seguido pelo sistema SAF+ ($1,35 \pm 0,24$) e menor no sistema SAF- ($0,52 \pm 0,07$) (Figura 2C). O tempo para renovação da vegetação foi maior no sistema SAF+ ($2,05 \pm 0,27$ anos), seguido pelo sistema SAF+ ($0,81 \pm 0,12$ ano) e menor na FS ($0,50 \pm 0,03$ ano) (Figura 2C).

3.3.3 Turnover de raízes finas (<2 mm)

A maior produção de raízes finas foi observada na FS ($3,01 \pm 0,23$ Mg ha⁻¹ ano⁻¹), seguida pelo SAF- ($2,24 \pm 0,10$ Mg ha⁻¹ ano⁻¹) e menor no SAF+ ($1,56 \pm 0,12$ Mg ha⁻¹ ano⁻¹) (Figura 3 A). O estoque de raízes finas na FS ($2,26 \pm 0,04$ Mg ha⁻¹) foi maior do que no sistema SAF+ ($1,73 \pm 0,08$ Mg ha⁻¹) e o menor valor foi observado no SAF- ($1,04 \pm 0,02$ Mg ha⁻¹) (Figura 3 B).

O índice de decomposição (K_L) foi significativamente maior no SAF- ($2,16 \pm 0,13$), seguido pela FS ($1,34 \pm 0,12$) e menor no SAF+ ($0,92 \pm 0,11$) (Figura 3C). O tempo para renovação das raízes finas foi maior no SAF+ ($1,13 \pm 0,12$ anos), seguido pela FS ($0,77 \pm 0,07$ ano) e menor SAF- ($0,47 \pm 0,03$) (Figura 3C).

3.3.4 Carbono e nitrogênio na serapilheira

O teor de N na serapilheira produzida foi maior no SAF- ($1,97 \pm 0,01$ %), seguido pelo SAF+ ($1,40 \pm 0,03$ %) e menor teor na FS ($1,30 \pm 0,05$) (Figura 4B). A maior relação C/N observada foi no SAF+ e na FS ($36,66 \pm 0,84$ e $38,99 \pm 2,02$, respectivamente), em relação ao SAF- ($24,65 \pm 0,28$) (Figura 4B). O maior estoque de C observado na serapilheira fina foi à FS ($2,18 \pm 0,03$ Mg⁻¹ ha⁻¹), seguido pelo SAF+ ($1,62 \pm 0,04$ Mg⁻¹ ha⁻¹) e menor no SAF- ($1,13 \pm 0,05$ Mg⁻¹ ha⁻¹) (Figura 5B). O maior estoque de N observado na serapilheira fina foi à FS ($0,65 \pm 0,04$ Mg⁻¹ ha⁻¹), seguido pelo SAF- ($0,14 \pm 0,03$ Mg⁻¹ ha⁻¹) e menor no SAF+ ($0,06 \pm 0,00$ Mg⁻¹ ha⁻¹) (Figura 5C). A maior relação C/N observada na serapilheira fina foi no SAF+ ($30,34 \pm 1,27$), em relação ao SAF- e a FS ($19,36 \pm 3,78$ e $14,75 \pm 1,10$) (Figura 5D).

3.4 Discussão

3.4.1 Estoque de carbono no solo e abundância natural de $\delta^{13}\text{C}$

Os valores de estoque de C no solo do SAF+ ($33,85 \pm 0,95$ Mg C ha⁻¹) e SAF- ($29,32 \pm 0,81$ Mg C ha⁻¹) estão de acordo com valores observados em SAF com palma de óleo (Carvalho et al., 2014; Ramos et al., 2017) e monocultivo de palma de óleo na mesma região (Frazão et al., 2013). O valor encontrado para estoque de C na FS ($23,79 \pm 0,50$ Mg C ha⁻¹) está de acordo com outro estudo em floresta sucessional da Amazônia na profundidade de 0-0,1 m (Bernoux et al., 1998). A conversão do fragmento de floresta sucessional para sistemas agroflorestais com palma de óleo promoveu incremento de C no solo.

O SAF+ teve incremento de $10,06$ Mg C ha⁻¹ após oito anos de conversão da FS para este sistema, evidenciando o seu potencial em acumular C no solo. O SAF+ também estocou mais carbono no solo, do que a FS, sugere-se que o manejo de adubação orgânica das espécies consorciadas, deposição de resíduos de cachos entre as linhas duplas de palma de óleo e deposição de biomassa da poda de manutenção do *Theobroma cacao* a cada seis meses nas linhas de plantio das espécies consorciadas contribuem para este resultado.

Carvalho et al. (2014) avaliando os mesmos SAF com palma de óleo (2,5 anos) e outro fragmento de floresta sucessional observou acúmulo de carbono no solo dos SAF,

em relação a FS, variando entre 6,6 - 8,3 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ na profundidade de 0,5 m. Os autores sugerem que estes SAF são eficientes em acumular carbono no solo pela adoção de fertilização orgânica e melhoria da fertilidade do solo após instalação dos SAF. Ramos et al. (2017) em outra área experimental de SAF com palma de óleo (5 anos) também obteve resultados de estoque de C no solo que confirmam o alto potencial de acumulação de C no solo destes sistemas. A palma de óleo também tem potencial de estocar C no solo, pois em estudos comparando florestas nativas em Papua Nova Guiné, África (Goodrick et al., 2015) e florestas sucessionais em Tailândia/PA (Frazão et al., 2013) com cronossequências de monocultivo de palma de óleo observou-se maior estoque de C do solo nos monocultivos de Palma.

