UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

CENTRO DE ENERGIA NUCLEAR NA AGRICULTURA

WANDERLEI BIELUCZYK

Crescimento e decomposição de raízes finas e qualidade do solo sob sistemas integrados de agricultura, pecuária e floresta (São Carlos – SP)

Piracicaba

2018

WANDERLEI BIELUCZYK

Crescimento e decomposição de raízes finas e qualidade do solo sob sistemas integrados de agricultura, pecuária e floresta (São Carlos – SP)

Versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011

Tese apresentada ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Ciências

Área de Concentração: Química na Agricultura e no Ambiente

Orientadora: Profª. Drª. Marisa de Cássia Piccolo
Co-orientador: Prof. Dr. Marcos Gervasio Pereira

Piracicaba
2018

AUTORIZO A DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
SeçãoTécnica de Biblioteca - CENA/USP

Bieluczyk, Wanderlei

Crescimento e decomposição de raízes finas e qualidade do solo sob sistemas integrados de agricultura, pecuária e floresta (São Carlos, SP) / Wanderlei Bieluczyk; Marisa de Cássia Piccolo. - - versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2018.
153 p. : il.

Tese (Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Ciências. Área de Concentração: Química na Agricultura e no Ambiente) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo, 2018.

1. Agricultura sustentável 2. Água do solo 3. Brachiaria 4. Eucalipto 5. Manejo do solo 6. Matéria orgânica do solo 7. Milho 8. Relação solo-planta 9. Sistema radicular 10. Sistemas agroflorestais I. Título.

CDU631.151.6 (581.144.2 + 631.4)

Elaborada por:
Marilia R.G. Henyei
CRB – 8/3631
Resolução CFB Nº 184 de 29 de setembro de 2017

A Deus,

Aos meus pais Waldir e Ivone Bieluczyk

Ao meu irmão Leandro Bieluczyk

Aos agricultores

E aos professores

Dedico

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por tornar essa etapa possível na minha vida.

Ao meu pai Waldir Fabiano Bieluczyk, a minha mãe Ivone Irene Cachanosky Bieluczyk e ao meu irmão Leandro Bieluczyk, pelo amor, ensino, dedicação, força e apoio incondicional.

Aos que contribuíram durante todo o período do doutorado na orientação, escrita e execução desse trabalho: minha orientadora Profa. Dra. Marisa de Cássia Piccolo; meu co-orientador Prof. Dr. Marcos Gervasio Pereira e meus supervisores na Embrapa Pecuária Sudeste Prof. Dr. Alberto Carlos de Campos Bernardi e Prof. Dr. José Ricardo Macedo Pezzopane.

Aos que também contribuíram cientificamente nas estratégias da execução do estudo, análises e/ou auxílio na elaboração da escrita da tese: Prof. Dr. Maurício Roberto Cherubin, Dr. George Lambais, Dr. Moacir Tuzzin de Moraes, Profa. Dra. Itaynara Batista e Prof. Dr. Carlos Tadeu dos Santos Dias.

Aos professores que esclareceram muitas dúvidas e sempre deram ótimos conselhos: Prof. Dr. Marcelo Zacharias Moreira; Prof. Dr. Plínio Barbosa de Camargo, Prof. Dr. Luiz Antônio Martinelli; Prof. Dr. Edicarlos Damacena de Souza; Prof. Dr. Ciro Abbud Righi e Prof. Dr. José Leonardo de Moraes Gonçalves.

Aos que ajudaram na execução das análises de laboratório, elaboração de figuras e trabalho no campo: Maria Helena de Castro Soares, Guilherme Furlan, Jéssica Battaier, Tamires Medeiros dos Santos, Déric Pimentel, Fabiana Barros, João Henrique Gaia Gomes, Ariovaldo Machado Fonseca Júnior e João Geraldo Brancalion.

Aos amigos que moraram comigo no período do doutorado, acompanharam as dificuldades e me auxiliaram em vários momentos: César Gonçalves Afonso Frizo, Vanessa Rizzi, Matheus Henrique Nunes, Tiago Rodrigues Tavares, Carlos Andrade, Maurício Martello, Graciele Angnes, Mateus Tonini Eitelwein e Rodrigo Trevisan.

Aos amigos do Laboratório de Ciclagem de Nutrientes e Laboratório de Gênese e Classificação dos Solos por aquela ajuda imprescindível em momentos que precisei: Lucas de Camargo Reis, Adibe Luiz Abdalla Filho, Cristiane Formigosa, Silvia Paiva, Rodrigo Figueiredo, Sidinei Júlio Beutler, Elias Mendes Costa, Deyvid Carvalho Maranhão, Eduardo Carvalho da Silva Neto, Anderson Ferrari e Shirlei Asunção.

Aos amigos João Paulo Francisco, Aijânio G.B Silva, Alessandro Jammal, Pedro Frizo, Ananias Junior, Bárbara Souza Cruz, Luiza Reis, Fernando Hinnah, Leonardo de Aro Galera, Deborah Rodrigues, Regina Gomes, Ana Cássia Machado, Juliana Fonseca, Thais F. Matioli, Letícia Frizzo Ferigolo e Tamires Souza pelo apoio e também momentos de descontração.

A todos do laboratório de ecologia isotópica (LEI), vocês foram imprescindíveis.

Ao pessoal do transporte do CENA-USP pelo companheirismo nos trabalhos no campo: Luis Cláudio Paladini, Ademir Bette, José Luiz Ramalho, Luiz Antônio Lopes de Azevedo e os demais da equipe.

À equipe da secretaria da pós-graduação (em especial ao Fábio, o Gilson a Cleide e a Magali) e a bibliotecária Marília que sempre foram muito atenciosos e esclareceram quaisquer dúvidas com muita dedicação.

Ao Laboratório de Ciclagem de Nutrientes e Laboratório de Gênese e Classificação dos Solos pelo apoio financeiro, espaço, equipamentos e reagentes para realização das minhas análises.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) em convênio com a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de doutorado, processo número 2014/17927-2.

Ao CNPq pela bolsa no primeiro ano do doutorado, processo 141701/2014-5, e a Embrapa Pecuária Sudeste por permitir e ajudar a conduzir esta pesquisa.

A todos que aqui não mencionei, mas de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho sinceramente agradeço.

OBRIGADO A TODOS!

RESUMO

BIELUCZYK, W. **Crescimento e decomposição de raízes finas e qualidade do solo sob sistemas integrados de agricultura, pecuária e floresta (São Carlos, SP)**. 2018. 153 p. Tese (Doutorado) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2018.

Os sistemas integrados de produção agropecuária (SIPAs) diversificam e intensificam a produção rural, embora ainda careçam de avanços e detalhamento dos processos e mecanismos envolvidos nas relações solo-planta-atmosfera, essenciais para adaptá-los e modelá-los para as diferentes eco-regiões e condições edafoclimáticas. Esse estudo investigou os efeitos da intensificação de sistemas integrados de produção agropecuária na quantidade, qualidade e origem da matéria orgânica do solo (MOS) e na dinâmica do crescimento e da decomposição radicular de espécies vegetais durante os períodos de lavoura e de pastejo. O experimento foi conduzido na Embrapa Pecuária Sudeste no estado de São Paulo, região sudeste do Brasil. Dois SIPAs foram avaliados: integração-lavoura-pecuária (ILP) e integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF). Duas áreas de referência foram utilizadas: pastagem extensiva (não degradada) e floresta estacional semidecidual (somente para avaliações sobre a MOS). Duas épocas de avaliação foram consideradas: período lavoura (verão de 2014/15) e período pastagem (inverno de 2015 e verão de 2015/16). A quantidade (teores e estoques de C e N), a qualidade (índices de manejo de C, frações leve, particulada e mineral) e a origem ($\delta^{13}C$ e $\delta^{15}N$) da MOS na camada de 0-0,40 m, e o crescimento e a decomposição dos sistemas radiculares das espécies vegetais e o fluxo de água no perfil do solo (0-70 cm) foram avaliados durante os períodos de lavoura e de pastagem. Adicionalmente, na ILPF também foram avaliados estes parâmetros de plantas e solos em três distâncias das linhas de cultivo do eucalipto (1,9; 4,5 e 7,3 m). Converter a pastagem extensiva em ILP resultou em: (i) aumento da disponibilidade de nutrientes (Ca, Mg, K e P) no solo; (ii) incrementos nos estoques de C e N, bem como de frações lábeis da MOS; (iii) manutenção de maiores conteúdos de água no solo; e, (iv) ciclagem do C e N, com maiores produção e decomposição de raízes, inclusive em camadas mais profundas do solo. Implementar a ILPF sob área utilizada para ILP promoveu os seguintes efeitos: (i) redução nos conteúdos de água no solo; (ii) perdas nos teores das frações lábeis da MOS (iii) limitações na produção de raízes no período de lavoura (principalmente em locais próximos as árvores) e incrementos na decomposição radicular, acarretando em maiores taxas de ciclagem das raízes no solo; (iv) aumentos na ciclagem do C e N; e, (v) ocorrências de associações simbióticas nas raízes, tais como os fungos ectomicorrízicos, perceptíveis pela técnica de análises radiculares

com uso de minirhizotron. De acordo com os resultados encontrados, sugere-se que o arranjo das árvores na ILPF seja reestruturado a partir do quarto ano de idade, quando estas limitaram o crescimento radicular e o aporte de matéria orgânica lábil, além de reduzir os conteúdos de água no solo. Entretanto, recomenda-se a intensificação da produção sob condições tropicais, pois a quantidade e a qualidade da MOS, e a produtividade e aprofundamento do sistema radicular foram incrementados ao longo do tempo sob SIPAs, principalmente na ILP.

Palavras-chave: carbono orgânico, *Eucalyptus urograndis*, minirhizotron, sistema radicular turnover, *Urochloa brizantha*, *Zea mays*

ABSTRACT

BIELUCZYK, W. **Growth and decomposition of fine roots and soil quality under integration of agriculture, livestock and forestry systems (São Carlos-SP)**. 2018. 153 p. Tese (Doutorado) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2018.

Integrated farming systems (IS) diversify and intensify rural production, although there are still gaps in advancing and detailing of the processes and mechanisms involved in the soil-plant-atmosphere relations, which are essential to adapt and model these systems for the different eco-regions and edafoclimatic conditions. This study investigated the effects of the intensification of IS on the quantity, quality and origin of soil organic matter (SOM) and on root growth and decomposition dynamics of plant species during cropping and grazing periods. The experiment was conducted at Embrapa Pecuária Sudeste, state of São Paulo, southeast region of Brazil. Two IS were evaluated: integrated crop-livestock system (ICL) and integrated crop-livestock-forest system (ICLF). Two references areas were used: extensive grazing (not degraded) and a semideciduous seasonal forest (only for SOM evaluations). Two evaluation periods were considered: cropping (summer of 2014/15) and grazing period (winter of 2015 and summer and winter of 2015/16). The quantity (C and N contents and stocks), quality (C management indexes, light, particulate and mineral SOM fractions) and the origin ($\delta^{13}C$ and $\delta^{15}N$) of SOM in the 0-0.40 m layer, and the growth and decomposition of the root systems of the plant species and water flow in the soil profile (0-0.7 m) were evaluated during cropping and grazing periods. In addition, in ICLF also these parameters of plants and soils were evaluated at three distances of eucalyptus rows (1.9, 4.5 and 7.3 m). The conversion of extensive grazing to ICL system resulted in: (i) increased availability of nutrients (Ca, Mg, K and P) in the soil; (ii) increases in C and N stocks, as well as labile fractions of SOM; (iii) maintenance of greater water content in the soil; and (iv) cycling of C and N, with higher root production and decomposition, even in deeper layers of the soil. Implementing the ICLF under the area used for ICL promoted the following effects: (i) reduction in soil water content; (iii) limitations in the root production in the cropping season (mainly in places near the trees) and increases in the root decomposition, resulting in higher cycling rates of the roots in the soil; (iv) increases in C and N cycling; and, (v) occurrence of symbiotic associations with the roots, such as ectomycorrhizal fungi, which were perceptible by the technique of root analysis using minirhizotrons. According to the results, it is suggested that the arrangement of the trees in the

ICLF system need to be restructured after the fourth year of age, when they limited the root growth and the amount of labile organic matter, besides reducing the contents of water in the soil. However, farming intensification is recommended under tropical conditions, as the SOM quantity and quality, and the productivity and deepening of the root system were increased during cultivations in the IS, especially in the ICL system.

Keywords: *Eucalyptus urograndis*, organic carbon, minirhizotron, root system, turnover, *Urochloa brizantha*, *Zea mays*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL **15**

Referências 18

2 EFEITOS DOS SISTEMAS AGRÍCOLAS INTEGRADOS NA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO NO SUDESTE DO BRASIL **23**

Resumo 23

Abstract 24

2.1 Introdução 25

2.2 Material e Métodos 27

2.2.1 Caracterização e histórico das áreas de estudo 27

2.2.2 Delineamento experimental e manejo das áreas 28

2.2.3 Épocas das amostragens do solo 29

2.2.4 Amostragens de solo e parâmetros analisados 31

2.2.4.1 Teores elementares e isotópicos e estoques de carbono e nitrogênio no solo 32

2.2.4.2 Fracionamento granulométrico, matéria orgânica leve e índices de manejo 33

2.2.4.3 Análise dos dados 33

2.3 Resultados 34

2.3.1. Fontes de entrada de carbono e nitrogênio nos sistemas 34

2.3.2 Teores de C e abundância natural de $\delta^{13}C$ no solo 35

2.3.3 Teores de N e abundância natural de $\delta^{15}N$ no solo 38

2.3.4 Estoques de carbono e nitrogênio 39

2.3.5 Matéria orgânica leve em água 41

2.3.6 Frações granulométricas da matéria orgânica do solo 43

2.3.7 Índices de manejo da matéria orgânica do solo 46

2.3.8 Correlações entre indicadores de qualidade do solo 46

2.4 Discussão 48

2.4.1 Adoção de sistema integrados e o acúmulo de C e N no solo 48

2.4.2 Intensificação dos sistemas de produção vs qualidade da matéria orgânica do solo 53

2.4.3 Matéria orgânica e a fertilidade do solo 55

2.5 Conclusões 56

Referências 57

APÊNDICES 67

3 DINÂMICA DA UMIDADE DO SOLO E DO CRESCIMENTO E DECOMPOSIÇÃO DAS RAÍZES FINAS EM SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA 73

Resumo 73

Abstract 74

3.1 Introdução 75

3.2 Material e Métodos 77

3.2.1. Caracterização e histórico das áreas de estudo 77

3.2.2 Delineamento experimental e manejo das áreas 77

3.2.3 Instalação do experimento e épocas das amostragens 77

3.2.4 Determinação do conteúdo de água do solo 77

3.2.5 Avaliação do crescimento radicular no período de verão 2014/15 (lavoura) 79

3.2.6 Avaliação do crescimento radicular sob pastejo 2015/16 (pastagem) 79

3.2.7 Processamento das imagens radiculares 79

3.2.8 Cálculos da produção, decomposição e da taxa de ciclagem das raízes 80

3.2.9 Dados meteorológicos 81

3.2.10. Análise dos dados 81

3.3 Resultados 82

3.3.1 Período de lavoura 82

3.3.1.1 Densidade do solo 82

3.3.1.2 Umidade do solo 84

3.3.1.3 Crescimento diário e acúmulo de raízes finas 87

3.3.1.4 Distribuição radicular e conteúdo de água no perfil do solo 91

3.3.1.5 Distribuição das raízes em grupos, comprimento total acumulado e decomposto 93

3.3.2 Período de pastagem 95

3.3.2.1 Densidade do solo 95

3.3.2.2 Umidade do solo 95

3.3.2.3 Crescimento diário e acúmulo de raízes finas 101

3.3.2.4 Distribuição radicular no perfil do solo 105

3.3.2.5 Distribuição das raízes em grupos, comprimento total acumulado e decomposto 107

3.3.3 Dinâmica de decomposição radicular 110

3.3.3.1 Decomposição acumulada e diária de raízes em sistemas integrados de produção no período de pastagem 110

3.3.3.2 Distribuição da decomposição radicular no perfil do solo 113

3.3.3.3 Distribuição das raízes vivas em classes de diâmetro 116

3.3.3.4 Ciclagem do sistema radicular 116

3.4 Discussão 119

3.4.1 Período da lavoura 119

3.4.1.1 Adoção do sistema de integração lavoura-pecuária (ILP): alterações na qualidade física do solo e no crescimento radicular das plantas 119

3.4.1.2 Adoção do sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF): alterações na qualidade física do solo e no crescimento radicular das plantas 122

3.4.2 Período de pastagem 125

3.4.2.1 Qualidade física do solo e os efeitos no crescimento radicular das plantas sob período de pastagem em sistema de integração lavoura-pecuária (ILP) 125

3.4.2.2 Qualidade física do solo e os efeitos no crescimento radicular das plantas sob período de pastagem em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) 127

3.4.3 Dinâmica de decomposição das raízes 129

3.4.3.1 Adoção do sistema de integração lavoura-pecuária (ILP): alterações na dinâmica de decomposição das raízes 129

3.4.3.2 Adoção do sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF): alterações na dinâmica de decomposição das raízes 131

3.5 Conclusões 133

Referências 134

APÊNDICES 145

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS 149

1 INTRODUÇÃO GERAL

A população mundial atual excede 7,6 bilhões de pessoas e estima-se que em 2050 esse número ultrapassará 9,8 bilhões (UN DESA, 2017). As adicionais 46,9 milhões de pessoas por ano necessitam de abrigo, saúde, educação, emprego, transporte, água e ar limpos e, principalmente, de alimentos (WALDORF, 2018). O incremento na necessidade de alimentos não se resume ao crescimento populacional, mas também deve acompanhar a maior demanda calórica *per capita* (TILMAN et al., 2011) e a maior expectativa de vida (DONG; MILHOLLAND; VIJG, 2016), frente ao progresso tecnológico e as melhorias na renda, salubridade, educação e saúde (OEPPEN; VAUPEL, 2002; DONG; MILHOLLAND; VIJG, 2016). Nesse cenário, a fim de alimentar a população em 2050 deverão ser produzidos 3 bilhões de toneladas de cereais e 470 milhões de toneladas de carne por ano (FAO, 2009), ou seja, de acordo com a produção atual haverá necessidade de adicionais 358 e 148 milhões de toneladas de cereais e carne, respectivamente (FAO, 2018). Além disso, frente a crescente necessidade de substituir fontes de energia fóssil, a agricultura deverá atender a demanda da produção de bioenergia, que em 2050 necessitará, globalmente, de uma área entre 50 e 200 Mha (WOODS et al., 2015).