O SAF- teve incremento de 5,53 Mg C ha⁻¹ após oito anos de implantação do sistema e estocou mais C no solo do que a FS. Este resultado, provavelmente deve-se a adição de serapilheira fina via *litterfall* com menor relação C/N (24,65 ± 0,28), em relação ao material depositado pela vegetação da FS (C/N=38,99 ± 2,02). Outra fonte de C neste sistema são as raízes finas que apresentam rápida ciclagem (alta taxa de decomposição e tempo de renovação menor que cinco meses), em relação a FS. Além disso, a poda e deposição no solo dos resíduos das espécies leguminosas para adubação verde adicionam material orgânico com baixa relação C/N, que provavelmente, se decompõe rápido adicionando C no solo.

A composição química dos resíduos orgânicos, com destaque para o teor de N do tecido vegetal e sua relação C/N, afeta a decomposição de materiais orgânicos no solo. Isto significa que os resíduos que possuírem uma relação C/N entre 20 e 30, fornecerão o nitrogênio necessário para reprodução microbiana, não havendo imobilização nem mineralização significativa no início do processo. Se a relação C/N for maior, significa que os microorganismos buscarão outras fontes de N para satisfazer a demanda, consumindo formas de nitrogênio que estão disponíveis para a planta, o que resulta em uma imobilização líquida e pode causar uma deficiência temporária de nitrogênio para as plantas. Se, por outro lado, a relação C/N for menor que 20, haverá um excesso de N no resíduo, que será mineralizado pelos microorganismos, permanecendo disponíveis para as plantas já num primeiro momento (Santos & Camargo, 1999).

O SAF+ estocou mais C no solo do que o SAF-, provavelmente por maior deposição e estoque de material orgânico via serapilheira do que o SAF-. O SAF+ também teve maior estoque de raízes finas no solo, caracterizado pela menor taxa de

decomposição e maior tempo de renovação, em relação aos valores observados no SAF. O impacto de qualquer sistema agroflorestal no estoque de carbono no solo depende em grande parte da quantidade e qualidade do insumo fornecido pelos componentes arbóreos e não-arbóreos do sistema (Agevi et al., 2017), como observado neste estudo.

Ramos et al. (2017) em outra área experimental com SAF com palma de óleo (5 anos) com diferentes arranjos de espécies, observou estoques de C no solo maior no sistema com maior biomassa vegetal acima do solo e estoque de raízes no solo. A produção e qualidade da serapilheira variam com as características do povoamento (tamanho da árvore, espécie, biomassa foliar e idade), localização geográfica (clima), solo do local, estação e prática de manejo (Liu et al., 2004; Starr et al., 2005; Dawoe et al., 2010; Murovhi et al., 2012).

3.4.2 Carbono e nitrogênio da serapilheira e raízes após conversão de uma floresta sucessional para plantio de SAF com palma de óleo

A faixa de variação do estoque de C na serapilheira observado na FS (1,5- 3,8 Mg C ha⁻¹) e nos SAF com palma de óleo (1,13 - 3,0 Mg C ha⁻¹) estão dentro da faixa de valores relatados em outras florestas sucessionais na região amazônica (Barbosa & Fearnside, 2003; Vasconcelos & Luizão, 2004), em outros sistemas agroflorestais (Dawoe et al. 2010; Gama-Rodrigues et al. 2011; Somarriba et al. 2013; Leuschner et al. 2013) e em outro experimento de SAF com palma de óleo (Ramos et al., 2017).

Após oito anos de conversão da floresta sucessional (≈ 10 anos) para plantios de SAF com palma de óleo observou-se menor estoque de C na serapilheira acumulada nos SAF, em relação a FS. Este resultado provavelmente está relacionado a diferença na qualidade do material vegetal depositado na FS, em relação aos SAF, pois a relação C/N do material vegetal da FS ($38,99 \pm 2,02$) é maior que a observada nos SAF, favorecendo o acúmulo de C na serapilheira na floresta por menor decomposição microbiana e lenta mineralização. Materiais vegetais com relação C/N maior que 25, geralmente, apresentam forte imobilização do N e velocidade de decomposição relativamente lenta, ao contrário de restos vegetais com relação C/N menor que 25, que têm boa mineralização de N e rápida decomposição (Cantarella et al., 2007).

A conversão de florestas estruturalmente diversificadas para plantações de sistemas agrícolas tem impacto negativo para a produção de serapilheira (Hättenschwiler et al., 2005; Hertel et al., 2009). Alguns estudos realizados

anteriormente mostraram que florestas tropicais apresentam maior produção anual de serapilheira do que sistemas agroflorestais com cacau (Hertel et al., 2009; Triadiati et al., 2011), como observado neste estudo.

A conversão da floresta sucessional para SAF com palma de óleo altera a taxa de decomposição de raízes e serapilheira, conseqüentemente a dinâmica de deposição de C no solo. A análise da ciclagem do C pela produção e estoques de serapilheira e raízes finas no solo, contribui para uma melhor compreensão de aspectos funcionais de um determinado ecossistema, como o aporte de C acima e abaixo do solo (Cuevas et al., 1991). A dinâmica de deposição de C via decomposição de serapilheira, é mais lenta nos SAF em relação à FS, provavelmente por que a relação C/N da serapilheira estocada no solo da FS é menor ($14,75 \pm 1,10$) do que a observada nos SAF, favorecendo a mineralização e deposição de C no solo.

A FS tem maior taxa de decomposição de raízes finas, em relação ao SAF+, provavelmente favorecendo a disponibilidade de C via exsudados de raízes com rápida ciclagem, pois estimamos tempo de renovação das raízes menor que um ano ($0,77 \pm 0,07$ ano). A produção e a decomposição de raízes são fatores importantes na ciclagem do carbono fotossintetizado pelas plantas (Silver et al., 2005). Na floresta amazônica, as raízes finas representam cerca de 60% do total de carbono encontrado nos primeiros 10 cm de profundidade do solo (Silver et al., 2000), assim alterações na decomposição e aporte de raízes no solo influenciam na dinâmica do C de um ecossistema, como observado neste estudo.