Para suprir tais demandas consideram-se as seguintes possibilidades para o setor agrícola: (i) avançar a fronteira agrícola, especialmente nas regiões tropicais. Apesar de possibilitar um rápido incremento na produção agrícola, esta estratégia vem associada a uma série de passivos ambientais, como a redução da biodiversidade (BARLOW et al., 2016) (BARLOW et al., 2017) e alteração dos ciclos do C e da água (LAURANCE; SAYER; CASSMAN, 2014), afetando a provisão de múltiplos serviços ecossistêmicos (FOLEY et al., 2005); (ii) recuperar as atuais áreas degradadas pela mudança no uso das terras, que compreendem cerca de 24 % da área global (3,5 bilhões de hectares) da qual 20-25 % são pastagens degradadas (PETE et al., 2015); (iii) aumentar a produtividade em áreas agrícolas, seja pelo apoio de ferramentas como melhoramento genético, seja por práticas de manejo que promovam a intensificação da produção dos sistemas agrícolas (BALBINO et al., 2011; SÁ et al., 2017).

O fator chave para a adoção de qualquer atividade agrícola pelo agricultor é a viabilidade econômica desta atividade. Nessa justificativa, a abertura de novas áreas tem sido uma alternativa mais barata para aumentar a produção, impulsionando o avanço da fronteira agrícola (ALVES; MADARI; BODDEY, 2017). No entanto, além dos danos promovidos pela eliminação dessa vegetação natural, a agricultura tradicionalista tende a permanecer com

sistemas padronizados e simplificados de cultivo, com atividades agrícolas, pecuárias e florestais independentes e dissociadas (BALBINO; BARCELLOS; STONE, 2011). Esse modelo de produção eleva o custo energético e a demanda por recursos naturais não-renováveis ao longo do tempo (FRANZLUEBBERS; STUEDEMANN, 2014), além de gradativamente deteriorar a qualidade dos solos (PALM et al., 2014), reduzir a produtividade dos sistemas (SANDERSON et al., 2013) e degradar as condições ecológicas (e.g. poluição de corpos hídricos) (FOLEY et al., 2005). Globalmente, essas práticas de mudança do uso da terra têm causado uma perda histórica de carbono dos solos de 148 bilhões de toneladas, o que reflete diretamente nas mudanças climáticas (SÁ et al., 2017).

Diante desse cenário, o principal desafio da agricultura atual é aumentar a produtividade das áreas e simultaneamente otimizar o uso da água, dos fertilizantes e dos solos (FISCHER; EDMEADES, 2010; FOLEY et al., 2011). A adoção de tecnologias de sistemas integrados de produção agropecuária (SIPAs) tem sido fundamental para recuperar áreas degradadas ou em processo de degradação pela agricultura/pecuária tradicional (SALTON et al., 2014), consistindo em uma das principais estratégias para intensificar a produção e mitigar os efeitos das mudanças climáticas (OLIVEIRA et al., 2018).

Os SIPAs combinam sinergicamente atividades agrícolas, pecuárias e/ou florestais em uma mesma área, incrementando a ciclagem dos nutrientes, diversificando a produção rural e em função disso reduzindo os riscos econômicos do agricultor (BALBINO; BARCELLOS; STONE, 2011). No Brasil a implantação de SIPAs está recebendo apoio governamental, pois estes sistemas estão compreendidos no Plano de Agricultura de Baixo Carbono (Plano ABC). O plano ABC é um programa federal que oferece linha de empréstimos, com baixos juros, para agricultores que desejam implementar práticas agrícolas sustentáveis (BRASIL, 2012). A adoção das práticas previstas no Plano ABC (e em especial dos SIPAS) é essencial para que o Brasil cumpra as metas de redução de 35% e 43% das emissões de gases de efeito estufa até 2020 e 2030, comparado ao ano base de 2005 acordadas em 2015 na 21º Conferência das Partes em Paris (UNFCC, 2015).

Entretanto, ainda há um longo caminho a ser percorrido para aperfeiçoar os arranjos espaciais e temporais dos SIPAs para as diferentes condições edafoclimáticas (GIL; SIEBOLD; BERGER, 2015), e a adaptabilidade desses sistemas deve ser modelada para as diversas eco-regiões e objetivos da produção da propriedade rural (SULC; FRANZLUEBBERS, 2014; OLIVEIRA et al., 2018). A qualidade do solo pode atuar como um importante indicador da sustentabilidade desses sistemas de cultivo, pois o solo é o componente que permanece a longo prazo, e nele convergem as mudanças químicas, físicas e biológicas (MORAES et al., 2014). A

qualidade do solo é um conceito complexo, definido como a capacidade do solo, natural ou antropizado, funcionar de modo que sustente a produtividade biológica, qualidade ambiental e saúde das plantas, animais e pessoas (KARLEN et al., 1997). As alterações na qualidade dos solos podem ser monitoradas por um conjunto de indicadores sensíveis ao manejo, que forneça informações úteis sobre as funções desempenhadas pelos solos (KARLEN; DITZLER; ANDREWS, 2003), possibilitando identificar agroecossistemas e práticas de manejo mais sustentáveis (CHERUBIN; TORMENA; KARLEN, 2017).

A degradação ou as melhorias nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo afetam diretamente o crescimento das plantas e a produção primária do sistema de produção. Em SIPAs tem-se dado maior atenção aos impactos do sistema na produção de biomassa da parte aérea e produtividade de grãos e madeira (FRANCHINI et al., 2014; GAMA; VOLPE; LEMPP, 2014; TONINI et al., 2016; PEZZOPANE et al., 2017). No entanto, ainda é incipiente o conhecimento da dinâmica de crescimento do sistema radicular das diferentes espécies cultivadas em sucessão e/ou consórcios nestes sistemas. A importância de avaliar o crescimento e a decomposição de raízes finas (diâmetro ≤ 2 mm) está associada à incorporação de matéria orgânica no solo (RASSE; RUMPEL; DIGNAC, 2005), respostas positivas na estrutura dos solos e qualidade física (MORAES et al., 2016), na ciclagem e liberação de fontes nutricionais para as plantas e biota do solo (CAMPOS; CRUZ; ROCHA, 2017), associações simbióticas com bactérias fixadoras de nitrogênio (DOBEREINER, 1997) e fungos micorrízicos (LAMBAIS et al., 2017), e suas funções de sustentação das plantas e de absorção de água e nutrientes (MCCORMACK et al., 2017).

Diante desse contexto, neste estudo foram investigados os efeitos de níveis de intensidade de cultivo em SIPAs (integração-lavoura-pecuária - ILP e integração lavoura-pecuária-floresta - ILPF) nos atributos indicadores da qualidade do solo e sobre a dinâmica de crescimento e decomposição de raízes finas em um Latossolo no Sudeste do Brasil. Um sistema de floresta nativa e/ou outro de pastagem extensiva (não degradada) foram utilizados como referências. Visando compreender melhor os impactos da adoção de SIPAs foi formulada a seguinte hipótese geral: o uso de sistemas integrados de produção agropecuária mais intensivos incrementa a produção total de raízes finas aprofundando o sistema radicular das culturas, propiciando maior sequestro de carbono e qualidade da matéria orgânica do solo. Os objetivos específicos do estudo consistiram em: i) determinar o potencial de acúmulo de carbono (C) e nitrogênio (N) no solo em sistemas integrados de produção agropecuária;

ii) avaliar quais são os efeitos do uso de lavoura e do pastejo nas frações e conteúdos totais da matéria orgânica do solo (MOS) nos sistemas integrados de produção agropecuária; iii) quantificar a influência do C e N na fertilidade do solo; iv) quantificar a dinâmica do crescimento e decomposição radicular de espécies vegetais durante o ciclo de cultivo de lavoura e período de pastejo em sistemas integrados de produção agropecuária; e, v) relacionar os fluxos de água e a densidade do solo com a produtividade e decomposição radicular;

Para alcançar os objetivos aqui mencionados esta tese foi organizada em quatro capítulos. Brevemente, este **primeiro** capítulo apresenta uma pequena introdução referente aos tópicos estudados na pesquisa do doutorado. No **segundo** foi estudado os efeitos da intensificação de sistemas integrados de produção agropecuária na quantidade (teores e estoques totais de C e N) e qualidade da MOS (frações granulométricas da MOS, MO leve, e índices de manejo de C), bem como na origem do C e N (abundância natural de $\delta^{13}C$ e $\delta^{15}N$) estocado no solo. No **terceiro** o foco foram as alterações da dinâmica de crescimento e decomposição radicular das culturas do período de lavoura e de pastagem no perfil do solo devido às variações dos fluxos de água promovidas pelos sistemas integrados de produção agropecuária. Finalmente, para a associação dos dois capítulos anteriores, no **quarto** são apresentadas as considerações finais desse estudo inter-relacionando os resultados obtidos. A partir disso são apresentadas as conclusões finais.

Referências

ALVES, B. J. R.; MADARI, B. E.; BODDEY, R. M. Integrated crop–livestock–forestry systems: prospects for a sustainable agricultural intensification. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Heidelberg, v. 108, n. 1, p. 1–4, 2017.

BALBINO, L. C.; BARCELLOS, A. de O.; STONE, L. F. **Marco referencial**: integração lavoura-pecuária-floresta (iLPF). Brasília, DF: Embrapa, 2011.

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

BARLOW, J.; LENNOX, G. D.; FERREIRA, J.; BERENGUER, E.; LEES, A. C.; NALLY, R. Mac; THOMSON, J. R.; FERRAZ, S. F. D. B.; LOUZADA, J.; OLIVEIRA, V. H. F.; PARRY, L.; RIBEIRO DE CASTRO SOLAR, R.; VIEIRA, I. C. G.; ARAGAÕ, L. E. O. C.; BEGOTTI, R. A.; BRAGA, R. F.; CARDOSO, T. M.; JR, R. C. D. O.; SOUZA, C. M.; MOURA, N. G.; NUNES, S. S.; SIQUEIRA, J. V.; PARDINI, R.; SILVEIRA, J. M.; VAZ-DE-MELLO, F. Z.; VEIGA, R. C. S.; VENTURIERI, A.; GARDNER, T. A. Anthropogenic disturbance in tropical forests can double biodiversity loss from deforestation. **Nature**, London, v. 535, n. 7610, p. 144–147, 2016.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Plano setorial de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas para a consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono na agricultura**: Plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono). Brasília, DF: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento/Ministério do Desenvolvimento Agrário, 2012.

CAMPOS, A.; CRUZ, L.; ROCHA, S. Mass, nutrient pool, and mineralization of litter and fine roots in a tropical mountain cloud forest. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 575, p. 876–886, 2017.

CHERUBIN, M. R.; TORMENA, C. A.; KARLEN, D. L. Soil quality evaluation using the Soil Management Assessment Framework (SMAF) in Brazilian Oxisols with contrasting texture. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 41, p. 1–18, 2017.

DOBEREINER, J. Biological nitrogen fixation in the tropics: Social and economic contributions. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 29, n. 5–6, p. 771–774, 1997.

DONG, X.; MILHOLLAND, B.; VIJG, J. Evidence for a limit to human lifespan. **Nature**, London, v. 538, n. 7624, p. 257–259, 2016.

FAO. **How to Feed the World in 2050**. Executive Summary, Rome, 2009. 35 p. Disponível em: <http://www.fao.org/wsfs/forum2050/wsfs-forum/en/>.

FAO. **World Food Situation**. Disponível em: <http://www.fao.org/worldfoodsituation>. Rome, 2018. Acesso em: 19 mar. 2018.

FISCHER, R. A.; EDMEADES, G. O. Breeding and cereal yield progress. **Crop Science**, Madison, v. 50, p. S-85-S-98, 2010.

FOLEY, J. A.; DEFRIES, R.; ASNER, G. P.; BARFORD, C.; BONAN, G.; CARPENTER, S. R.; CHAPIN, F. S.; COE, M. T.; DAILY, G. C.; GIBBS, H. K.; HELKOWSKI, J. H.; HOLLOWAY, T.; HOWARD, E. A.; KUCHARIK, C. J.; MONFREDA, C.; PATZ, J. A.; PRENTICE, I. C.; RAMANKUTTY, N.; SNYDER, P. K. Global consequences of land use. **Science**, Washington, DC, v. 309, n. 5734, p. 570–574, 2005.

FOLEY, J. A.; RAMANKUTTY, N.; BRAUMAN, K. A.; CASSIDY, E. S.; GERBER, J. S.; JOHNSTON, M.; MUELLER, N. D.; O'CONNELL, C.; RAY, D. K.; WEST, P. C.; BALZER, C.; BENNETT, E. M.; CARPENTER, S. R.; HILL, J.; MONFREDA, C.; POLASKY, S.; ROCKSTRÖM, J.; SHEEHAN, J.; SIEBERT, S.; TILMAN, D.; ZAKS, D. P. M. Solutions for a cultivated planet. **Nature**, London, v. 478, n. 7369, p. 337–342, 2011.

FRANCHINI, J. C.; JUNIOR, A. A. B.; SICHIERI, F. R.; DEBIASI, H.; CONTE, O. Yield of soybean, pasture and wood in integrated crop-livestock-forest system in Northwestern Paraná state, Brazil. **Revista Ciência Agronômica**, Recife, v. 45, n. 5, p. 1006–1013, 2014.

FRANZLUEBBERS, A. J.; STUEDEMANN, J. A. Crop and cattle production responses to tillage and cover crop management in an integrated crop-livestock system in the southeastern USA. **European Journal of Agronomy**, Montrouge Cedex, v. 57, p. 62–70, 2014.

GAMA, T. da C. M.; VOLPE, E.; LEMPP, B. Biomass accumulation and chemical composition of Massai grass intercropped with forage legumes on an integrated crop-livestock-forest system. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 43, n. 6, p. 279–288, 2014.

GIL, J.; SIEBOLD, M.; BERGER, T. Adoption and development of integrated crop-livestock-forestry systems in Mato Grosso, Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 199, p. 394–406, 2015.

KARLEN, D. L.; DITZLER, C. A.; ANDREWS, S. S. Soil quality: Why and how? **Geoderma**, Amsterdam, v. 114, n. 3–4, p. 145–156, 2003.

KARLEN, D. L.; MAUSBACH, M. J.; DORAN, J. W.; CLINE, R. G.; HARRIS, R. F.; SCHUMAN, G. E. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation (A Guest Editorial). **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, n. 1, p. 4, 1997.

LAMBAIS, G. R.; JOURDAN, C.; DE CÁSSIA PICCOLO, M.; GERMON, A.; PINHEIRO, R. C.; NOUVELLON, Y.; STAPE, J. L.; CAMPOE, O. C.; ROBIN, A.; BOUILLET, J. P.; LE MAIRE, G.; LACLAU, J. P. Contrasting phenology of *Eucalyptus grandis* fine roots in upper and very deep soil layers in Brazil. **Plant and Soil**, The Hague, v. 421, n. 1–2, p. 301–318, 2017.

LAURANCE, W. F.; SAYER, J.; CASSMAN, K. G. Agricultural expansion and its impacts on tropical nature. **Trends in Ecology and Evolution**, Barking, v. 29, n. 2, p. 107–116, 2014.

MCCORMACK, M. L.; GUO, D.; IVERSEN, C. M.; CHEN, W.; EISSENSTAT, D. M.; FERNANDEZ, C. W.; LI, L.; MA, C.; MA, Z.; POORTER, H.; REICH, P. B.; ZADWORNY, M.; ZANNE, A. Building a better foundation: improving root-trait measurements to understand and model plant and ecosystem processes. **New Phytologist**, London, v. 215, n. 1, p. 27–37, 2017.

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

MORAES, M. T. de; DEBIASI, H.; CARLESSO, R.; FRANCHINI, J. C.; SILVA, V. R. da; LUZ, F. B. da. Soil physical quality on tillage and cropping systems after two decades in the subtropical region of Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 155, n. 1, p. 351–362, 2016.

OEPPEN, J.; VAUPEL, J. W. Broken limits to life expectancy. **Science**, Washington, DC, v. 296, p. 1029–1031, 2002.

OLIVEIRA, J. M.; MADARI, B. E.; CARVALHO, M. T. D. M.; ASSIS, P. C. R.; SILVEIRA, A. L. R.; DE LELES LIMA, M.; WRUCK, F. J.; MEDEIROS, J. C.; MACHADO, P. L. O. D. A. Integrated farming systems for improving soil carbon balance in the southern Amazon of Brazil. **Regional Environmental Change**, New York, v. 18, n. 1, p. 105–116, 2018.

PALM, C.; BLANCO-CANQUI, H.; DECLERCK, F.; GATERE, L.; GRACE, P. Conservation agriculture and ecosystem services: An overview. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 187, p. 87–105, 2014.

SMITH, P.; HOUSE, J. I.; BUSTAMANTE, M.; SOBOCKÁ, J.; HARPER, R.; PAN, G.; WEST, P. C.; CLARK, J. M.; ADHYA, T.; RUMPEL, C.; PAUSTIAN, K.; KUIKMAN, P.; COTRUFO, M. F.; ELLIOTT, J. A.; MCDOWELL, R.; GRIFFITHS, R. I.; ASAKAWA, S.; BONDEAU, A.; JAIN, A. K.; MEERSMANS, J.; PUGH, T. A. Global change pressures on soils from land use and management. **Global Change Biology**, Oxford, v. 22, n. 3, p. 1008–1028, 2015.

PEZZOPANE, J. R. M.; BERNARDI, A. C. C.; BOSI, C.; OLIVEIRA, P. P. A.; MARCONATO, M. H.; PEDROSO, A. de F.; ESTEVES, S. N. Forage productivity and nutritive value during pasture renovation in integrated systems. **Agroforestry Systems**, Heidelberg, v. 1, p. 1–11, 2017.

RASSE, D. P.; RUMPEL, C.; DIGNAC, M.-F. Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilization. **Plant and Soil**, The Hague, v. 269, n. 1–2, p. 341–356, 2005.

SÁ, J. C. de M.; LAL, R.; CERRI, C. C.; LORENZ, K.; HUNGRIA, M.; DE FACCIO CARVALHO, P. C. Low-carbon agriculture in South America to mitigate global climate change and advance food security. **Environment International**, Oxford, v. 98, p. 102–112, 2017.

SALTON, J. C.; MERCANTE, F. M.; TOMAZI, M.; ZANATTA, J. A.; CONCENÇO, G.; SILVA, W. M.; RETORE, M. Integrated crop-livestock system in tropical Brazil: Toward a sustainable production system. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 190, p. 70–79, 2014.

SANDERSON, M. A.; ARCHER, D.; HENDRICKSON, J.; KRONBERG, S.; LIEBIG, M.; NICHOLS, K.; SCHMER, M.; TANAKA, D.; AGUILAR, J. Diversification and ecosystem services for conservation agriculture: Outcomes from pastures and integrated crop-livestock systems. **Renewable Agriculture and Food Systems**, Cambridge, v. 28, n. 2, p. 129–144, 2013.

SULC, R. M.; FRANZLUEBBERS, A. J. Exploring integrated crop-livestock systems in different ecoregions of the United States. **European Journal of Agronomy**, Montrouge Cedex, v. 57, p. 21–30, 2014.

TILMAN, D.; BALZER, C.; HILL, J.; BEFORT, B. L. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA**, Washington, DC, v. 108, n. 50, p. 20260–20264, 2011.

TONINI, H.; MORALES, M. M.; MENEGUCI, J. L. P.; ANTONIO, D. B. A.; WRUCK, F. J. Biomassa e área foliar de clones de eucalipto em ILPF: Implicações para a Desrama. **Nativa**, Sinop, v. 4, n. 5, p. 271–276, 2016.

UN DESA. **World Population Prospects**. The 2017 Revision Key Findings and Advance Tables. New York: UN - Department of Economic and Social Affairs, 2017. 46 p. Disponível em: <https://esa.un.org/unpd/wpp/Publications/Files/WPP2017_KeyFindings.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2018.

UNFCC. **Paris Agreement**. Paris, 2015. Disponível em: <http://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf>. Acesso em: 19 mar. 2018.

WALDORF, B. S. Inhabitants of Earth. In: EISE, J.; FOSTER, K. (Ed.). **How to Feed the World.** Washington, DC: Island Press, 2018. p. 5–23.

WOODS, J.; LYND, L. R.; LASER, M.; BATISTELLA, M.; VICTORIA, D. C.; KLINE, K.; FAAIJ, A. Bioenergy & Sustainability: bridging the gaps. In: SOUZA, G. M.; VICTORIA, R. L.; JOLY, C. A.; VERDADE, L. M. (Ed.). **Bioenergy & sustainability**: bridging the gaps. Paris: Scientific Committee on Problems of the Environment - SCOPE, 2015. p. 258–301.

2 EFEITOS DOS SISTEMAS AGRÍCOLAS INTEGRADOS NA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO NO SUDESTE DO BRASIL

Resumo

Os sistemas integrados de produção agropecuária (SIPAs) intensificam a produção nas áreas combinando atividades agrícolas, pecuárias e florestais, consistindo em ferramentas-chave para compensar as emissões de carbono (C) promovidas pelas mudanças do uso da terra. O objetivo desse estudo foi investigar os efeitos de níveis de intensidade de cultivo (integração-lavoura-pecuária - ILP e integração lavoura-pecuária-floresta - ILPF) sobre a quantidade, a qualidade e a origem da matéria orgânica do solo (MOS). Um sistema de floresta nativa e outro de pastagem extensiva (não degradada) foram utilizados como referências. Os sistemas ILP e ILPF alternaram o cultivo do milho (*Zea mays*) com dois anos consecutivos de pastejo de bovinos de corte na braquiária (*Urochloa bryzantha*). Exclusivamente na ILPF foram plantadas árvores de eucalipto (*Eucalyptus urograndis*) em fileiras simples de 15 x 2 m. O estudo foi conduzido na Embrapa Pecuária Sudeste no estado de São Paulo, região sudeste do Brasil. Ao longo do período estudado foram realizadas três avaliações de acordo com o manejo dos SIPAs: em 2014, após dois anos de pastejo; em 2015, após o cultivo da lavoura; e, em 2016, após um ano sucessivo de pastejo. Em todos os sistemas de manejo (pastagem extensiva (PE), ILP e ILPF) os teores de C, de nitrogênio (N) e respectivos estoques aumentaram ao longo dos cultivos, principalmente entre 2015 e 2016. O período de agricultura melhorou concomitantemente a fertilidade do solo e o aporte de frações lábeis da MOS. Dentre os sistemas cultivados, a ciclagem da MOS foi maior nos SIPAs visto aos maiores teores das frações lábeis e de $\delta^{13}C$, correlacionados positivamente ($p < 0,001$) com a soma das bases e a disponibilidade de fósforo no solo. A redução do $\delta^{15}N$ e incremento do $\delta^{13}C$ ao longo dos cultivos levam a concluir que os incrementos dos estoques de N e C são principalmente provenientes de frações mais lábeis da MOS. Recomenda-se a intensificação da produção sob condições tropicais, pois a quantidade (teores e estoques de C e N) e a qualidade (índices de manejo de C, frações leve, particulada e mineral) da MOS foi incrementada ao longo do tempo sob SIPAs, principalmente na ILP. Diante dos resultados encontrados sugere-se que o arranjo das árvores na ILPF seja reestruturado a partir do quarto ano de idade, quando estas passaram a limitar o aporte de matéria orgânica leve ao solo.

Palavras-chave: estoques de carbono total, *Eucalyptus urograndis*, frações lábeis da matéria orgânica, integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), *Urochloa brizantha*, $\delta^{13}C$

Abstract

Integrated farming systems (IS) intensify crop production by combining agricultural, livestock and forestry activities, and are a key to offset carbon emissions (C) caused by land use changes. This study investigated the effects of intensity levels of cultivation (integrated crop-livestock – ICL and integrated crop-livestock-forest – ICLF) on quantity, quality and origin of soil organic matter (SOM). A native forest and an extensive grazing system (not degraded) were used as references. ICL and ICLF systems alternated corn cultivation (*Zea mays*) with two consecutive years of grazing of beef cattle on grass (*Urochloa bryzantha*). In ICLF, eucalyptus trees (*Eucalyptus urograndis*) were planted in simple rows 15 x 2 m. The study was conducted at Embrapa Livestock Southeast in the state of São Paulo, southeastern Brazil. Three evaluations were carried out according to the IS management: in 2014, after two years of grazing; in 2015, after crop cultivation; and in 2016, after a successive grazing year. In all management systems (extensive grazing (EG), ICL and ICLF) contents of carbon (C), nitrogen (N) and their stocks increased during the crops, mainly between 2015 and 2016. The crop period improved with soil fertility and the amount of SOM labile fractions. Among the cultivated systems, SOM cycling was greater at larger levels of labile fractions and $\delta^{13}C$, correlated positively ($p < 0.001$) with the sum of bases (SB) and phosphorus (P) availability in the soil. The reduction of $\delta^{15}N$ and increase of $\delta^{13}C$ in the crops showed that increases of N and C stocks come from mainly the SOM liable fractions. Farming intensification is recommended under tropical conditions, as the quantity (levels and stocks of C and N) and quality (C management indexes, light, particulate and mineral fractions) of SOM were increased during the cultivations in the IS, mainly in ICL. According to the results, the arrangement of trees in ICLF shoud be restructured after the fourth year of age, when they began to limit the amount of light OM to the soil.

Keywords: *Eucalyptus urograndis*, integrated crop-livestock-forest (ICLF), organic matter labile fractions, total carbon stocks, *Urochloa brizantha*, $\delta^{13}C$

2.1 Introdução

Os sistemas agrícolas baseados no revolvimento intensivo do solo e monocultura têm sido um dos principais agentes da degradação dos solos, reduzido o potencial produtivo das terras (BALBINO et al., 2011). Por outro lado, alguns sistemas conservacionistas de agricultura como o sistema plantio direto (SPD), quando bem conduzidos, com uso do revolvimento mínimo, rotação de culturas e cobertura permanente (SÁ et al., 2017; HOK et al., 2018), tem sido amplamente utilizados para melhora da qualidade e sustentabilidade desses solos, por meio do incremento dos estoques de C no solo (SÁ et al., 2017), ciclagem de nutrientes (FERREIRA et al., 2018), atividade biológica (MACHADO; SILVA, 2001), e consequentemente refletindo em aumento da produtividade das culturas (PITTELKOW et al., 2015). Os sistemas integrados de produção agropecuária (SIPAs) adotam tais princípios de conservação dos solos e promovem interações sinérgicas entre a produção animal e vegetal (FRANZLUEBBERS; STUEDEMANN, 2014). Os SIPAs assemelham-se aos ecossistemas naturais, incrementando a complexidade dos sistemas de cultivos (GROPPO et al., 2015), intensificando o uso da terra (OLIVEIRA et al., 2018), aumentando e diversificando a renda e a produção rural (CARVALHO et al., 2010b; MORAES et al., 2014).

O uso da terra com pastagem representa cerca de ¾ da área agrícola brasileira (196 Mha) (FAO, 2015), e caracteriza-se pelo manejo extensivo, com baixa lotação animal e uso insuficiente (ou ausência) de corretivos e fertilizantes (STRASSBURG et al., 2014; ALVES et al., 2017). No entanto, a crescente demanda pelo incremento da produção de alimento de maneira eficiente e sustentável tem instigado cientistas, técnicos e produtores rurais a buscarem alternativas de intensificação da pecuária brasileira. Assim, diferentes configurações de SIPAs (e.g., lavoura-pecuária - ILP, lavoura-pecuária-floresta - ILPF, pecuária-floresta - IPF, lavoura-floresta - ILF) têm sido testadas e adotadas em todas as regiões do país, cobrindo uma área de mais de 11 Mha (EMBRAPA, 2016). A adoção de sistemas integrados é considerada umas das principais estratégias para sequestrar C no solo (BRASIL, 2012) e mitigar as emissões de gases de efeito estufa que estão diretamente associadas às mudanças climáticas globais (SÁ et al., 2017).

Na ILP, a fase agrícola onde cultiva-se culturas anuais (e.g., milho ou soja) no verão chuvoso (outubro à março) consorciados com gramíneas forrageiras (e.g. braquiária) é alternada com o pastejo de bovinos após a colheita da lavoura (CARVALHO et al., 2010b). Os sistemas como a ILPF acrescentam maior diversidade de componentes produtivos e complexidade no sistema por haver mais de um estrato vegetal, onde ocorrem interações no tempo e no espaço, que podem ser positivas, neutras ou negativas (PEZZOPANE

et al., 2017). A presença de espécies arbóreas (e.g., eucalipto) podem promover benefícios tais como as associações micorrízicas (LAMBAIS et al., 2017), melhorias no conforto térmico do animal (KARVATTE et al., 2016), homogeneização da distribuição dos excretas no pastejo (MONTEIRO; WERNER, 1989), incrementos na ciclagem de nutrientes e sequestro de C no solo (OLIVEIRA et al., 2018). Por outro lado, a presença dessas espécies pode causar impactos negativos ao sistema, tais como os efeitos alelopáticos (CARVALHO et al., 2015), baixa radiação no sub-bosque; e em alguns casos, reduções do crescimento e produtividade das culturas e/ou forragens (PAULA et al., 2013; PEZZOPANE et al., 2017).

As sinergias entre os componentes dos SIPAs são dependentes das condições edafoclimáticas (OLIVEIRA et al., 2018), das espécies cultivadas, do arranjo espacial e temporal das culturas, e do manejo da adubação e do pastejo (SALTON et al., 2014; GIL; SIEBOLD; BERGER, 2015). Diante desses aspectos, a adaptabilidade do conceito de SIPAs deve ser modelada e validada para as diversas eco-regiões e objetivos da produção do sistema agrícola (LEMAIRE et al., 2014; SULC; FRANZLUEBBERS, 2014). Nesse contexto, os estoques de C no solo têm sido globalmente utilizados para quantificar os efeitos do manejo (DON; SCHUMACHER; FREIBAUER, 2011) e avaliar a sustentabilidade dos sistemas de produção agrícola (THOMAZINI et al., 2015). A MOS desempenha múltiplas funções, afetando direta e indiretamente diversas propriedades químicas, físicas e biológicas do solo, sendo considerada um dos principais indicadores de qualidade do solo (CHERUBIN et al., 2016).

Em geral, os estoques de C total nos sistemas conservacionistas são alterados somente de médio a longo prazo (LOSS et al., 2016). Desta maneira, para identificar previamente os potenciais efeitos de sistemas de manejo sobre os estoques C do solo, e seus serviços ecossistêmicos associados, têm sido realizadas avaliações nos compartimentos (e.g., C particulado, MO leve) e parâmetros (e.g., $\delta^{13}C$, ^{15}N, índice de manejo de C) da MOS, mais sensíveis as mudanças de manejos (SCHIAVO et al., 2011; ROSSI et al., 2012; DURIGAN et al., 2017). Nos SIPAs os resíduos culturais agrícolas, da pastagem e das árvores apresentam frações de diferente recalcitrância (CONCEIÇÃO et al., 2017) com ciclagem, tempo de residência no solo e funções bioquímicas e biológicas distintas, interagindo de forma diversa com os minerais do solo (CERLI et al., 2012). Além disso, nesses sistemas o animal é um agente catalizador, alterando a qualidade da MOS e a velocidade e taxa de transferência de nutrientes e energia entre os compartimentos (solo-planta-atmosfera) do sistema (CARVALHO et al., 2010b).

O C particulado e a MO leve são frações lábeis da MOS que apresentam boas respostas aos impactos do manejo em curto prazo (e.g. efeitos anuais) (ROSSI et al., 2012; BIELUCZYK et al., 2017b). Os índices de manejo do carbono auxiliam na compreensão do balanço das frações lábeis e recalcitrantes da MOS (NICOLOSO et al., 2008), onde as suas variações resultam em apenas um escore, obtido a partir de uma área de referência (SCHIAVO et al., 2011). A abundância natural de $\delta^{15}N$ e $\delta^{13}C$ auxilia no conhecimento da origem do material orgânico adicionado ao solo, uma vez que existem diferenças entre os sinais isotópicos do $\delta^{13}C$ das plantas que fixam CO_2 através da rubisco (via C_3) em relação ao uso da PEPcase (via C_4) (SMITH; EPSTEIN, 1971). A variação natural do $\delta^{15}N$ quantifica reflexos da fonte de entrada de N no solo, bem como suas posteriores transformações durante os processos de ciclagem, com faixas muito amplas de fracionamento em cada processo (SZPAK, 2014). Dessa forma, a abundância de $\delta^{15}N$ e $\delta^{13}C$ no solo tem sido utilizada para avaliar a origem e os efeitos da mudança do uso da terra e práticas de manejo na ciclagem da MOS (PICCOLO; NEILL; CERRI, 1994; LOSS et al., 2014; 2016; FRANCO et al., 2015).

Desta forma, visando compreender melhor os impactos da adoção de SIPAs foi formulada a seguinte hipótese: o uso de sistemas integrados de produção agropecuária mais intensivos, em condições de clima tropical, proporciona incrementos na quantidade e qualidade da MOS. Para testar esta hipótese foi avaliado um experimento de campo no sudeste do Brasil, com os seguintes objetivos: i) determinar o potencial de acúmulo de C no solo em sistemas integrados de produção agropecuária; ii) avaliar quais são os efeitos do uso de lavoura e do pastejo nas frações e conteúdos totais da MOS nos sistemas integrados de produção agropecuária; e, iii) quantificar a influência do C e N na fertilidade do solo.

2.2 Material e Métodos

2.2.1 Caracterização e histórico das áreas de estudo

Os sistemas integrados de produção avaliados foram instalados em uma área previamente utilizada para pastejo extensivo com bovinos de corte, localizada na Embrapa Pecuária Sudeste (21°57′42″S, 47°50′28″O, 856 m de altitude), estado de São Paulo, região sudeste do Brasil. O relevo varia de plano a suave ondulado e o solo, similar para todas as áreas avaliadas, foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico, com textura franco arenosa (i.e., 32% de argila) nas camadas superficiais (CALDERANO FILHO et al., 1998; PEZZOPANE et al., 2017).

O clima da região é do tipo Cwa - tropical com invernos secos (abril a setembro) e verões quentes e chuvosos (outubro a março) (ALVARES et al., 2013). Durante a série histórica de 1983-2014 (Figura S1a) a precipitação média anual foi de 1545 mm, 79 % desta concentrada de outubro a março. A temperatura média anual foi de 20,6 ºC, com temperaturas médias de 17 ºC nos meses mais frios (junho e julho) e de 23 ºC nos meses mais quentes (janeiro e fevereiro). Entre 2014 e 2016, durante a execução do experimento ocorreram alguns eventos climáticos atípicos principalmente na distribuição da precipitação pluvial ao longo desses anos. Na safra de 2014/2015 (Figura S1b) a precipitação anual foi de 1347 mm sendo o mês de janeiro mais seco que o normal (162 mm). Na safra de 2015/2016 (Figura S1c) os índices de precipitação foram maiores, somando um total de 1939 mm, sendo as diferenças concentradas principalmente no mês de janeiro (539 mm) e chuvas atípicas no inverno de 2016 (144 mm em maio e 115 mm em junho). Maiores detalhes do clima encontram-se na Figura S1.

2.2.2 Delineamento experimental e manejo das áreas

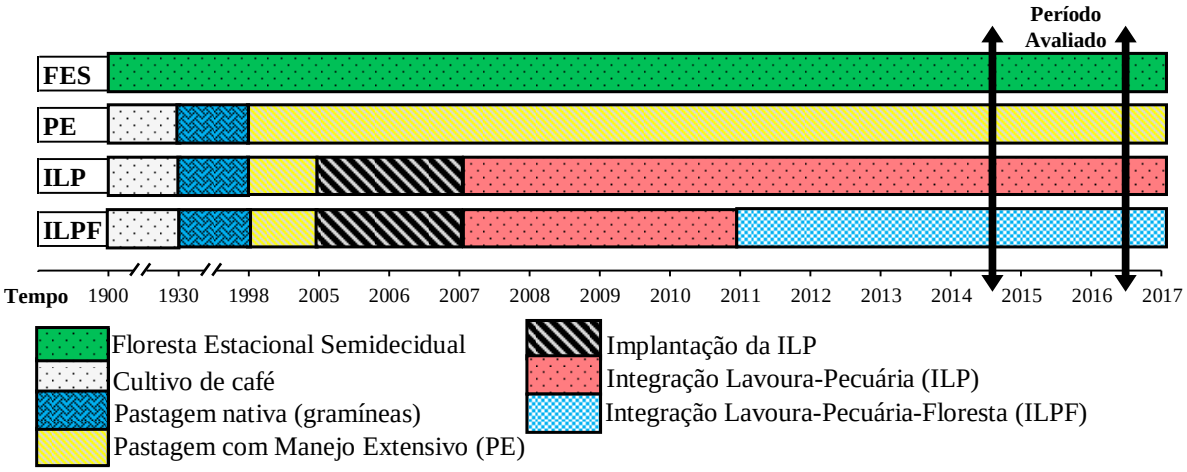
O experimento foi conduzido em faixas com parcelas de 0,5 ha, havendo duas repetições para a cobertura vegetal (PEZZOPANE et al., 2017) nos dois sistemas integrados de produção (ILP e ILPF). Além desses sistemas uma área de pastejo extensivo e outra sob floresta nativa foram utilizadas como referências. Os históricos de uso das áreas de estudo estão sumarizados na Figura 2.1, consistindo em:

(i) floresta estacional semidecidual (FES), bioma Mata Atlântica, sem indícios de perturbação antrópica;
(ii) pastejo extensivo com *Urochloa decumbens* desde 1998, implantado sob área abandonada com gramíneas nativas (e.g. *Paspalum* sp.). Tais gramíneas nativas substituíram o café que foi cultivado anteriormente e pereceu a crise econômica do setor em 1930 (FONSECA, 1985). Atualmente a pastagem dessa área é manejada com baixa lotação animal (1 UA ha^{-1}), e a área não recebe nenhum tipo de fertilização ou correção do solo. Entretanto, em função da adequada lotação animal a área não apresentou sinais visuais de degradação, sendo classificada como pastagem nominal (MAIA et al., 2009).
(iii) ILP, rotacionando dois anos de Capim-piatã (*Urochloa brizantha* (Hochst ex A. Rich.) *Stapf* cv Piata sin.: *Brachiaria brizantha)* e um ano de milho (híbrido DKR 390 PRO 2) implantado em 2007 sob área de pastejo extensivo. Para implantar a ILP houve um período de recuperação da fertilidade do solo e renovação das pastagens entre 2005 e 2007. Nesse local foram cultivados milho (híbrido BRS 2020) e sorgo

(*Sorghum bicolor* L. *Moench*) (híbrido BRS 610). Durante esse período a pastagem de *Urochloa decumbens* foi substituída pela *Urochloa brizantha;* e,

(iv) ILPF, incluindo além da braquiária e do milho, 333 árvores ha^{-1} de eucalipto (*Eucalyptus urograndis* - Clone GG100) dispostas em linhas simples em espaçamento de 15 x 2 m (Figura 2.2) implantado em abril 2011, sob área ocupada com ILP. O eucalipto foi plantado na orientação Leste-Oeste e a rotação de culturas e manejo do pastejo continuou idêntico à ILP. Durante o período experimental as árvores do eucalipto estiveram entre 42 (novembro de 2014) e 61 meses de idade (junho de 2016).