3.4.3 Dinâmica do carbono da serapilheira e raízes nos sistemas agroflorestais com palma de óleo

O SAF+ foi mais eficiente para estocar C na serapilheira, em relação ao SAF-, pois a alta relação C/N ($30,34 \pm 1,27$) do material vegetal estocado no solo deste sistema possibilita lenta mineralização e maior acúmulo de C neste compartimento. Outro fator que comprova maior eficiência do SAF+ na ciclagem da serapilheira, em relação ao SAF-, é que este sistema tem maior deposição de serapilheira anual e maior taxa de decomposição, o que evidencia que o material orgânico que está sendo depositado sofre decomposição e provavelmente incorpora nutrientes no solo deste sistema, com tempo de renovação igual ao da FS que apresentou maior acúmulo de C na serapilheira.

O SAF- estoca menos C na serapilheira provavelmente por que deposita menos material orgânico no solo e de baixa relação C/N ($24,65 \pm 0,28$), assim o material que é depositado e rapidamente mineralizado pelos microrganismos e o C contido neste material é perdido à atmosfera na forma de CO₂, que é o produto final da respiração microbiana (Sylvia et al., 1998). A entrada de C pela fixação biológica realizada por plantas e organismos clorofilados, tanto em florestas como em agroecossistemas, é contrabalançada pela saída de C durante o processo de decomposição, assim neste sistema o balanço de entrada e saída de C deve ser negativo, pois há baixa entrada de resíduos orgânicos no sistema e alta decomposição, promovendo perda de C-CO₂ para atmosfera.

Ramos et al. (2017) em estudo realizado comparando dois SAF com palma de óleo de diferente densidade e diversidade de espécies, na mesma região, também observou maior eficiência do SAF mais diversificado em estocar C em vários compartimentos (abaixo e acima do solo) e explica que a maior densidade de plantio deste sistema pode ter favorecido melhor uso de nutrientes e água do solo, que por sua vez levaram a uma maior produtividade. No nosso estudo também há diferença na densidade de plantas entre os SAF, o que também deve ter contribuído para maior incremento de serapilheira e biomassa de raízes no solo do SAF+ (mais denso), em relação ao SAF-(menos denso).

A diversidade de espécies também é um fator importante no acúmulo do C em um ecossistema (Hulvey et al. 2013), pois evidenciamos que houve influência das espécies na qualidade do material orgânico adicionado no solo dos sistemas, que provavelmente está influenciando no diferente acúmulo de C nos SAF. O SAF- é composto por duas leguminosas arbóreas (*Inga edulis* e *Gliricidia sepium*) que obtêm grandes quantidades de N via fixação biológica do nitrogênio, assim neste sistema observamos menor relação C/N na serapilheira estocada e depositada no solo ($19,36 \pm 3,78$; $24,65 \pm 0,28$, respectivamente) e maior teor de N, o que provavelmente está influenciando no menor acúmulo de serapilheira neste sistema.

O SAF+ é mais eficiente em acumular raízes finas no solo, pois estoca mais raízes finas, tem menor taxa de decomposição e maior tempo de renovação, em relação ao SAF-. A rápida decomposição das raízes produzidas no SAF-, com tempo de renovação de ≈ 5 meses, promove uma rápida ciclagem de raízes e menor acúmulo.

4. Conclusões

A conversão de uma floresta sucessional para sistemas agroflorestais com palma de óleo promoveu incremento de C no solo.

A conversão de uma floresta sucessional para sistemas agroflorestais com palma de óleo promoveu diminuição nas taxas de estoque e deposição de serapilheira, e estoque de raízes finas.

O sistema agroflorestal mais diversificado tem maior acúmulo de C no solo e maior taxa de produção e estoque de serapilheira, e estoque de raízes finas.

REFERÊNCIAS

AGEVI, H.; ONWONGA, R.; KUYAH, S.; TSINGALIA, M. Carbon stocks and stock changes in agroforestry practices: a review. **Tropical and Subtropical Agroecosystems**, v. 20, p. 101 – 109, 2017.

BARBOSA, R. I.; FEARNSTIDE, P. M. Carbon and nutrient flows in na Amazonian forest: Fine litter production and composition at Apiauí, Roraima, Brazil. **Tropical Ecology**, v. 1, p. 115-125, 1996.

BENTES, E. S.; HOMMA, A. K. O. **Importação e exportação de óleo e palmiste de dendezeiro no Brasil (2010-2015)**. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2016. 34 p. (Boletim de pesquisa e desenvolvimento).

BERNOUX, M.; CERRI, C. C.; NEILL, C.; MORAES, J. L. The use of stable carbon isotopes for estimatin soil organic matter turnover rates. **Geoderma**, v. 8, p. 43–58, 1998.

CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.V.H.; BRARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTI, R.B.; NEVES, J.C.L. 1. ed. **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. cap. 7, p. 375-470.

CARVALHO W. R.; VASCONCELOS, S. S.; KATO, O. R.; CAPELA, C. J.B.; CASTELLANI, D. C. Short-term changes in the soil carbon stocks of young oil palm-based agroforestry systems in the eastern Amazon. **Agrofor Syst**, v. 88, p. 357–368, 2014.

CUEVAS, E.; MEDINA, E. Nutrient dynamics within amazonian forests II. Fine root growth, nutrient availability and leaf litter decomposition. **Oecologia**, v. 76, p. 222-235. 1988.

CUEVAS, E.; BROWN, S.; LUGO, A. E. Above- and belowground organic matter storage and production in a tropical pine plantation and a paired broadleaf secondary forest. **Plant and Soil**, v. 135, p. 257-268, 1991.

DAWOE, E.K., ISAAC, M.E. AND QUASHIE-SAM, J. Litterfall and litter nutrient dynamics under cocoa ecosystems in lowland humid Ghana. **Plant Soil**, v. 330, p. 55–64, 2010.