Figura 2.1 - Histórico do uso da terra das áreas de estudo avaliadas

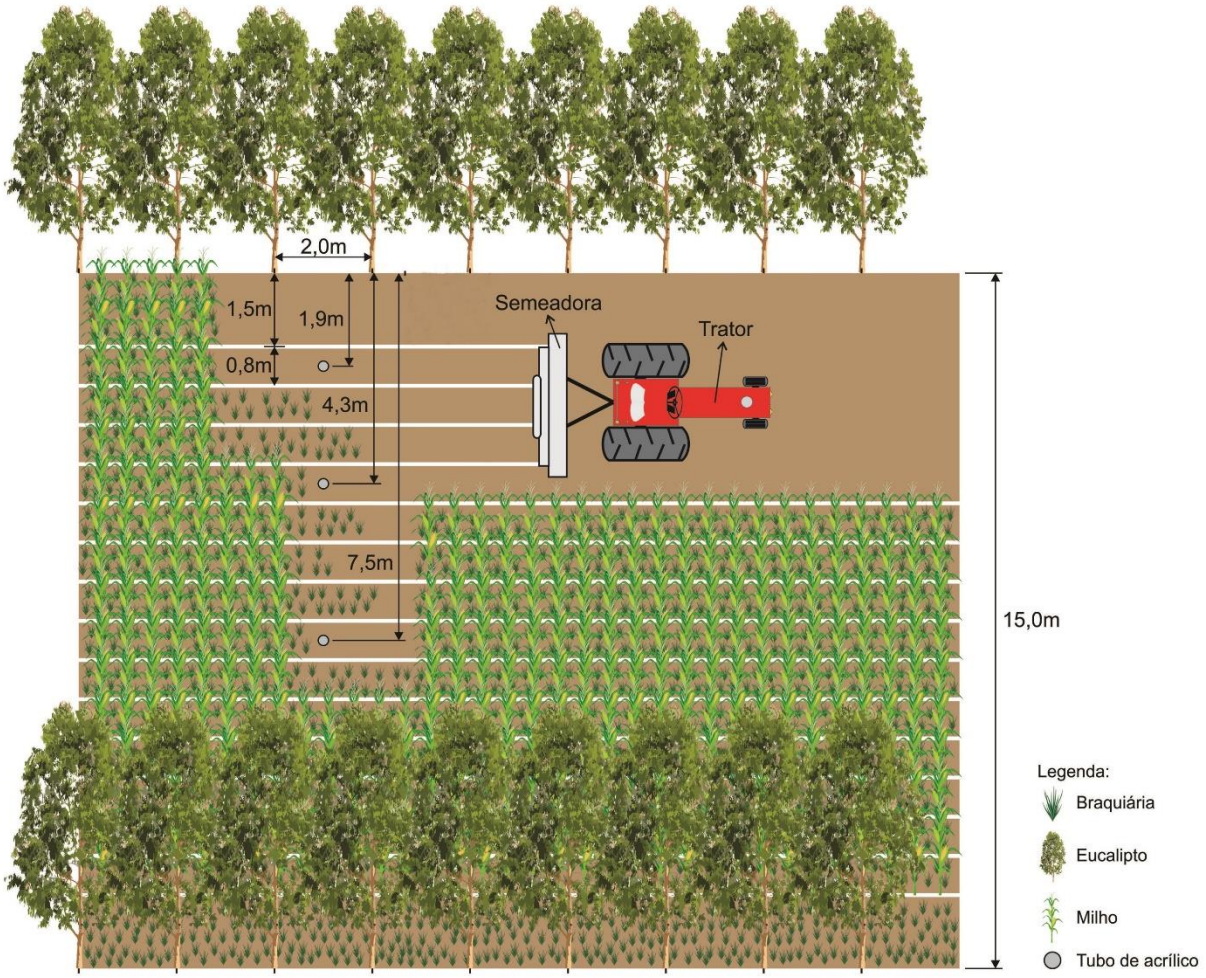


2.2.3 Épocas das amostragens do solo

Com o objetivo de avaliar um ciclo de rotação de culturas na ILP e na ILPF foram realizadas três avaliações nas áreas. A primeira época foi prévia a semeadura do milho (novembro de 2014), denominando-a como pós pastagem (PP-2014) que avaliou reflexos de dois anos de pastejo nesses SIPAs. Em abril de 2015 foi realizada uma segunda avaliação, denominada como pós-lavoura (PL-2015), mensurando os impactos do cultivo da lavoura de milho consorciada com a braquiária. Em junho de 2016 (PP-2016) foi realizada uma terceira amostragem de terra, após cerca um ano de pastejo posterior a ensilagem do milho. Na área de ILPF em outubro de 2014 as árvores de eucalipto apresentaram altura média de 19,0 m e 18,5 cm de diâmetro na altura do peito (DBH), após a ensilagem do milho (abril de 2015) com altura de 21,2 m e 19 cm de DBH, e em abril de 2016 com 27,0 m de altura e 21,3 cm de DBH.

Algumas distâncias na entrelinha foram selecionadas para melhor caracterizar a ILPF (Figura 2.2). A localização dos pontos de amostragem na ILPF foi determinada considerando o manejo realizado na área para o cultivo do milho em SPD, pois foram quatro percursos da semeadora (2,4 m) na entrelinha do eucalipto, havendo um espaço de 1,5 m entre a linha das árvores e a primeira linha do milho. Diante desse arranjo foram amostradas distâncias exatamente ao centro da entrelinha (7,5 m), em local mais próximo da linha do eucalipto (1,9 m) e em uma distância intermediária (4,3 m).

Figura 2.2 - Posições de amostragem na integração lavoura-pecuária-floresta, que seguem a mesma disposição dos tubos de acrílico de minirhizotrons previamente instalados no sistema



Anualmente, foram realizadas amostragens e análises de solo nos SIPAs para guiar o manejo da fertilidade do solo. A dose de corretivo (calcário dolomítico PRNT 70 %) foi calculada visando elevar a saturação por bases para 70 % no cultivo do milho e para 60 % na pastagem. As doses de fertilizantes fosfatados e potássicos visaram elevar a disponibilidade do fósforo (P) disponível para 15 mg dm^3 e saturação por potássio (K) extraível de 3 % na capacidade de troca de cátions (CTC) do solo, respectivamente (OLIVEIRA; PENATI; CORSI, 2008).

Em novembro de 2014 o milho foi semeado nos SIPAs em um espaçamento de 0,8 x 0,2 m, objetivando uma população de 62500 plantas ha^{-1}. Aproximadamente 10 kg^{-1} de sementes ha^{-1} de braquiária piatã foram semeadas simultaneamente com o milho, com um espaçamento de 0,4 m nas entrelinhas. Na semeadura de milho foi realizada uma aplicação localizada na linha de 500 kg ha^{-1} da fórmula 08-28-16 ($N–P_2O_5–K_2O$), e 30 dias após a germinação das sementes aplicados 500 kg ha^{-1} da fórmula 20-05-20 em cobertura.

A dose de nitrogênio (N) utilizada na pastagem dos SIPAs levou em consideração o teor de MOS e a lotação animal pretendida. No entanto, foram utilizados 202 kg ha^{-1} ano^{-1} de N, divididos em cinco fertilizações com doses iguais de ureia (40,4 kg ha^{-1} de N por aplicação). Tais aplicações de N foram realizadas na saída dos animais para período de descanso da pastagem. Nos sistemas integrados a lotação na pastagem dos bovinos de corte na fase de recria é variável, pois foi utilizado o procedimento "*put-and-take*", com ajustes decorrentes da oferta de forragem (MOTT; LUCAS, 1952; AIKEN, 2016). A taxa de lotação nesses sistemas foi de 2 a 3 UA ha^{-1} na estação chuvosa (outubro a março) e 0,8 a 1 UA ha^{-1} na estação seca (abril a setembro). O período de ocupação foi de seis dias de pastejo e o descanso da pastagem de 35 dias em ambas as estações, seca e chuvosa.

2.2.4 Amostragens de solo e parâmetros analisados

Cada amostra composta de solo (n=6), foi formulada a partir da coleta de cinco amostras simples nas camadas de 0,0-0,05, 0,5-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m. A granulometria do solo (argila, silte e areia) e os parâmetros de fertilidade do solo [i.e., potencial de hidrogênio em água (pH_{H_2O}), cálcio (Ca), magnésio (Mg), alumínio (Al), sódio (Na), e potássio (K) trocáveis, acidez potencial do solo (H+Al) e fósforo disponível (P)] foram caracterizados seguindo metodologias descritas por Donagema et al. (2011), no início das avaliações deste estudo (PP-2014), conforme apresentado na Tabela 2.1.

2.2.4.1 Teores elementares e isotópicos e estoques de carbono e nitrogênio no solo

O preparo das subamostras de 5 g de solo consistiu em eliminar material vegetal grosseiro como as raízes, maceramento e passagem por peneira (≤ 149 µm) para a quantificação dos teores de C e N, e os isótopos estáveis ^{15}N e ^{13}C, em um analisador elementar acoplado a um espectrômetro de massa (Carbo Erba, CH-110, Milan, Itália). Os resultados dos isótopos estáveis foram expressos na forma de $\delta^{13}C$ e $\delta^{15}N$ (‰), utilizando o padrão internacional PDB-Vienna como referência para os valores de ^{13}C e a composição do N_2 atmosférico para o $\delta^{15}N$.

Os estoques de C e N foram calculados considerando o teor de C e N, densidade do solo e profundidade da camada estudada. A densidade do solo foi obtida a partir da pesagem de amostras indeformadas de solo contidas em anéis volumétricos de 5 x 5 cm (h x Ø) secas em estufa à 105 ºC por 48 horas (DONAGEMA et al., 2011). A técnica de massas equivalentes de solo foi utilizada para corrigir os estoques de C e N (ELLERT; BETTANY, 1995) em relação à densidade do solo da área com vegetação nativa (FES).

Tabela 2.1 - Caracterização da fertilidade[§], da granulometria[§] e densidade do solo sob áreas com floresta estacional semidecídua (FES), pastagem com manejo extensivo (PE), integração-lavoura-pecuária (ILP) e integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF)

Área	pH	P	Ca	Mg	K	Al	SB	H+Al	CTC_{pH7}	V	Argila	Silte	Areia	Ds
	H_2O	*mg kg^{-1}*	---------- *mmol$_c$ kg^{-1}* ----------							*%*	------- *g kg^{-1}* ----------			*Mg m^{-3}*
							0,0-0,05 m							
FES†	5,1	2,8	51,1	31,6	4,2	0,0	86,8	48,4	135,2	63,9	360	81	559	0,91
PE†	5,5	1,2	17,4	24,0	2,2	0,0	43,7	21,7	65,5	66,8	331	48	621	1,32
ILP†	5,5	2,6	26,1	29,8	2,7	0,0	58,7	18,8	77,5	75,7	313	78	609	1,26
ILPF‡	5,6	3,9	26,0	30,7	3,4	0,0	60,4	17,6	78,0	77,5	322	75	603	1,41
							0,05-0,1 m							
FES	4,6	1,2	23,8	20,0	1,9	0,0	45,7	46,3	92,0	49,9	334	160	506	1,13
PE	5,6	1,1	16,0	20,6	1,3	0,0	37,9	19,3	57,2	66,5	315	79	606	1,51
ILP	5,6	0,9	17,9	24,5	1,5	0,0	44,0	20,8	64,7	68,0	294	99	607	1,49
ILPF	5,5	4,3	17,8	24,9	2,5	0,0	45,4	20,7	66,1	68,7	304	93	603	1,52
							0,1-0,2 m							
FES	4,3	0,8	7,4	15,1	1,2	0,0	23,7	44,4	68,1	35,0	331	155	514	1,23
PE	5,6	0,7	13,6	19,6	0,9	0,0	34,1	18,7	52,8	64,6	325	93	582	1,54
ILP	5,5	0,6	12,2	21,7	0,9	0,0	35,0	19,7	54,6	64,4	337	71	592	1,58
ILPF	5,3	2,0	13,4	21,6	1,6	0,0	36,8	21,3	58,0	63,4	302	105	593	1,58
							0,2-0,4 m							
FES	4,1	0,4	4,2	13,4	0,5	0,0	18,1	38,2	56,4	32,3	385	161	454	1,18
PE	5,3	0,4	6,1	16,9	0,4	0,0	23,4	21,6	45,0	52,1	350	110	540	1,50
ILP	5,1	0,5	6,5	18,2	0,6	0,0	25,2	19,5	44,8	56,5	345	91	564	1,52
ILPF	5,1	0,5	6,8	17,6	0,8	0,0	25,3	22,6	47,8	52,8	323	120	557	1,51

[§] Metodologia da Embrapa (1997); †n=6; ‡n=18; pH_{H_2O} : potencial de hidrogênio em água (H_2O) – acidez ativa; cálcio (Ca), magnésio (Mg) e alumínio (Al); fósforo (P) e potássio (K) disponíveis – Melich-1. H+Al: acidez potencial. SB: Soma de bases. CTC_{pH7}: capacidade potencial de troca de cátions. V: Saturação por bases.

2.2.4.2 Fracionamento granulométrico, matéria orgânica leve e índices de manejo

O fracionamento granulométrico da MOS foi realizado por meio da dispersão de uma subamostra de 10 g de terra fina seca ao ar em solução de hexametafosfato de sódio (5 g L^{-1}), separando por meio de peneiramento o carbono orgânico particulado (COP) (>53 µm) do carbono orgânico associado aos minerais (COAM) (≤53 µm). O material retido na peneira foi colocado em estufa a 60 ºC por 72 horas, macerado (vertido por peneira de 149 µm) e quantificado o COP. O COAM foi obtido por diferença entre C e COP (CAMBARDELLA; ELLIOT, 1992). Em outra subamostra de 50 g de terra, a fração leve da MOS (MOL) foi quantificada por meio de etapas de dispersão do solo em NaOH (0,1 mol L^{-1}), peneiramento (malha de 0,25 mm) forçado por jatos de água, imersão do remanescente em água, separação do material leve flotado, secagem em estufa à 60 ºC por 72 horas e posterior pesagem (ANDERSON; INGRAM, 1989).

Os cálculos para a estimativa dos índices de manejo de carbono (IMC) foram realizados sendo a área de pastagem extensiva utilizada como referência (IMC=100). Tais índices visaram identificar os efeitos dos incrementos nos componentes de diversidade dos sistemas no balanço das frações da MOS. Dessa forma, os sistemas de ILP e ILPF também foram comparados com a referência por meio de índices de estoque e labilidade do C, e a partir desses calculados os IMC (BLAIR et al., 1995). Para os cálculos da labilidade do C o COP foi considerado a fração lábil e o COAM a fração recalcitrante (CONCEIÇÃO et al., 2014).

2.2.4.3 Análise dos dados

Os resultados obtidos para cada camada avaliada e época de avaliação de cada atributo analisado foram submetidos ao teste de normalidade dos erros e homogeneidade das variâncias. Quando necessário, os dados foram transformados na potência ótima de BoxCox. A análise de variância (ANOVA) foi realizada utilizando o procedimento PROC GLM para testar a influência dos sistemas de cultivo (PE, ILP e ILPF) e das distintas épocas avaliadas (PP-2014, PL-2015 e PP-2016) sobre os atributos avaliados no estudo. Quando significativo, as médias foram comparadas entre si pelo teste de Tukey ($p<0,05$). Os sistemas de cultivo (i.e., PE, ILP, ILPF) também foram comparados, cada um separadamente, com a área de referência sob vegetação nativa (FES) pelo teste de Dunnett ($p<0,05$). Os atributos químicos e físicos do solo nos sistemas integrados de produção (PE, ILP e ILPF) foram correlacionados utilizando o procedimento PROC CORR (n=216). Todas essas análises estatísticas foram realizadas com uso do programa Statistical Analysis System – SAS v. 9.4 (SAS Inc., Cary, USA).

As correlações existentes entre propriedades do solo (soma das bases (SB), capacidade efetiva de troca de cátions (CTC_{pH7}), fósforo disponível (P) e densidade do solo (Ds)) com um conjunto de variáveis da MOS foram obtidas por meio de uma análise de redundância canônica (RDA). O conjunto de variáveis da MOS inicialmente utilizado foi: carbono total (C), nitrogênio total (N), estoque de carbono (estC), estoque de nitrogênio (estN), $\delta^{13}C$, $\delta^{15}N$, relação C:N, carbono orgânico particulado (COP), carbono orgânico associado aos minerais (COAM) e matéria orgânica leve em água (MOL). Contudo, por meio da stepwise selection foram selecionadas as variáveis explicativas: N, $\delta^{13}C$, $\delta^{15}N$, COAM e MOL. Os fatores de inflação da variância (BORCARD et al., 2011) foram calculados nas variáveis da RDA utilizando a função *vegan 'vif.cca'* para identificar quais das variáveis selecionadas foram redundantes. Todas as variáveis selecionadas estiveram abaixo do limite recomendado (<10) da inflação da variância. O teste de permutação do modelo da RDA foi realizado utilizando a função *vegan 'permutest'* com 999 permutações. Todos os procedimentos da análise de RDA foram obtidos por meio do programa R versão 3.4.1.