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

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3.ed. Brasília, 2013. 353p.

FRAZÃO, L. A.; PAUSTIAN, K.; CERRI, C. E. P.; CERRI, C. C. Soil carbon stocks and changes after oil palm introduction in the Brazilian Amazon. **Global Change Biology Bioenergy**, v. 5, p. 384-390, 2013.

GAMA-RODRIGUES, EMANUELA FORESTIERI DA; GAMA-RODRIGUES, ANTONIO CARLOS DA ; BARROS, NAIRAM FÉLIX DE ; MOÇO, MARIA KELLEN DA SILVA . The relationships between microbiological attributes and soil and litter quality in pure and mixed stands of native tree species in southeastern Bahia, Brazil. **Canadian Journal of Microbiology**, v. 57, p. 887-895, 2011.

GOODRICK, I.; NELSON, P. N.; BANABAS, M.; WUSTER, C. M.; BIRD, M. Soil carbon balance following conversion of grassland to oil palm. **Global Change Biology Bioenergy**, v. 7, p. 263–272, 2014.

HATTENSCHWILER, S.; TIUNOV, A. V.; SCHEU, S. Biodiversity and litter decomposition in terrestrial ecosystems, Annual Review of **Ecology Evolution and Systematics**, v. 36, p. 191-218, 2005.

HERTEL, D.; HARTEVELD, M. A.; LEUSCHNER, C. Conversion of a tropical forest into agroforest alters the fine root-related carbon flux to the soil, **Soil Biology & Biochemistry**, v. 41, p. 481–490, 2009.

HOPKINS, B. Vegetation of the Olkemeji Forest Reserve, Nigeria. IV: The litter and soil with special reference to their seasonal changes. **Journal of Ecology**, v.54, p.687-703, 1966.

HULVEY, K. B.; HOBBS, R. J.; STANDISH, R. J.; LINDENMAYER, L. L.; PERRING, M. P. Benefits of tree mixes in carbon plantings. **Nature Climate Change**, v. 3, p. 869–874, 2013.

LAW M C, BALASUNDRAM SK, HUSNI MHA, AHMED OH, MOHD HH. Spatial variability of soil organic carbon in oil palm: a comparison between young and mature stands. **International Journal of Agricultural Research**, v. 4, p. 402-417, 2009.

LEUSCHNER, C.; MOSER G.; HERTEL D.; ERASMI, S.; LEITNER, D.; CULMSEE, H.; SCHULDT, B.; SCHWENDENMANN, L. Conversion of tropical moist forest into cacao agroforest: consequences for carbon pools and annual C sequestration. **Agroforestry Systems**, v. 87, p. 1173–1187, 2013.

LIU, C., WESTMAN, C., BERG, B., KUTSCH, W., WANG, G.Z., MAN, R., ILVESNIEM, H. Variation in litterfall-climate relationships between coniferous and broadleaf forests in Eurasia. **Global Ecology and Biogeography**, v.13, p.105–114, 2004.

MORAES, R. M.; DELITTI, W. B. C.; VUONO, Y. S. Litterfall and litter nutrient content in two Brazilian Tropical Forests. **Revista brasileira de botânica**, v.22, p.9-16, 1999.

MUROVHI, N.R., MATERECHERA, S.A. AND MULUGETA, S.D. Seasonal changes in litter fall and its quality from three sub-tropical fruit tree species at Nelspruit, South Africa. **Agroforestry Systems**, v. 86, p. 61-71, 2012.

NAIR P K R. Shifting cultivation and improved fallows. In: NAIR, P. K. R. (Ed). **Na introduction to agroforestry**. Kluwer:Academic Press; 1993.

NEUMANN-COSEL, L.; ZIMMERMANN, B.; HALL, J. S.; VAN BREUGEL, M.; ELSENBEEER, H. Soil carbon dynamics under young tropical secondary forests on former pastures—A case study from Panama. **Forest Ecology and Management**, v. 261, p. 1625–1633, 2011.

OLSON, J. S. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. **Ecology**, v.44, n.2, p.322-331, 1963.

RAMDANI, F.; HINO, M. Land Use Changes and GHG Emissions from Tropical Forest Conversion by Oil Palm Plantations in Riau Province, Indonesia. **Plos One**, v. 8, p. 1-6, 2013.

RAMOS, H. M. N.; V. S. S.; KATO, O. R.; CASTELLANI, D. C. Above- and belowground carbon stocks of two organic, agroforestry-based oil palm production systems in eastern Amazonia. **Agroforest Syst**, v. 92; p. 221–237, 2017.

SANTOS, G. A.; GAMARGO, F. A. O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Genesis, 1999. 491p.

SATO, A. M. **Respostas geo-hidroecológicas relacionadas à substituição de pastagens por plantações de eucalipto no médio vale do rio Paraíba do Sul: a interface biota-solo-água**. 2008. 160 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

SELLE, G. L. Ciclagem de nutrientes em ecossistemas florestais. **Bioscience journal**, v.23, p.29-39, 2007.

SILVER, W. L.; NEFF, J.; MCGRODDY, M.; VELDKAMP, E. D.; KELLER, M.; COSME, R. Effects of Soil Texture on Belowground Carbon and Nutrient Storage in a Lowland Amazonian Forest Ecosystem. **Ecosystems**, v. 3, p. 193–209. 2000.

SILVER, W.; THOMPSON, E. W.; MCGRODDY, M. E.; VARNER, R. K.; DIAS, J. D.; SILVA, H.; CRILL, M. P.; KELLER, M. Fine root dynamics and trace gas fluxes in two lowland tropical forest soils. **Global Change Biology**. v. 11, p. 290-306. 2005.

SYLVIA, D. M.; FUHRMANN, J. J.; HARTEL, P. G.; ZUBERER, D. A. **Principles and applications of soil microbiology**. New York: Prentice Hall, 1998. p. 550.

SOMARRIBA, E.; CERDA, R.; OROZCO, L., et al. Carbon stocks and cocoa yields in agroforestry systems of Central America. *Agriculture Ecosystems Environment*, v. 173, p. 46–57, 2013.

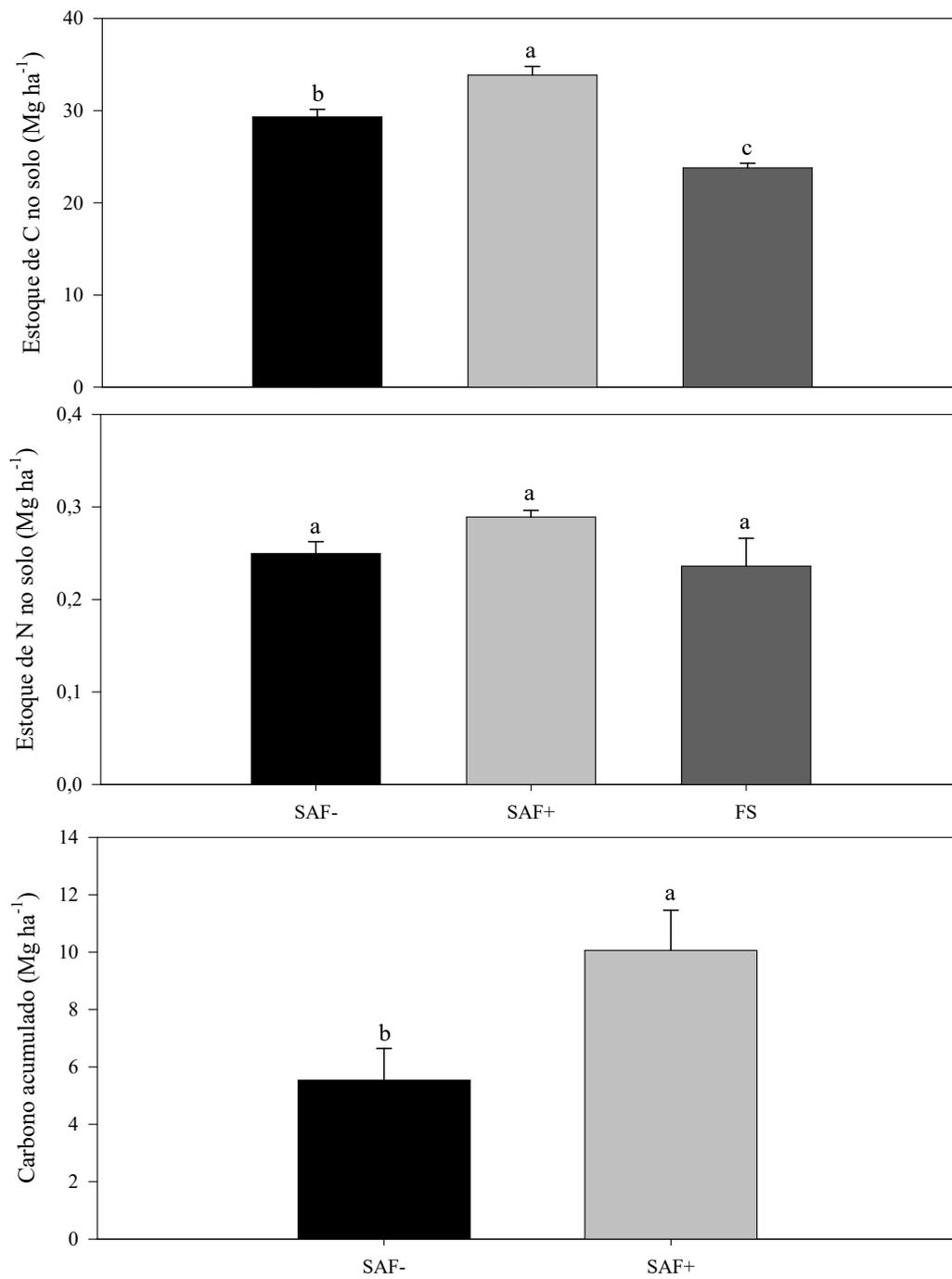
STARR, M., SAARSALMI, A., HOKKANEN, T., MERILÄ, P. AND HELMISAARI, H-S. Models of litterfall production for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in Finland using stand, site and climate factors. **Forest Ecology and Management**, v. 205, p.215–225, 2005.

TRIADIATI, S.; TJITROSEMITO, E.; GUHARDJA, E.; SUDARSONO; QAYIM I.; LEUSCHNER C. Litterfall Production and Leaf-litter Decomposition at Natural Forest and Cacao Agroforestry in Central Sulawesi, Indonesia, V. 4, P. 221-234, 2011.

VALVERDE-BARRANTES, O. J.; RAICH, J. W.; RUSSEL, A. E. Fine-root mass, growth and nitrogen content for six tropical tree species. **Plant and Soil**, v. 290, p. 357-370. 2007.