2.3 Resultados

2.3.1. Fontes de entrada de carbono e nitrogênio nos sistemas

As folhas e as raízes de milho e da braquiária apresentaram menores teores de C e maiores teores de N comparadas às folhas de eucalipto, resultando em maior relação C:N do material vegetal proveniente das árvores (Tabela 2.2). Os teores de C e N foram sempre maiores nas folhas quando comparados aos das raízes em todas as espécies vegetais, embora esta diferença foi mais acentuada para o N. Portanto, a relação C:N foi maior nas raízes em comparação às folhas, em cerca de 2,4, 3,2 e 3,2 vezes para o milho, a braquiária e o eucalipto, respectivamente. Os teores de C (416,8±1,8 g kg^{-1}) e N (16,0±0,6 g kg^{-1}) do esterco foram menores em comparação com as folhas da braquiária (i.e., 441,5±4,3 g kg^{-1} de C e 20,2±1,0 g kg^{-1} de N).

Tabela 2.2 - Teores de carbono (C) e nitrogênio (N) totais, relação C/N e abundância de isótopos estáveis de carbono ($\delta^{13}C$) e de nitrogênio ($\delta^{15}N$) das folhas e raízes de milho (*Z. mays*), braquiária (*U. brizantha)* e eucalipto (*E. urograndis*), e da massa seca do esterco bovino em sistemas integrados de produção agropecuária

	$\delta^{15}N$ (‰)	N (g kg^{-1})	$\delta^{13}C$ (‰)	C (g kg^{-1})	C/N
			Z. mays		
Folhas	0,3*±0,5	32,3±0,6	-12,4±0,1	446,1±4,8	13,9±0,3
Raízes	-0,5±0,6	11,1±0,6	-12,0±0,1	371,7±20,6	33,5±0,5
$\bar{x}$	-0,1±0,4	21,7±3,2	-12,2±0,1	408,9±15,1	23,7±3,0
			U. brizantha		
Folhas	0,7±0,4	20,2±1,0	-12,2±0,1	441,5±4,3	22,2±1,0
Raízes	0,5±0,2	3,7±0,2	-13,1±0,3	258,9±15,4	71,3±6,8
$\bar{x}$	0,6±0,2	11,9±2,5	-12,6±0,2	350,2±28,6	46,7±8,1
			E. urograndis		
Folhas§	-0,5±0,2	16,4±0,9	-29,3±0,2	524,0±4,5	32,3±1,9
Raízes	0,0±0,3	4,7±0,6	-28,6±0,2	460,3±4,7	102,7±9,7
$\bar{x}$	-0,3±0,2	10,6±1,8	-28,9±0,1	492,1±10,1	67,5±11,6
			Esterco bovino		
$\bar{x}$	4,3±0,2	16,0±0,6	-13,8±0,1	416,8±1,8	26,2±0,9

*Valores médios (± erro padrão; n=6); §folhas recém depositadas sobre o solo.

A biomassa das gramíneas (milho e braquiária) apresentou o sinal isotópico de $\delta^{13}C$ típico das plantas C_4, variando de -13,1 a -12,0 ‰, enquanto as folhas ($\delta^{13}C$ = -29,3±0,2 ‰) e as raízes ($\delta^{13}C$ = -28,6±0,2 ‰) do eucalipto apresentaram abundâncias típicas de plantas C_3. O esterco dos bovinos (recém depositado sobre o solo) refletiu valores de $\delta^{13}C$ muito similares aos encontrados nas folhas da braquiária, com um sutil empobrecimento desse isótopo. Os teores isotópicos de $\delta^{15}N$ foram bem próximos a zero, apresentando valores negativos para as raízes do milho (-0,5±0,6 ‰) e para as folhas do eucalipto (-0,5±0,6 ‰). Na massa seca do esterco bovino ocorreu enriquecimento do ^{15}N em comparação às folhas da braquiária, havendo fracionamentos no metabolismo ruminal e/ou mistura com outras fontes alimentares dos bovinos.

2.3.2 Teores de C e abundância natural de $\delta^{13}C$ no solo

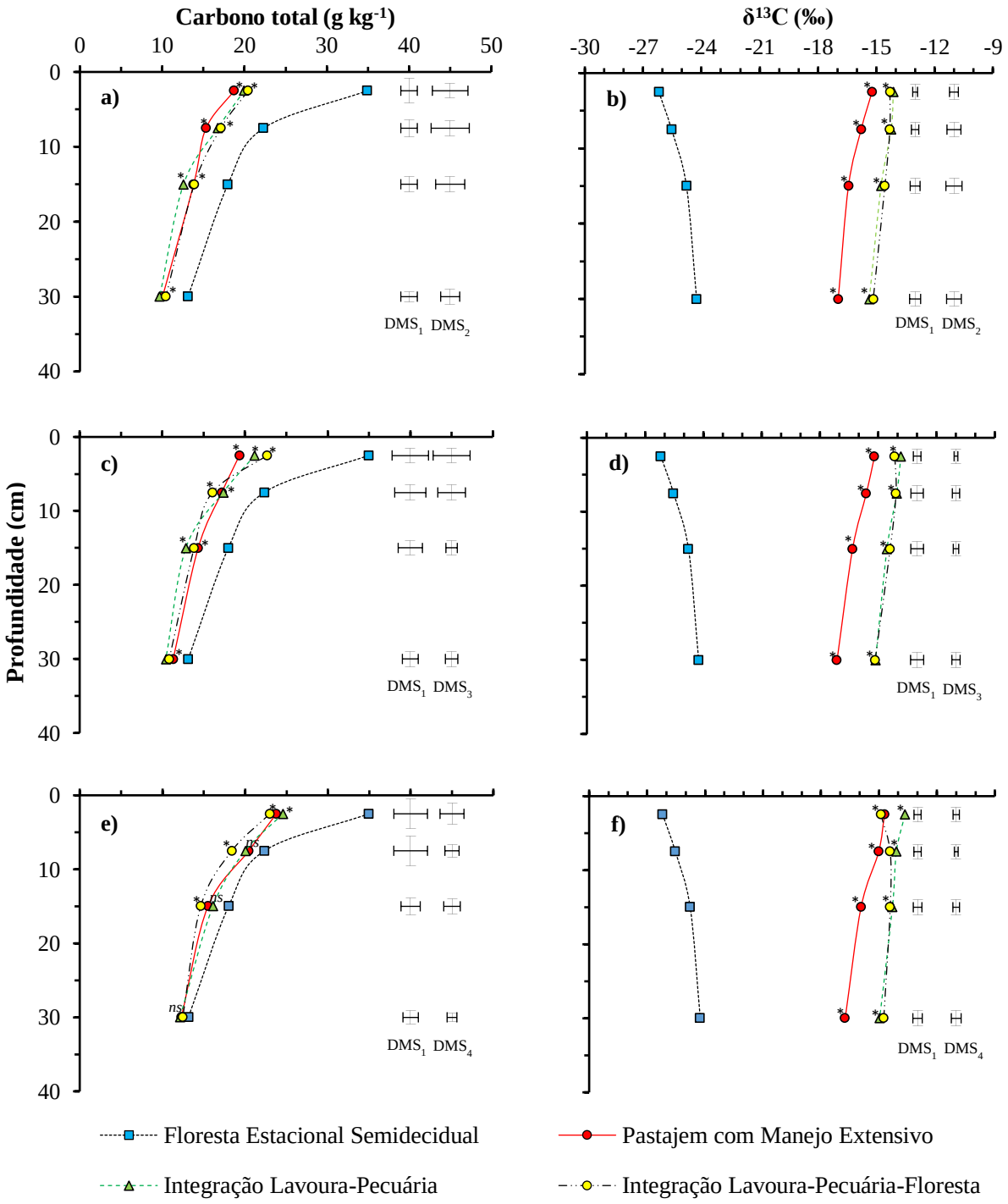
Os teores de C em todo o perfil do solo (0-0,40 m) nos SIPAs foram inferiores aos observados na área de floresta estacional semidecidual (FES) nas avaliações pós pastejo (2014) e pós-lavoura (2015) (Figura 2.3a, c). No ano de 2016 as camadas de 0,05-0,10 m e 0,10-0,20 m da pastagem extensiva e ILP apresentaram teores de C iguais à floresta, também não houve diferenças entre a área de floresta em comparação às áreas cultivadas na camada de 0,02-0,40 m (Figura 2.3e). Essas mudanças estão ocorrendo em função dos incrementos de C observado no decorrer do tempo nos sistemas cultivados. Na área de pastagem extensiva os

acréscimos nos teores de C e N ao longo dos cultivos se concentraram nas camadas de 0-0,05 e 0,05-0,10 m enquanto nos sistemas integrados, além da camada superficial (0-0,05 m), camadas mais profundas (0,10-0,20 e 0,20-0,40 m) apresentaram os maiores teores de C no solo na época pós-pastejo em 2016. Entretanto, em todas as épocas avaliadas, quando contrastadas as áreas de cultivo entre si, os teores de C foram semelhantes em todas as camadas do solo.

O sinal isotópico do $\delta^{13}C$ da área de floresta variou de -26,19 a -24,25 ‰, característico de plantas C_3, enquanto nas áreas de cultivo variou de -16,96 a -13,65 ‰, característico das gramíneas cultivadas (plantas C_4) com alguma mistura do C remanescente da floresta, embora na ILPF também esteja sendo cultivado o eucalipto (C_3) (Figura 2.3b, d, f). Entre as áreas de cultivo a pastagem extensiva apresentou empobrecimento do $\delta^{13}C$ quando comparada as áreas de SIPAs em todas as profundidades e épocas avaliadas.

Ao longo dos cultivos estão ocorrendo incrementos na abundância de $\delta^{13}C$ nas áreas em que não há a presença do eucalipto (Figuras 2.3b, d, f). Na camada de 0-0,05 m da ILP o $\delta^{13}C$ foi aumentado após a colheita do milho (Figura 2.3d). Em 2016, após período de pastejo, ocorreram incrementos de $\delta^{13}C$ na pastagem extensiva (0-0,05 m e 0,05-0,10 m) e na ILP (0-0,05 m e 0,10-0,20 m) (Figura 2.3f). A área de ILPF favorece incrementos de C proveniente da deposição de serapilheira e raízes do eucalipto, visto que, principalmente para a época pós-pastejo (2016) os valores de $\delta^{13}C$ reduziram, ou seja, ocorreram incrementos relativos na MOS proveniente de plantas C_3.

Figura 2.3 - Carbono total do solo (a, c, e) e abundância natural de δ ^{13}C (b, d, f) em áreas sob floresta secundária semidecidual (FES), pastagem de manejo extensivo (PE), integração lavoura-pecuária (ILP) e integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) nas épocas pós-pastejo-2014 (a, b), pós-lavoura-2015 (c, d) e pós-pastagem-2016 (e, f)



PE e ILP (n=6); FES e ILPF (n=18). *,^{ns} Significativo e não significativo, respectivamente, pelo teste de Dunnett ($p \leq 0,05$) comparando os tratamentos PE, ILP e ILPF com a área de referência FES. DMS_1: mínima diferença significativa entre PE, ILP e ILPF. DMS_2: mínima diferença significativa comparando as épocas avaliadas para a PE. DMS_3: mínima diferença significativa comparando as épocas avaliadas para a ILP. DMS_4: mínima diferença significativa comparando as épocas avaliadas para a ILPF.

2.3.3 Teores de N e abundância natural de $\delta^{15}N$ no solo

Os teores de N total dos sistemas de cultivo foram menores aos da área de floresta até 0,40 m de profundidade em todas as avaliações realizadas (Figura 2.4a, c, e). A área de floresta também apresentou menor relação C:N quando comparada com as áreas cultivadas, em que entre estas a relação foi predominantemente igual em todas camadas de solo avaliadas (Figura S2). De maneira geral, ocorreram incrementos de N no solo ao longo dos cultivos em todos os sistemas integrados de produção agropecuária. Tais incrementos ocorreram na avaliação pós-pastejo em 2016 na área de pastagem extensiva (0-0,05, 0,05-0,10 e 0,20-0,40 m), na área de ILP (0-0,05, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m) e na área de ILPF (0,05-0,10 e 0,20-0,40 m).

O sinal isotópico do $\delta^{15}N$ no solo de floresta variou de 8,03 a 9,59 ‰, com maiores valores nas camadas de 0,20-0,40 e 0,10-0,20 m (Figura 2.4b, d, f). Já nas áreas cultivadas esses valores variaram de 3,51 a 9,88 ‰ incrementando acentuadamente a abundância de $\delta^{15}N$ em camadas abaixo de 0,10 m de profundidade (0,10-0,20 e 0,20-0,40 m). Os valores de $\delta^{15}N$ foram sempre maiores na floresta, exceto na camada de 0,20-0,40 m onde não houve diferenças significativas entre ILP e FES nos anos de 2014 (Figura 2.4d) e 2015 (Figura 2.4f).

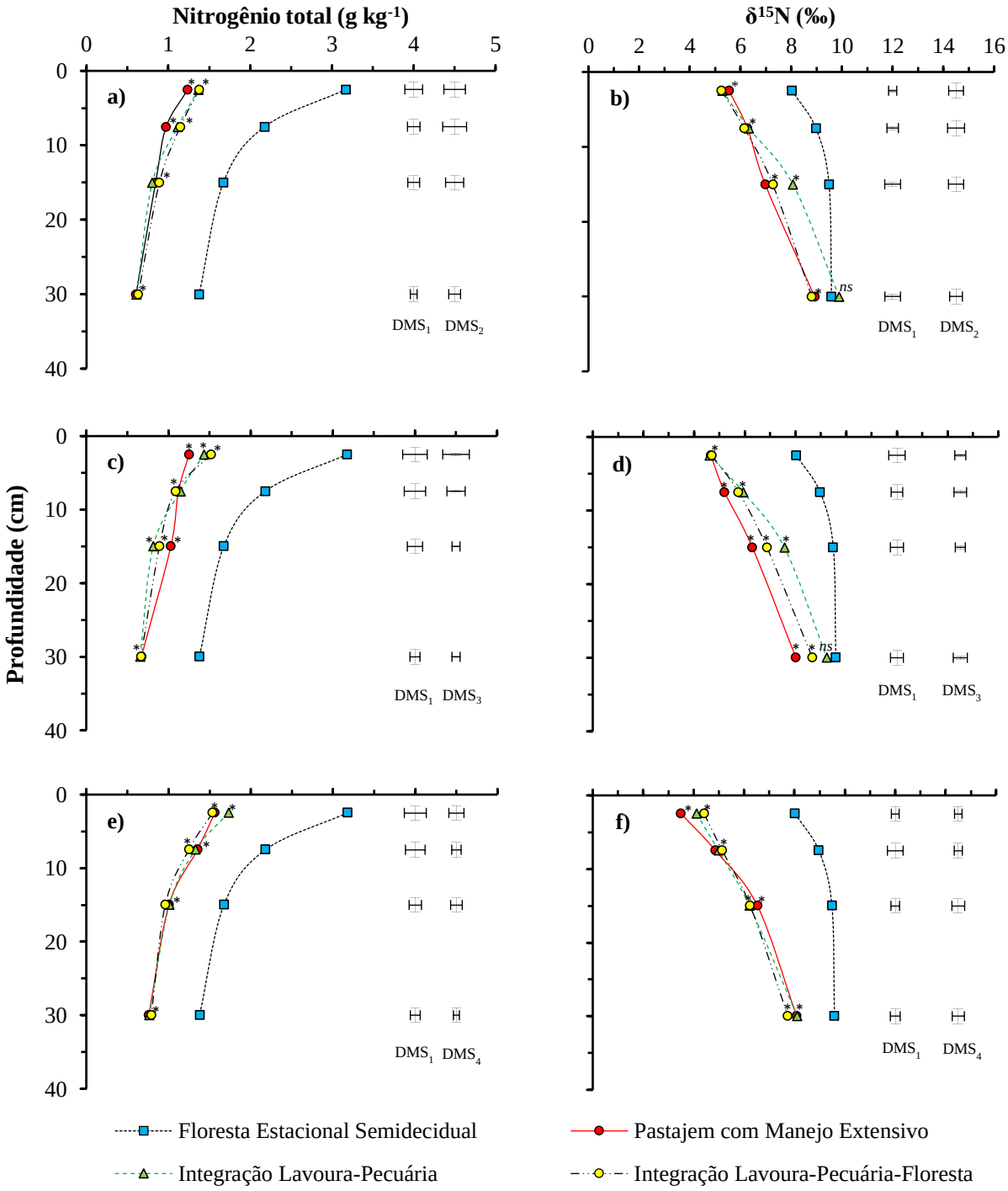
Nas épocas de avaliação pós-pastejo em 2014 (Figura 2.4b) e pós-lavoura em 2015 (Figura 2.4d) o solo das áreas de cultivo apresentou similar abundância de $\delta^{15}N$ na camada de 0-0,05 m, enquanto em 2016 na área de pastagem extensiva foram verificados menores valores. Nas camadas mais profundas (0,10-0,20 e 0,20-0,40 m) para as épocas pós-pastejo (Figura 2.4b) e pós-lavoura (Figura 2.4d) a área de pastagem extensiva apresentou os menores valores de $\delta^{15}N$, enquanto os maiores foram verificados para a área de ILP. Na avaliação pós-pastejo em 2016 não foram verificadas diferenças entre as áreas cultivadas em camadas abaixo de 0,05 m (Figura 2.4f).

Ao longo dos cultivos, os valores de $\delta^{15}N$ reduziram. Da época de pós-pastejo (2014) para a pós-lavoura (2015) foram verificadas reduções no $\delta^{15}N$ nas áreas de pastagem extensiva (em todas as camadas), ILP (0-0,05, 0,1-0,2 e 0,2-0,4 m) e em ILPF (0-0,05, 0,05-0,1 m). De maneira geral, os menores valores de $\delta^{15}N$ foram encontrados na avaliação pós-pastejo em 2016.