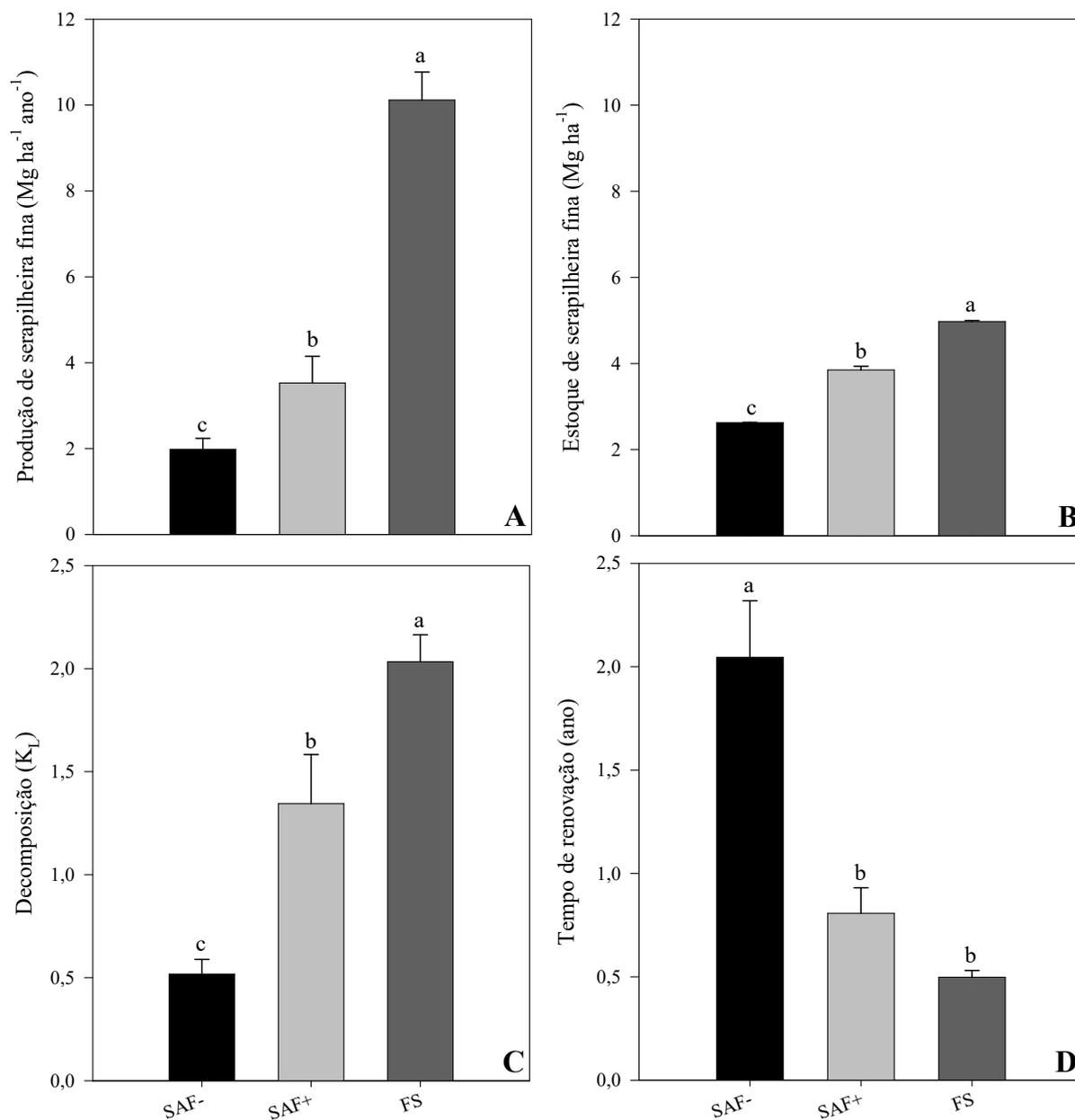
VASCONCELOS, H. L.; LUIZÃO, F. J. Litter production and litter nutrient concentrations in a fragmented Amazonian landscape. **Ecological Application**, v. 14, p. 884-892, 2004.

Figura 1. Estoque de carbono (A), nitrogênio (B) e acúmulo de C (C) no solo a 0,00-0,10 m em sistema agroflorestal mais diversificado (SAF+) e sistema agroflorestal menos diversificado (SAF-) com palma de óleo e uma floresta sucessional (FS). Médias e barras de erro-padrão \pm (N=4); letras iguais não diferem, entre si, pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade.



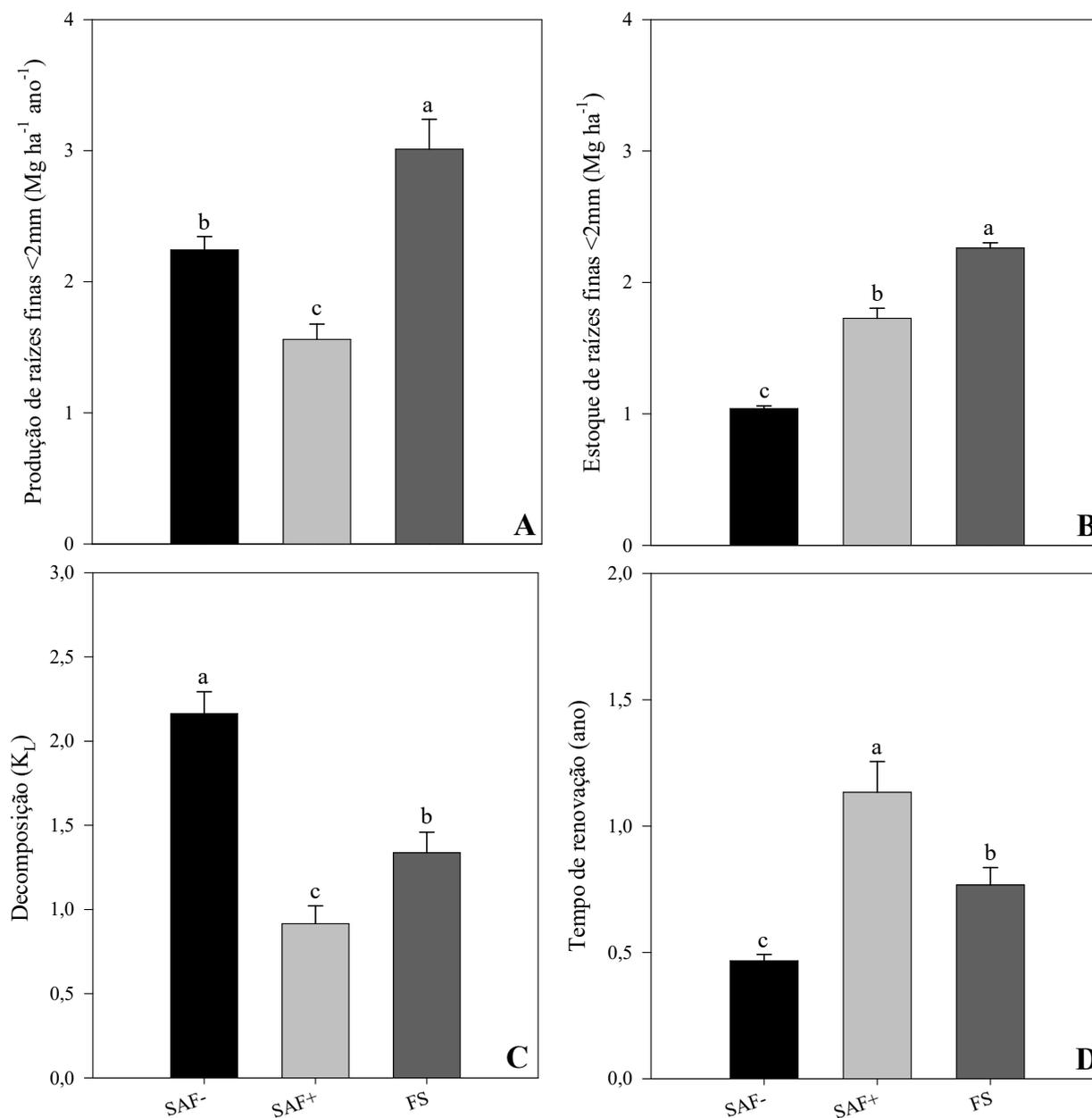
Fonte: autor.