2.3.4 Estoques de carbono e nitrogênio

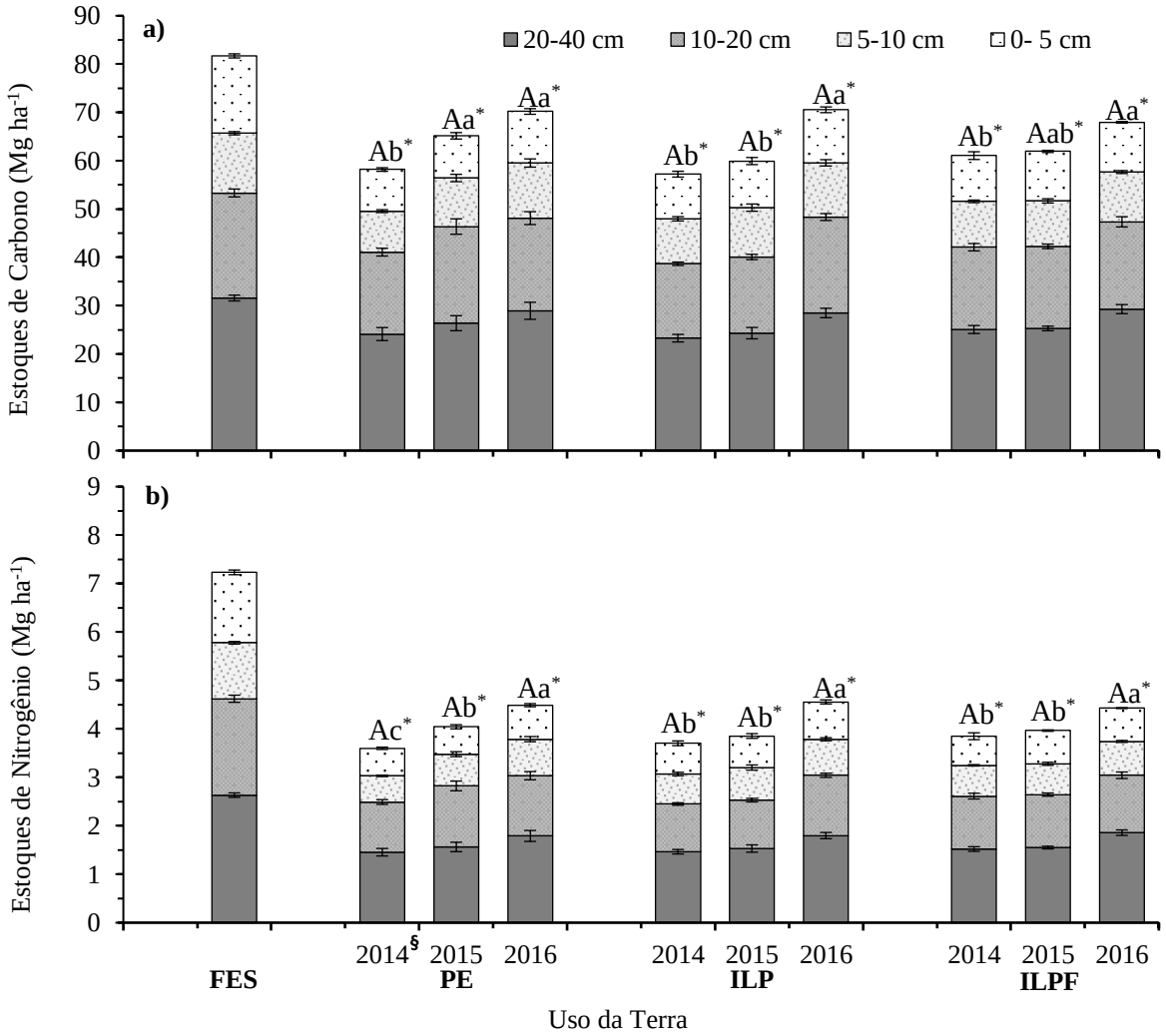
A conversão da floresta em pastagem extensiva reduziu em 14 % e 38 % os estoques de C e N na camada 0-40 cm ao longo do tempo. Por outro lado, a introdução dos SIPAs, ILP e ILPF, não afetou os estoques de C (Figura 2.5a) e de N do solo (Figura 2.5b) até 0,4 m, comparado à área de pastagem extensiva. Em todas as áreas cultivadas houve incrementos nos estoques de C e N no perfil do solo em função do tempo de manejo (de 2014 a 2016). Em 2016 e em relação a área de pastagem extensiva a área de integração lavoura-pecuária promoveu acúmulo de C e N de 0,34 e 0,01 Mg ha^{-1}, respectivamente. Já a integração lavoura-pecuária-floresta reduziu esse potencial de acúmulo em média de 0,52 Mg ha^{-1} ano^{-1} e 0,03 Mg ha^{-1} ano^{-1} para o C e o N, respectivamente.

Figura 2.4 - Nitrogênio total do solo (a, c, e) e abundância natural de δ ^{15}N (b, d, f) em áreas sob floresta secundária semidecidual (FES), pastagem de manejo extensivo (PE), integração lavoura-pecuária (ILP) e integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF)



PE e ILP (n=6); FES e ILPF (n=18). *,^{ns} Significativo e não significativo, respectivamente, pelo teste de Dunnett ($p \leq 0,05$) comparando os tratamentos PE, ILP e ILPF com a área de referência FES. DMS_1: mínima diferença significativa entre PE, ILP e ILPF. DMS_2: mínima diferença significativa comparando as épocas avaliadas para a PE. DMS_3: mínima diferença significativa comparando as épocas avaliadas para a ILP. DMS_4: mínima diferença significativa comparando as épocas avaliadas para a ILPF.

Figura 2.5 - Estoques de carbono (a) e nitrogênio (b) no solo em áreas sob floresta estacional semidecidual (FES), pastagem com manejo extensivo (PE), integração lavoura-pecuária (ILP) e integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF)

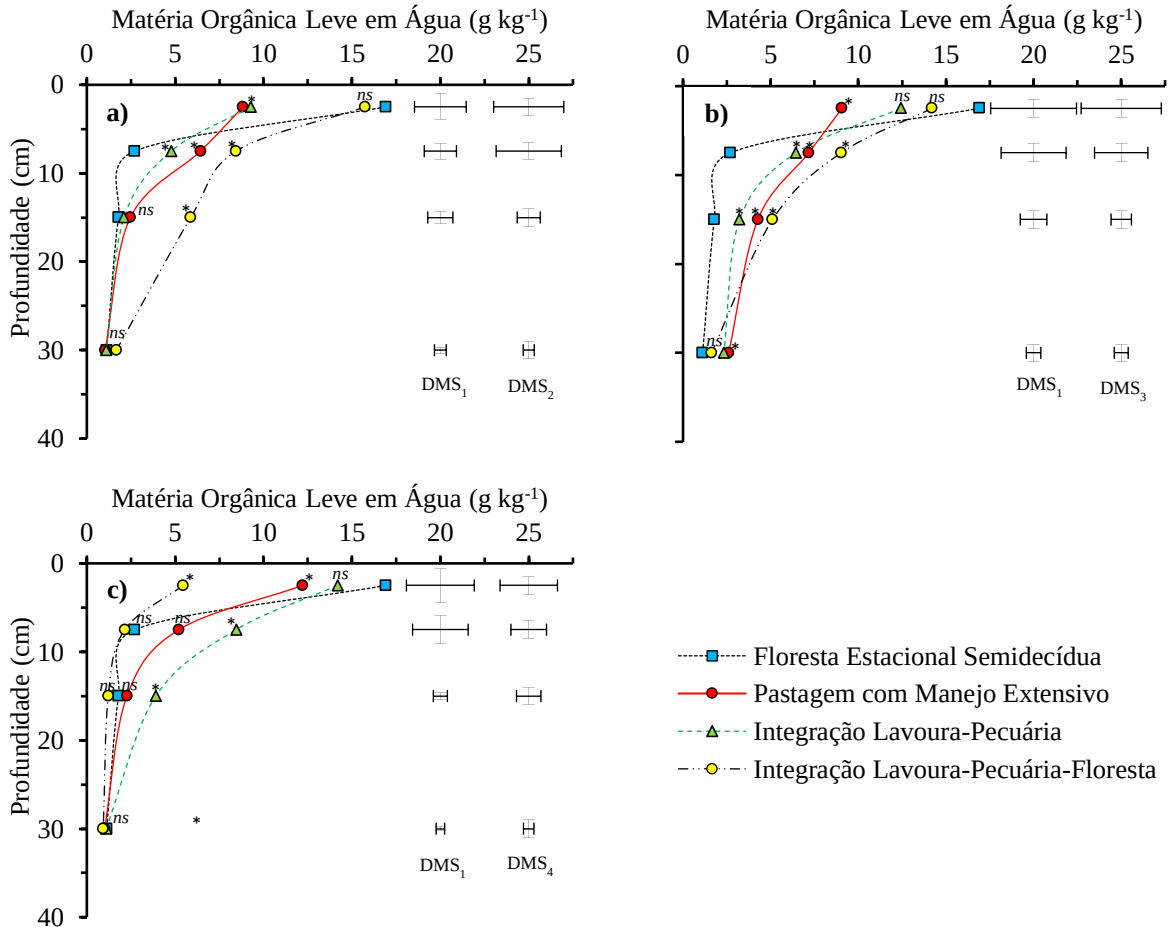


§Coletas sucessivas de acordo com o manejo na ILP e ILPF: em 2014 após dois anos de pastejo, em 2015 após cultivo do milho e em 2016 após um ano de pastejo. PE e ILP (n=6); ILPF e FES (n=18). Letras maiúsculas comparam tratamentos e letras minúsculas comparam épocas de avaliação pelo teste t de Tukey $p \leq 0,05$. *,ns Significativo e não significativo, respectivamente, pelo teste de Dunnett $p \leq 0,05$ comparando os tratamentos PE, ILP e ILPF com a área de referência FES.

2.3.5 Matéria orgânica leve em água

Independente da época de avaliação, os maiores teores de MOL e contrastes entre os sistemas de uso da terra foram encontrados até 0,20 m de profundidade (0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m) (Figura 2.6). Em geral, a área de floresta apresentou os maiores valores de MOL, especialmente na camada superficial, atingindo 16,90 g kg^{-1}; entretanto, nessa área há uma abrupta redução em profundidade, enquanto que nos sistemas de cultivo esta redução é mais gradual. Em função desse padrão, foram verificados maiores teores de MOL em algumas ocasiões nos sistemas de cultivo quando comparados à floresta, como na ILPF (2014 e 2015) e na ILP (2015 e 2016) nas camadas de 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m.

Figura 2.6 - Matéria orgânica leve em água (g kg^{-1}) sob áreas com floresta estacional semidecidual (FES), pastagem com manejo extensivo (PE), integração lavoura-pecuária (ILP) e integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) em amostragens sucessivas pós-pastejo em 2014 (a), pós-lavoura em 2015 (b) e pós-pastejo em 2016 (c)



PE e ILP (n=6); FES e ILPF (n=18). *,^{ns} Significativo e não significativo, respectivamente, pelo teste de Dunnett ($p \leq 0,05$) comparando os tratamentos PE, ILP e ILPF com a área de referência FES. DMS_1: mínima diferença significativa entre PE, ILP e ILPF. DMS_2: mínima diferença significativa comparando as épocas avaliadas para a PE. DMS_3: mínima diferença significativa comparando as épocas avaliadas para a ILP. DMS_4: mínima diferença significativa comparando as épocas avaliadas para a ILPF.

O manejo em cada época afetou os teores de MOL no solo dentre os sistemas de cultivo, sendo que no pós-pastejo (2014), pós-lavoura (2015) e pós-pastejo (2016) os sistemas que se destacaram foram, ILPF (Figura 2.6a), ILP e ILPF (Figura 2.6b), e ILP (Figura 2.6c), respectivamente. Ao ser considerada toda a camada avaliada (0-0,40 m) a área de ILP proporcionou incrementos de 53% nos teores de MOL no solo em 2016 (4,3 g kg^{-1}) em relação a 2014 (2,8 g kg^{-1}). Nesse mesmo intervalo a ILPF, em um padrão inverso,

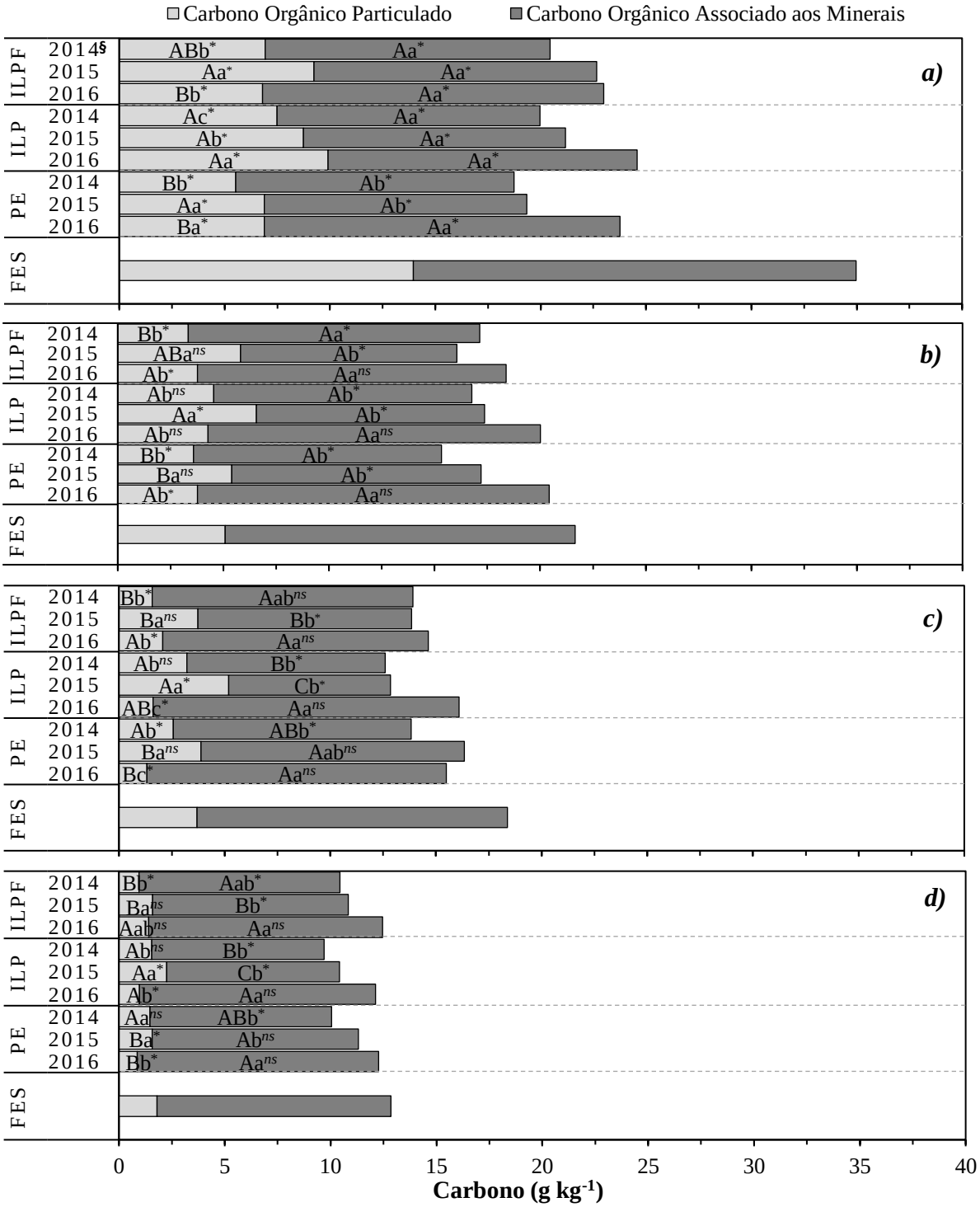
reduziu em 68 % os teores de MOL passando de 5,3 g kg^{-1} (2014) para 1,7 g kg^{-1} (2016). Devido a esta redução após os cultivos, provavelmente consequente às limitações impostas pelo eucalipto, em 2016 a ILPF apresentou os menores teores de MOL no solo dentre os sistemas avaliados.

2.3.6 Frações granulométricas da matéria orgânica do solo

As áreas de cultivo, quando comparadas à floresta, apresentaram menores teores de C orgânico associado aos minerais (COAM) e C orgânico particulado (COP) na camada superficial, em todas as avaliações (Figura 2.7a). Os teores de COP e COAM decresceram em profundidade (Figura 2.7), e nas camadas mais profundas (abaixo de 0,05 m) foram encontradas algumas similaridades para tais frações entre as áreas cultivadas e a floresta. Foi possível verificar que na amostragem pós-lavoura, principalmente na área de ILP, a fração particulada foi aumentada em cerca de 20 %. Em 2015 a área de ILP apresentou teores de COP superiores aos da FES nas camadas abaixo de 0,05 m de profundidade. Nessa mesma época e camadas de solo os teores de COP da pastagem extensiva e da ILPF foram semelhantes aos da floresta. Já em 2016, nessas mesmas camadas, os teores de COP tenderam a reduzir e as áreas de cultivo adicionaram o COAM, assemelhando-se em teores à floresta. Tal padrão sugere aporte de MOS em 2015 e posterior estabilização em frações mais recalcitrantes até a época pós-pastejo de 2016.

De forma semelhante ao padrão da MOL na camada de 0-0,05 cm o COP foi mais elevado nas áreas de cultivo na pós-lavoura em 2015, havendo mais incrementos até 2016 na ILP (Figura 2.7a). Entretanto na ILPF foram verificadas reduções nos teores de COP em 2016 (pós-pastagem) em relação à 2015 (pós-lavoura). De forma geral, no sistema ILP foram observados os maiores teores de COP na camada de 0-0,05 m ao longo dos três anos de avaliações.

Figura 2.7 - Fracionamento granulométrico da matéria orgânica do solo em áreas sob floresta estacional semidecidual (FES), pastagem de manejo extensivo (PE), integração lavoura-pecuária (ILP) e integração lavoura-pecuária-floresta ILPF nas camadas de 0-0,05 m (a), 0,05-0,10 m (b), 0,10-0,20 m (c) e 0,20-0,40 m (d)

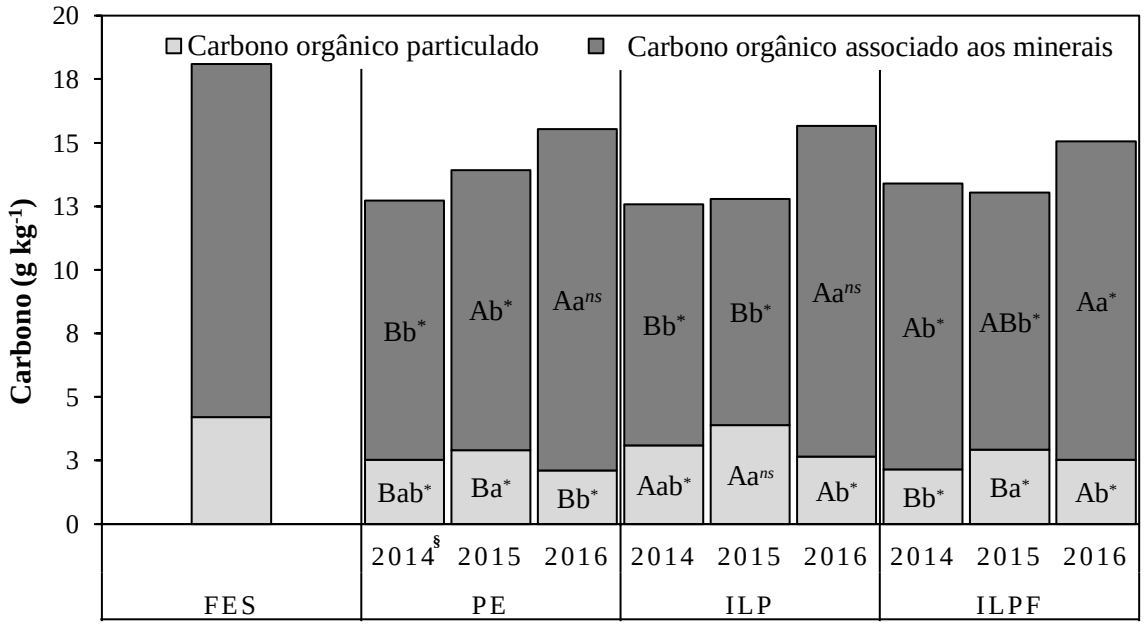


§Coletas sucessivas de acordo com o manejo na ILP e ILPF: em 2014 após dois anos de pastejo, em 2015 após cultivo do milho e em 2016 após um ano de pastejo. PE e ILP (n=6); FES e ILPF (n=18). Letras maiúsculas comparam tratamentos e letras minúsculas comparam épocas de avaliação pelo teste t de Tukey p≤0,05. *,ns Significativo e não significativo, respectivamente, pelo teste de Dunnett p≤0,05 comparando os tratamentos PE, ILP e ILPF com a área de referência FES.

Nas camadas de 0-0,05 e 0,05-0,10 m o COAM não se diferiu entre áreas de cultivo em todas épocas avaliadas. Nas camadas mais profundas a ILPF iniciou com maiores teores na avalição de 2014 e em 2016 as áreas cultivadas se equipararam. Na camada de 0,20-0,40 m os teores de COAM foram predominantemente menores na ILP em 2014 e 2015, não havendo diferenças entre áreas na última época avaliada (pós-pastejo em 2016).

Os teores acumulados das frações da matéria orgânica (COP e COAM) no perfil do solo indicam que houve diferenças ao longo do tempo devido ao uso dos sistemas integrados de produção agropecuária (Figura 2.8). O balanço das frações COP/COAM foi alterado ao longo das épocas avaliadas havendo incrementos de COP na época pós-lavoura em 2015 e de COAM na época pós-pastejo em 2016. Na última avaliação (pós-pastejo em 2016) a ILP e a pastagem extensiva apresentaram valores semelhantes de COAM com os teores observados na floresta.

Figura 2.8 - Fracionamento granulométrico da matéria orgânica do solo em áreas sob floresta estacional semidecidual (FES), pastagem de manejo extensivo (PE), integração lavoura-pecuária (ILP) e integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) na camada de solo de 0-0,4 m de profundidade



§ Coletas sucessivas de acordo com o manejo na ILP e ILPF: em 2014 após dois anos de pastejo, em 2015 após cultivo do milho e em 2016 após um ano de pastejo. PE e ILP (n=6); FES e ILPF (n=18) Letras maiúsculas comparam tratamentos e letras minúsculas comparam épocas de avaliação pelo teste t de Tukey $p \leq 0,05$. *,^{ns} Significativo e não significativo, respectivamente, pelo teste de Dunnett $p \leq 0,05$ comparando os tratamentos PE, ILP e ILPF com a área de referência (FES).

As áreas de ILP e ILPF nem 2016 apresentaram melhor balanço entre COP/COAM pois os teores de COP dessas áreas foram maiores e os de COAM iguais quando comparados à pastagem extensiva.

2.3.7 Índices de manejo da matéria orgânica do solo

Os índices de estoque de C da ILP foram próximos de 1 na última avaliação realizada (pós-pastejo em 2016) (Tabela 2.3), ou seja, assemelharam-se bastante a área de pastagem extensiva (utilizada como referência). Entretanto, na camada de 0-0,20 m da área de ILPF ocorreu uma redução de 21% no índice de estoque de C entre 2014 e 2016, sendo nessa última avaliação encontrados índices menores em comparação a pastagem extensiva. As áreas com ILP e ILPF diminuíram seus índices na época pós-lavoura em 2015, resultado do incremento de MO particulada e reduções da quantidade de C de frações mais recalcitrantes, tais como o COAM (Figura 2.8).

Os índices de manejo do C foram sempre maiores na área de ILP até a colheita da lavoura (2015). Na avaliação pós-pastejo (2016) houve incrementos nos índices de manejo do C tanto na área de ILP como na ILPF (Tabela 2.3), resultado da redução nos teores de COP na pastagem extensiva (Figuras 2.7 e 2.8).

Tabela 2.3 - Índices de estoque de carbono, de labilidade do carbono e de manejo do carbono do solo sob integração lavoura-pecuária (ILP) e integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) utilizando a pastagem com manejo extensivo (PE) como área de referência

Épocas Avaliadas	0-20 cm			20-40 cm		
	PE	ILP	ILPF	PE	ILP	ILPF
			Índices de estoque de carbono			
Pós-pastejo-2014	1,00	1,01±0,04	1,05±0,05	1,00	0,95±0,03	1,04±0,04
Pós-lavoura-2015	1,00	0,91±0,06	0,95±0,03	1,00	0,94±0,05	0,97±0,01
Pós-pastejo-2016	1,00	1,03±0,05	0,94±0,04	1,00	1,01±0,03	1,01±0,04
			Índices de labilidade do carbono			
Pós-pastejo-2014	1,00	1,50±0,18	0,82±0,05	1,00	1,06±0,09	0,53±0,01
Pós-lavoura-2015	1,00	1,75±0,13	1,07±0,04	1,00	1,71±0,14	1,02±0,04
Pós-pastejo-2016	1,00	1,34±0,17	1,38±0,10	1,00	1,32±0,28	1,57±0,20
			Índices de manejo do carbono			
Pós-pastejo-2014	100	149±17	86±5	100	100±6	54±2
Pós-lavoura-2015	100	151±5	98±4	100	158±7	99±4
Pós-pastejo-2016	100	138±17	129±10	100	130±26	157±18

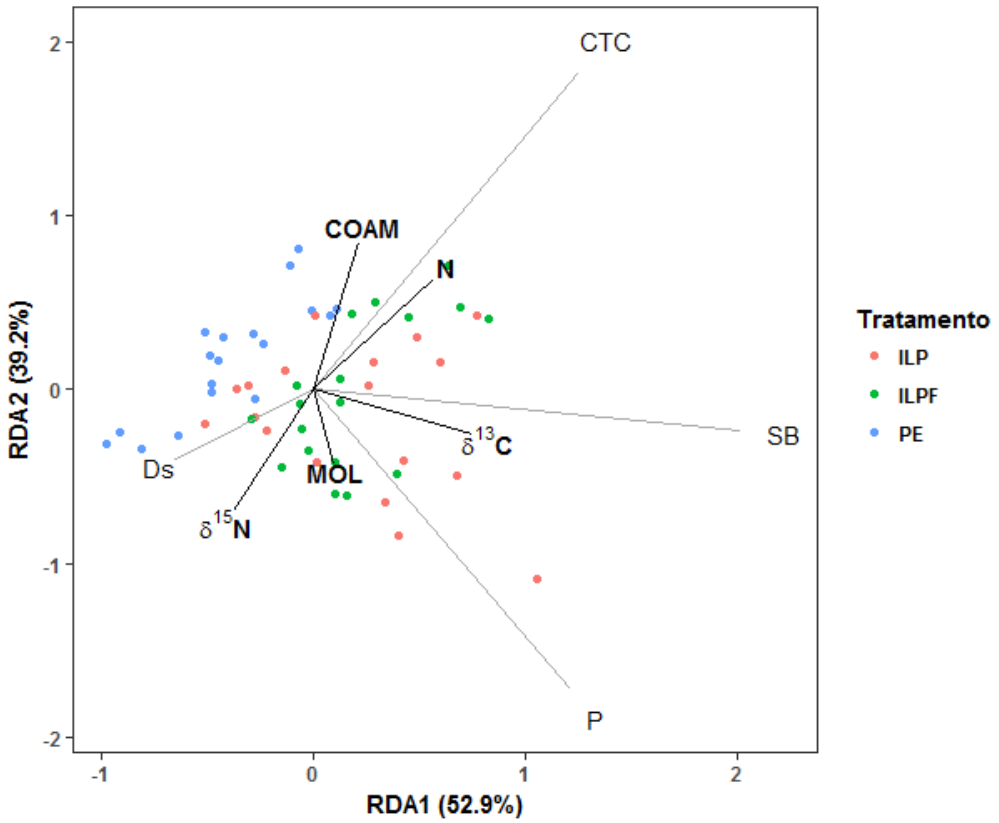
Pós-pastejo-2014: avaliação após dois anos de pastejo com bovinos de corte novembro de 2014 na ILP e ILPF. **Pós-lavoura-2015:** avaliação após cultivo do milho, em abril de 2015 na ILP e ILPF. **Pós-pastejo-2016:** avaliação sucessiva após um ano de pastejo com bovinos de corte. PE e ILP (n=6) e ILPF (n=18).

2.3.8 Correlações entre indicadores de qualidade do solo

Os efeitos dos teores das diferentes frações da MOS explicaram 51,21 % da variação da fertilidade e densidade do solo (Figura 2.9). Os dois primeiros componentes da análise de redundância explicaram 92,2% da variância da abundância total dos dados. O primeiro componente (RDA1 = 52,9 %) possibilitou separar sutilmente as amostras provenientes da pastagem extensiva daquelas provenientes dos sistemas integrados (ILP e ILPF).

Os parâmetros que melhor se correlacionaram positivamente com este componente foram a soma das bases (SB), a capacidade de troca de cátions (CTC $_{pH7}$) e os teores de fósforo (P). Dentre os parâmetros da MOS, destacaram-se o $\delta^{13}C$ e o N. Por outro lado, o segundo componente (RDA2) apesar de explicar 39,2% da variação dos dados não permitiu separar as amostras dos sistemas estudados. As variáveis melhor correlacionadas com este componente foram a CTC $_{pH7}$ e COAM, positivamente, e P e $\delta^{15}N$ negativamente. Todas as variáveis analisadas se correlacionaram entre si ($p<0,001$) (Tabela S1).

Figura 2.9 - Diagrama de ordenação da análise de redundância (RDA) baseada nos efeitos dos conteúdos das diferentes frações da matéria orgânica do solo na densidade do solo (Ds), capacidade efetiva de troca de cátions (CTC), soma das bases (SB) e fósforo disponível (P) no solo em diversos usos da terra de pastagem e sistemas integrados (N=54). A análise exibe 47,13 % da variância da abundância e 92,22 % da variância de abundância total. Os autovalores dos quatro primeiros eixos são 0,2706, 0,2707, 0,03521 e 0,00554, sendo a soma de todos os eixos canônicos igual a 51,21 %



Nota: Foi avaliada a camada de 0-0,4 m (n=54) em todas as avaliações nos anos de 2014, 2015 e 2016. **Legenda dos tratamentos: ILP:** integração lavoura-pecuária**; ILPF:** integração lavoura-pecuária-floresta; **PE:** pastagem com manejo extensivo; **Legenda dos atributos: N:** nitrogênio; **$\delta^{15}N$:** abundância natural de ^{15}N; **$\delta^{13}C$:** abundância natural de ^{13}C; **COAM:** carbono orgânico associado aos minerais; **MOL:** matéria orgânica leve em água.

A área de pastagem extensiva se separou dos sistemas de ILP e ILPF, caracterizando-se por apresentar menor fertilidade do solo (CTC_{pH7}, SB e P) e também menores valores dos atributos da MOS como o N, $\delta^{13}C$, $\delta^{15}N$ e a MOL (Figura 2.9). Os teores de N, C, COP e MOL e estoques de C e N apresentaram correlações positivas (r>0,70) com a soma das bases (SB) e a capacidade de troca de cátions (CTC) (Tabela S1). Já os valores da relação C/N e a abundância natural de $\delta^{15}N$ se correlacionaram negativamente (r≤-0,75) com a CTC e a SB.

Entre os atributos da MOS também foram encontrados altos coeficientes de correlação. A abundância natural de $\delta^{15}N$ se correlacionou negativamente (r≤ -0,73) principalmente com os teores de N, C, est-C, est-N e o COAM. Similarmente os valores da relação C/N tiveram correlações negativas com o C e N (r≤-0,68). As maiores correlações entre os teores disponíveis de fósforo (P) e os atributos da MOS foram com as frações lábeis da MOS, ou seja, o COP (r=0,65) e a MOL (r=0,61). A SB também esteve associada a MOS principalmente correlacionada com o $\delta^{13}C$ (Figura 2.9).

2.4 Discussão

2.4.1 Adoção de sistema integrados e o acúmulo de C e N no solo

A mudança de uso da terra da floresta para uso agrícola, independente do sistema ou manejo adotado, ocorrida a mais de 100 anos, reduziu significativamente o C (Figura 2.3) e N (Figura 2.4) e seus estoques no solo (Figura 2.5a, b). Estes resultados devem ser decorrentes dos efeitos na conversão da floresta para uso agrícola (FEARNSIDE; BARBOSA, 1998), ao revolvimento do solo (SIX et al., 2002a) e a ausência de adubações ocorridas antes da implantação do experimento (CHERUBIN et al., 2016). O preparo do solo rompe os agregados do solo, expondo a MOS anteriormente protegida química e fisicamente no interior destes ao ataque microbiano e acelerando a decomposição e a perda de C, consequentemente degradando os solos cultivados (SIX et al., 2002b). Assim, reduções de C do solo, principalmente nas camadas mais superficiais devido a conversão de florestas nativas para sistemas agrícolas têm sido amplamente reportada na literatura (GUO; GIFFORD, 2002; DON et al., 2011). Alta associação entre C e N do solo (Tabela S1) faz com que reduções de C normalmente sejam acompanhadas por reduções na disponibilidade de N no solo (PICCOLO; NEILL; CERRI, 1994; COSTA JUNIOR et al., 2011).

O longo período do uso das áreas para pastagens (desde 1930) é um fator que explica os elevados valores do $\delta^{13}C$ (Figura 2.3), que indicam que nessas áreas é reduzido o conteúdo de C do solo remanescente da vegetação original de floresta e/ou da cultura do café. Os valores de

$\delta^{13}C$ das áreas cultivadas, principalmente na ILP e ILPF foram bastante próximos ao C da fonte das plantas C_4 cultivadas nas áreas (Tabela 2.2). A biomassa das gramíneas cultivadas (*Brachiaria brizantha e Zea mays*) apresentou $\delta^{13}C$ de 12,3±0,2 ‰ nas folhas e de 12,7±0,7 ‰ nas raízes. O esterco bovino, embora com um pequeno empobrecimento ($\delta^{13}C$ de -13,8±0,1 ‰) apresenta $\delta^{13}C$ muito próximo ao da pastagem de braquiária. Embora ocorra fracionamento isotópico nas primeiras fases da decomposição dessa biomassa fica evidente que os efeitos da ciclagem dos nutrientes nos sistemas de cultivo são mais marcantes nas camadas superficiais (0-0,20 m) onde há um distanciamento entre os valores de $\delta^{13}C$ e de $\delta^{15}N$ das áreas cultivadas quando comparadas com o solo da floresta. Nessas camadas a adição de C pelas gramíneas é maior (Figura 2.3 e Figura 2.6), promovendo o enriquecimento de $\delta^{13}C$ paralelo a redução dos valores de $\delta^{15}N$.

A ausência do preparo do solo, a cobertura pela vegetação nativa e a proteção física e química da MOS na área de floresta promove um processo mais lento de decomposição da MOS. Tal fato explica a razão pela qual o tempo de residência do C e N nos solos de floresta normalmente é maior daquele verificado em sistemas agrícolas (CHEN et al., 2016). Assim, a permanência de átomos de ^{15}N em detrimento aos de ^{14}N é favorecida, havendo um enriquecimento de $\delta^{15}N$ (BUSTAMANTE et al., 2004). Nesse ambiente natural o N pode ser fracionado em vários ciclos de absorção pelas plantas e retorno ao solo pela deposição de serapilheira, enriquecendo gradativamente a abundância de átomos de ^{15}N (SZPAK, 2014).

Nas áreas cultivadas grande parte do N provindo da floresta foi exportado por meio da colheita das culturas agrícolas, bem como pela carne dos bovinos. Paralelamente ocorrem entradas substanciais de N dos fertilizantes (na ILP e na ILPF), da MO das gramíneas ($\delta^{15}N$ = 0,0±1,1 ‰) e/ou do eucalipto ($\delta^{15}N$ = -0,3±0,6 ‰) e dos dejetos bovinos ($\delta^{15}N$ = 4,3±0,2 ‰). A adubação nitrogenada potencializa a ciclagem do carbono e de nutrientes no solo (NEFF et al., 2002). Esses fatores explicam em parte o empobrecimento do $\delta^{15}N$, a se iniciar principalmente nas camadas superficiais avaliadas (0-0,20 m) e posteriormente atingindo camadas mais profundas (0,20-0,40 m), que tem sido verificado ao longo dos cultivos. Os valores de $\delta^{15}N$ muito próximos a 0 ‰, ou mesmo negativos, verificados nas folhas e raízes do eucalipto, do milho e da braquiária podem ser indícios de que essas culturas estão utilizando N proveniente dos fertilizantes ($\delta^{15}N \approx 0$ ‰) ou mesmo da fixação biológica ($\delta^{15}N_{atm} \approx 0$ ‰) pelas plantas. Entretanto a depleção de $\delta^{15}N$ é comum nos processos biológicos de incorporação de N na biomassa vegetal (GURMESA et al., 2017), principalmente para espécies arbóreas e inclusive para as não fixadoras de N, como o eucalipto. Tais características usualmente

impossibilitam as quantificações da fixação biológica de N por meio de abundância natural de $\delta^{15}N$ em sistemas agroflorestais, por exemplo (BODDEY et al., 2000).

A conversão da pastagem extensiva para sistemas integrados de produção (ILP e ILPF) pouco modificou os teores de C (Figura 2.3), N (Figura 2.4) e seus estoques no solo (Figura 2.5a, b). Todas essas áreas, inclusive a pastagem extensiva, estão incrementando os estoques de C e N ao longo dos cultivos. A área de pastagem extensiva, no decorrer do experimento, incrementou 25 e 17 % os estoques de N e C, respectivamente. De maneira similar aos sistemas ILP e ILPF a taxa lotação dos animais nesse sistema foi adequadamente manejada por meio do procedimento "*put-and-take*", sendo que o pastejo da braquiária pode favorecer o acúmulo de C no solo por meio de diferentes mecanismos, tais como: (i) pastejo em lotação adequada dos bovinos estimula o crescimento do sistema radicular e alocação de C no solo (BIELUCZYK et al., 2017b); (ii) bovinos atuam como catalizadores na ciclagem da MOS e nutrientes (ANGHINONI et al., 2013; ASSMANN et al., 2017) promovendo o retorno e redistribuição da maior parte dos nutrientes ingeridos para o solo via fezes e urina, i.e, 60 a 85 % do N e do K são ciclados e disponibilizados para as plantas cultivadas (HAYNES; WILLIAMS, 1993), considerando que em trabalho recente sob ILP mais de 91 % do K das fezes de bovinos se concentrou em frações lábeis, com tempo de meia vida inferior a 12 dias (ASSMANN et al., 2017); (iii) cobertura vegetal permanente sobre o solo propiciando um ambiente favorável no solo para melhorias físicas, químicas e biológicas (HOK et al., 2018), e consequentemente reduzindo os riscos de degradação do solo e pastagem por erosão.