Figura 2. Produção anual de serapilheira fina (A), Estoque de serapilheira fina (B), índice de decomposição da serapilheira fina (K_L) (C) e tempo de renovação da serapilheira fina (D) em sistema agroflorestal mais diversificado (SAF+) e sistema agroflorestal menos diversificado (SAF-) com palma de óleo e uma floresta sucessional (FS). Médias e barras de erro-padrão \pm (N=4); letras iguais não diferem, entre si, pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade.



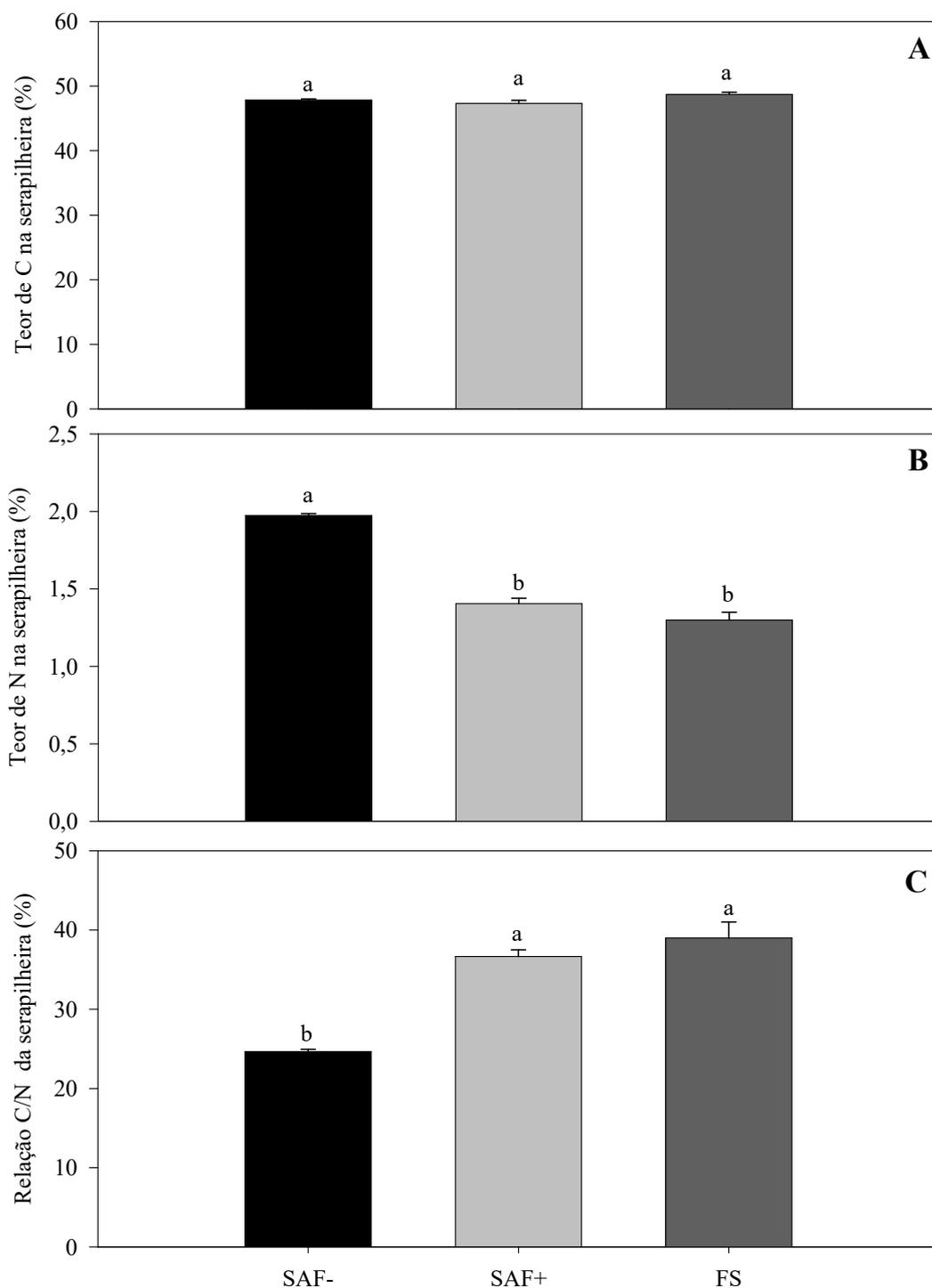
Fonte: autor.

Figura 3. Produção anual de raízes finas <2mm (A), Estoque de raízes finas <2mm (B), índice de decomposição de raízes finas (K_L) (C) e tempo de renovação de raízes finas (D) em sistema agroflorestal mais diversificado (SAF+) e sistema agroflorestal menos diversificado (SAF-) com palma de óleo e uma floresta sucessional (FS). Médias e barras de erro-padrão \pm (N=4); letras iguais não diferem, entre si, pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade.



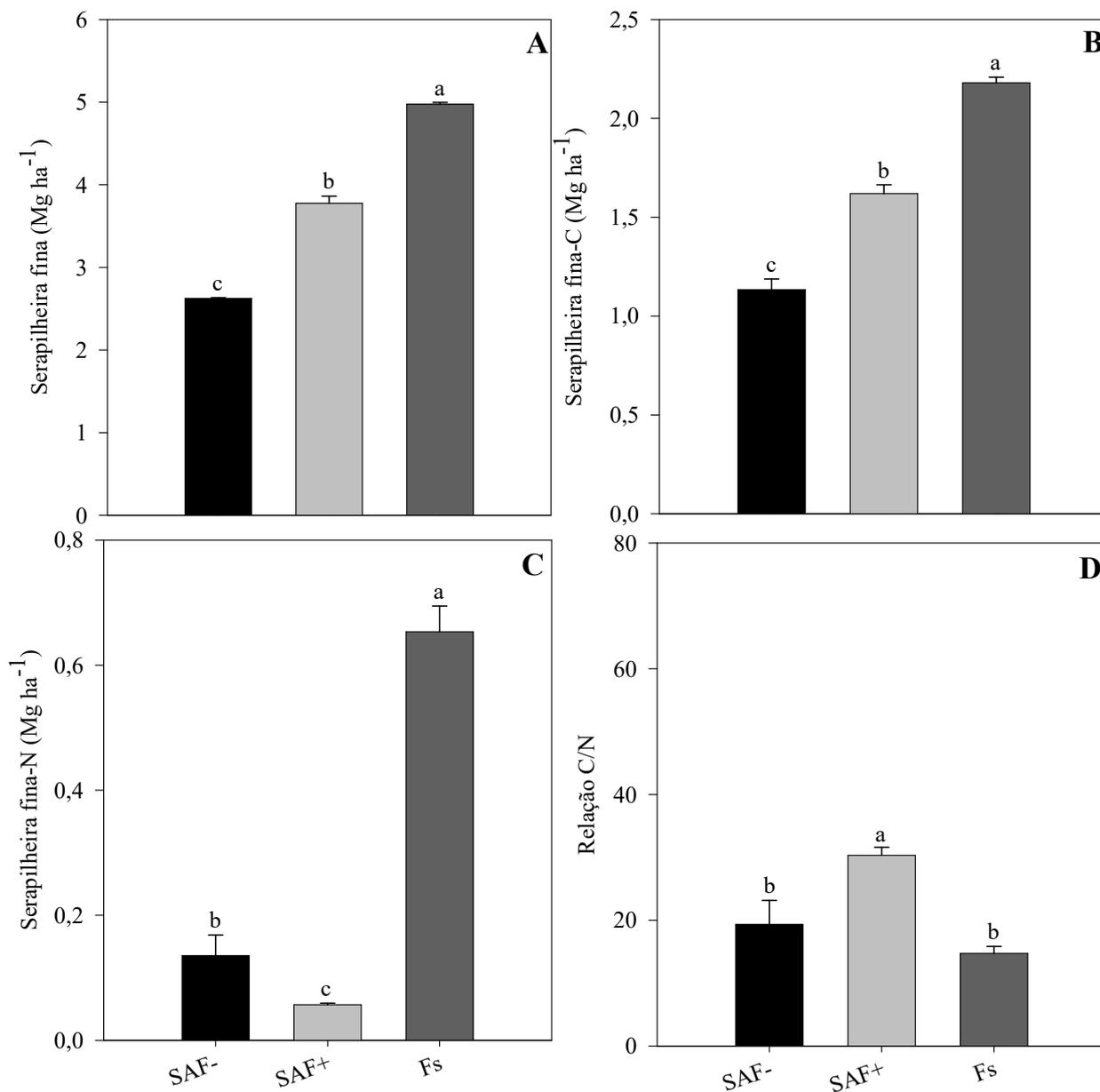
Fonte: autor.

Figura 4. Teor de carbono na serapilheira anual (A), teor de nitrogênio na serapilheira anual (B) e relação C/N na serapilheira anual (C) em sistema agroflorestal mais diversificado (SAF+) e sistema agroflorestal menos diversificado (SAF-) com palma de óleo e uma floresta sucessional (FS). Médias e barras de erro-padrão \pm (N=4); letras iguais não diferem, entre si, pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade.



Fonte: autor.

Figura 5. Estoque de serapilheira fina (A), estoque de carbono na serapilheira fina (B), estoque de nitrogênio na serapilheira fina (C) e relação C/N na serapilheira fina (D) em sistema agroflorestal mais diversificado (SAF+) e sistema agroflorestal menos diversificado (SAF-) com palma de óleo e uma floresta sucessional (FS). Médias e barras de erro-padrão \pm (N=4); letras iguais não diferem, entre si, pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade.



Fonte: autor