Quando considerada a última avaliação realizada (pós-pastejo em 2016) a conversão da pastagem extensiva em ILP resultou em média em um incremento de 0,34 Mg ha^{-1} de C no solo (i.e., índice de estoque de C de 1,03 (0-0,2 m) e de 1,01 (0,2-0,4 m) – Tabela 2.3). Incrementos nos estoques de C foram reportados para implementação de sistemas de ILP, com fertilidade manejada, sob áreas de agricultura ou de pastagens degradadas. Alguns estudos para a camada de 0-0,30 m em áreas tropicais como no Cerrado e na Amazônia apresentam taxas de acúmulo após a implementação da ILP variando de 0,2 a 2,8 Mg ha^{-1} ano^{-1} (CARVALHO et al., 2014; CARVALHO et al., 2010a; SALTON et al., 2014; SANT-ANNA et al., 2017) contudo, a magnitude do acúmulo do C é dependente das condições edafoclimáticas, bem como de fatores como as espécies cultivadas e a rotação das culturas na ILP (CARVALHO et al., 2010a). Outros estudos para a camada de 0-0,02 m verificaram incrementos de 1,16 Mg ha^{-1} ano^{-1} de C e 0,12 Mg ha^{-1} ano^{-1} de N (SOUZA et al., 2009) ou mesmo similaridades entre a área de pastagem bem manejada (50,11±3,73 Mg ha^{-1}),

e a ILP (48,02 ±1,14 Mg ha^{-1}) nos estoques de C (SALTON et al., 2011), como também é o caso desse estudo.

Na área de ILP os resíduos culturais do milho, ausentes na pastagem extensiva, e do sistema radicular são constantemente renovados sob pastejo intensivo (SILVA et al., 2014) e favorecem o aporte de MOS. Além desses fatores, na área de ILP há um estímulo na produção de biomassa aérea e radicular da pastagem que recupera nutrientes provenientes da fertilização aplicada no período da lavoura (SALTON et al., 2014). Melhorias na biodiversidade de sistemas conservacionistas, como SPD, tem incrementado o aporte de biomassa de C ao solo variando entre 4,5 a 8,0 Mg ha^{-1} ano^{-1} (SÁ et al., 2017).

Os maiores valores de $\delta^{13}C$ nas áreas de ILP (e também na ILPF) quando comparados à pastagem extensiva são indicativos da maior reciclagem de nutrientes. Para sustentar os estoques de C no solo desses sistemas intensivos se torna necessário aportar mais MOS, pois a exportação de C e nutrientes pelas culturas e carne bovina é maior do que na pastagem extensiva. A alternância e consórcio entre as espécies cultivadas, a dessecação da pastagem para cultivo, bem como os efeitos da adição fertilizantes e consequentemente atividade biológica mais pronunciada (CARVALHO et al., 2014) são fatores que aceleram tanto o aporte quanto a decomposição da MOS nos SIPAs (ANGHINONI et al., 2013). Dessa forma, no solo sob ILP passam a predominar sinais isotópicos provenientes da biomassa das gramíneas cultivadas, bem como dos fertilizantes e dejetos bovinos adicionados.

Nos sistemas cultivados, principalmente nas áreas de ILP e ILPF, há uma redução temporal do $\delta^{15}N$ (Figura 2.4b, d, f). Esta redução do $\delta^{15}N$ pode estar relacionado com em que a entrada N via: (i) fertilizantes nitrogenados sintéticos que derivam de N atmosférico ($\delta^{15}N_{atm}$ = 0‰), havendo baixo fracionamento durante o processo de produção, portanto o seu $\delta^{15}N$ tende a ser próximo de 0 ‰ (BATEMAN; KELLY; JICKELLS, 2005); (ii) fezes de bovinos que tem sinais isotópicos bastante semelhantes a fonte alimentar embora ocorreu um enriquecimento no metabolismo ruminal (massa seca das fezes teve $\delta^{15}N$=4,3±0,2 ‰); (iii) urina que tem $\delta^{15}N \approx$ -1 ‰ (ERIKSEN; HØGH-JENSEN, 1998) e o nitrato depositado no solo é enriquecido de $\delta^{15}N$ (10‰ a 22‰) pois há volatilização preferencial do $\delta^{15}N$ depositado em forma de amônia (BATEMAN; KELLY; JICKELLS, 2005); e, (iv) MOS remanescente da área de vegetação nativa que está em estágios mais avançados de decomposição, bem como, a MOS das camadas mais profundas dos sistemas de manejo (Figura 2.3 e Figura 2.7).

Os estoques de C e N da ILP e da ILPF não se diferenciaram em todas as épocas avaliadas. Entretanto, a conversão da ILP para a ILPF resultou em média em uma redução do potencial de sequestro de C em média de 0,52 Mg ha^{-1} ano^{-1} de C e 0,03 Mg ha^{-1} ano^{-1} de N na

camada de 0,00-0,40 m (resultados da pós-pastagem em 2016). Na área de ILPF as gramíneas cultivadas apresentaram menor biomassa na parte aérea, principalmente perto do eucalipto (PEZZOPANE et al., 2017), bem como menor produtividade de raízes finas explicando o menor aporte de MOS lábil nessa área (Figura 2.6), e consequentemente menores estoques de C no solo. Por outro lado, deve ser considerado que o eucalipto adiciona ao solo uma MO mais recalcitrante (CONCEIÇÃO et al., 2017) em que os resíduos contém elevada relação C:N (Tabela 2.2) e elevados teores de lignina e celulose, teores esses que são incrementados com a idade das árvores (BARRETO; GAMA-RODRIGUES; GAMA-RODRIGUES, 2014). Tais características favorecem o acúmulo de MOS oriunda do eucalipto. O empobrecimento do $\delta^{13}C$ ao longo dos cultivos nas camadas mais superficiais (0-0,05 e 0,05-0,10 m) desse sistema de manejo (Tabela 2.2) corrobora a adição de MOS proveniente do eucalipto. Esse efeito sobre o $\delta^{13}C$ no solo, com redução de 0,7 ‰ em um ano, foi constatado apenas a partir de 5 anos de idade das árvores e na camada superficial, portanto, provavelmente essa MOS proveniente do eucalipto na ILPF seja depositada ao solo via serapilheira.

São poucos os estudos que avaliaram os efeitos da adoção da ILPF nos estoques e isótopos de C e N. No sul da Amazônia em um estudo que comparou dois arranjos da ILPF implantados em 2009 com uma área de pastagem não foram encontradas diferenças para os estoques de C e N entre sistemas na camada de 0-0,30 m. Embora, na camada de 0,30-1,00 m os estoques de C sob as linhas triplas dos eucaliptos (14 x 3 x 2 m) foram incrementados em média 10,69 Mg ha^{-1} e os estoques de N nos pontos centrais da entrelinha do outro arranjo de linhas simples (20 x 2 m) foram reduzidos em 1,67 Mg ha^{-1} (OLIVEIRA et al., 2018). Três anos de implementação da ILPF promoveram incrementos de 7,8 % nos estoques de C e 10,4 % nos estoques de N em áreas de transição dos biomas Cerrado/Amazônia (CONCEIÇÃO et al., 2017). No presente estudo foram verificados incrementos de 10 % nos estoques de C, e de 15 % nos estoques de N ao longo de dois anos avaliados do sistema.

Ao longo do tempo os sistemas integrados avaliados se assemelharam quanto aos estoques de C e N (Figura 2.5), embora as taxas de acúmulo sejam menores na ILPF. Apesar disso, as árvores na ILPF representam uma ferramenta importante para a mitigação das emissões de CO_2 (ALVES; MADARI; BODDEY, 2017), pois a biomassa da madeira do eucalipto tem elevado potencial de acúmulo de C, principalmente em suas formas mais recalcitrantes (CONCEIÇÃO et al., 2017). Este C imobilizado na madeira pode retornar a atmosfera no curto e médio prazo se esta madeira for destinada a queima, ou mesmo, permanecer estocado por longo prazo quando utilizada na construção civil ou indústria moveleira. Outro aspecto relevante, é o potencial acúmulo de C no solo em profundidade

superior a 0,40 m, via deposição de exsudatos e decomposição do sistema radicular, tanto pela braquiária (STAHL et al., 2017) e especialmente pela espécie arbórea, neste caso o eucalipto (LACLAU et al., 2013).

2.4.2. Intensificação dos sistemas de produção vs qualidade da matéria orgânica do solo

Em comparação à floresta as áreas cultivadas reduziram o aporte da fração leve (Figura 2.6a, b, c), da particulada e da associada aos minerais (Figura 2.7a) na camada superficial do solo. Entretanto, os sistemas cultivados foram eficientes em aportar carbono nas camadas subsuperficiais (abaixo de 0,05 m) com conteúdo de MOL similar e em certos locais até maior que a floresta (Figura 2.6a, b, c). O COP, após adições pela lavoura em 2015, e o COAM, após o período de pastejo em 2016, dos sistemas de cultivo também se assemelharam à floresta (Figura 2.7b, c, d). O sistema radicular da braquiária dos sistemas de cultivo bem manejado, como os avaliados nesse estudo, é profundo e bem distribuído ao longo do perfil do solo (CONCEIÇÃO et al., 2017). Dessa forma, o uso da braquiária tem sido indicado como agente responsável pelos incrementos na MOS em profundidade, principalmente nas frações lábeis como o COP e a MOL (LOSS et al., 2012; BIELUCZYK et al., 2017b).

As frações da matéria orgânica e os índices de manejo foram influenciados pelos sistemas integrados de produção. O efeito da integração da produção animal com a agricultura foi positivo para os aspectos qualitativos da MOS pois a ILP favoreceu incrementos de 65 % no aporte de MOL entre a primeira (2014) e a terceira época de coleta (2016). Esses incrementos ocorreram principalmente na época da lavoura (milho+braquiária), semelhante ao verificado para os teores de COP (Figura 2.8), sendo observada correlação positiva ($r = 0,75$; $p < 0,001$) entre esses atributos. A constante deposição de nova MOS proveniente de resíduos culturais sob sistemas intensivos, bem como de raízes mortas em pastagens excede a capacidade decompositora dos microorganismos, havendo acúmulos em formas menos humificadas no solo (BORDONAL et al., 2017). Previamente ao período da lavoura, a braquiária foi dessecada para plantio do milho, o que disponibilizou elevadas quantidades de palhada e raízes mortas para o processo de decomposição. Adicionalmente, a braquiária foi semeada junto com o milho, favorecendo posteriores adições de MOS via sistema radicular dessas gramíneas. Diante dessa dinâmica, as frações lábeis (COP e a MOL) foram as primeiras a refletir essa incorporação da MOS, pois logo no período agrícola seus teores foram incrementados. Estes resultados confirmam que frações lábeis da MOS podem ser utilizadas como indicadores sensíveis as mudanças de manejo no curto prazo, contribuindo para estabelecer práticas de manejo mais sustentáveis (CARTER, 2002).

De maneira similar à ILP, a área de pastagem extensiva também apresentou incrementos de dessas frações na avaliação de 2015. Entretanto, nessa área os resultados evidenciam um efeito sazonal, pois essa avaliação coincidiu com o período chuvoso, em que a disponibilidade hídrica favoreceu a oferta de forragem. Assim, esse período apresentou maior lotação animal (1,5 UA ha^{-1} enquanto na estação seca foi de 0,5 UA ha^{-1}), o que também pode ter incrementado a renovação radicular (SILVA et al., 2014) e consequente aumento no aporte de matéria orgânica lábil ao solo.

Na última avaliação realizada (pós-pastejo em 2016) a ILP, e também a ILPF, apresentaram maior quantidade de COP e igual COAM (i.e., índices de manejo de C superiores a 129 % na ILP e ILPF – Tabela 2.3) quando comparados a pastagem extensiva. Um maior valor do índice de manejo do carbono representa efetivamente um melhor sistema de manejo do solo e culturas, pois integra em uma medida as variações ocorridas nas diferentes frações da MOS (SCHIAVO et al., 2011). Dessa forma tais resultados indicam que a ILP e a ILPF são promissores para futuros incrementos nos estoques de C no solo, com um melhor balanço entre as frações lábeis e recalcitrantes da MOS. Alguns estudos avaliaram os reflexos do manejo na fração particulada da MOS não verificando diferenças entre áreas de intensidade moderada de pastejo e sistema plantio direto sem pastejo (ASSMAN et al., 2014; BIELUCZYK et al., 2017a). Entretanto, outros estudos indicam incrementos no COP devido ao uso de sistemas integrados atribuindo tais resultados ao aporte de C pelas raízes das braquiárias (SALTON et al., 2011; LOSS et al., 2012). Os maiores teores da fração particulada em sistemas integrados indicam maior fluxo de energia e reciclagem de nutrientes. O pastejo intensivo nessas áreas estimula uma contínua deposição de exsudatos ricos em polissacarídeos pela renovação intensa da massa de raízes. Dessa forma, a condição edafoclimática criada pelo manejo é favorável à atividade da fauna do solo, o que incrementa a ciclagem de nutrientes e da MOS (SALTON et al., 2014).

Os resultados encontrados nesse estudo também indicam que as frações lábeis da MOS têm alterações mais rápidas quando comparadas com as recalcitrantes em SIPAs. O pastejo dos bovinos promove a adição de N prontamente disponível para as plantas e microrganismos via fezes e urina (HAYNES; WILLIAMS, 1993), favorecendo a atividade biológica e transformando o C no solo em formas mais estáveis. Diante dessa dinâmica, foi verificado que incrementos dos teores de COAM nos sistemas integrados foram relacionados aos estoques de C ($r = 0,83$) e N ($r = 0,80$). A decomposição da fração particulada também é mais sensível aos aumentos nas temperaturas quando comparada a fração mineral da MOS (BENBI; BOPARAI; BRAR, 2014), o que pode explicar em parte os incrementos ao longo do tempo, principalmente

sob período de pastejo, nos acúmulos de COAM, pois o solo avaliado localiza-se em condições de clima tropical.

A conversão da ILP em ILPF com implantação do componente florestal (*Eucalyptus urograndis*) em 2011 desencadeou a redução no aporte de MOL entre os anos de 2014 e 2016. A MOL consiste em formas de carbono recentemente adicionadas ao solo que não estão ligadas as partículas minerais (COMPTON; BOONE, 2002) caracterizando-se por ser uma forma ativa da MOS (GOSLING; PARSONS; BENDING, 2013), que apresenta rápidas respostas as práticas de manejo (BREMER; ELLERT; JANZEN, 1995) mais sensíveis quando comparadas ao COP (WANDER, 2004). Em 2016 a ILPF apresentou os menores valores desse atributo quando comparada as demais áreas (Figura 2.6). Nesse sistema o crescimento do eucalipto reduziu a radiação fotossintética ativa (PEZZOPANE et al., 2017), o que acarretou em menor desenvolvimento da braquiária em 2013/2014 e de milho em 2014/2015, e menor produção de biomassa dessas culturas. Em 2014 as árvores mediam em torno de 19 metros de altura, com DBH de 18,5 cm, em abril de 2016 as mesmas apresentavam-se com 27 m de altura e 21,3 cm de DBH. Supõe-se que nesse período também tenha ocorrido uma redução na transmissão de radiação fotossintética ativa no sub-bosque do sistema, com impactos diretos na biomassa das plantas e consequentemente no aporte de MOL.

De acordo com os resultados deste estudo, paralelo ao de PEZZOPANE et al., (2017), o aporte de MOL na ILPF poderia ser otimizado por meio de práticas de manejo da cultura do eucalipto, tais como desbaste e desrama. Estas práticas melhoram a incidência de radiação fotossintética ativa e possibilitam um melhor desenvolvimento das espécies agrícolas nos sistemas agrossilvipastoris (FONTAN et al., 2011). Como uma segunda estratégia para melhorar a qualidade da MOS e ao mesmo tempo incrementar os estoques de C nos sistemas integrados indica-se incluir uma leguminosa na rotação das culturas pois foram verificadas correlações negativas da relação C:N com a maioria dos atributos, inclusive com os estoques de C e N. A diversidade de plantas na rotação de culturas melhora a estrutura ecossistêmica do solo e suas funções (TIEMANN et al., 2015), havendo diferenciado aproveitamento de nutrientes e distribuição do sistema radicular, onde as leguminosas desempenham papel essencial na fixação biológica de nitrogênio (FRANCHINI et al., 2011).

2.4.3 Matéria orgânica e a fertilidade do solo

Além de todos os benefícios em termos de sequestro e ciclagem de C no sistema, a MOS cumpre um papel fundamental para sustentar e melhorar a fertilidade do solo, especialmente em ambientes topicais. Os estoques de C e N, bem como as frações mais recalcitrantes da MOS

se correlacionaram positivamente com a CTC potencial do solo. Em solos tropicais, com a presença de caulinita e óxidos de Fe e Al na fração argila, as cargas negativas são predominantemente geradas pelos grupamentos funcionais da MOS (e.g., grupamento carboxil) (OORTS; VANLAUWE; MERCKX, 2003). Portanto, sistemas integrados que adicionem C ao solo, como ILP e ILPF, são fundamentais para minimizar as perdas de nutrientes (e.g., lixiviação) e aumentar a eficiência de uso de fertilizantes, trazendo não somente benefícios agronômicos, mas também ambientais e socioeconômicos (BALBINO; BARCELLOS; STONE, 2011; LEMAIRE et al., 2014; SALTON et al., 2014).

O diagrama de ordenação da análise de redundância demonstra que os SIPAs (com fertilidade manejada) se semelham (Figura 2.9), enquanto a pastagem extensiva se difere e correlaciona-se negativamente com os atributos da fertilidade do solo e frações da MOS. Estas frações da MOS explicaram em grande parte (51,21 %) a fertilidade dos sistemas de cultivo (Figura 2.9), onde as mais lábeis estiveram correlacionadas positivamente ($r > 0,61$) com os nutrientes no solo (Tabela S1). Portanto, algumas práticas de manejo como as fertilizações nesses sistemas integrados melhoraram a disponibilidade de nutrientes às plantas (e.g. somatório das bases e P), favorecendo o aporte de MOS associado a ciclagem desses nutrientes. Aumentar a ciclagem dos nutrientes, como nos sistemas de ILP e ILPF, é essencial para tornar o solo quimicamente mais resiliente e reduzir a demanda de nutrientes via fertilizantes (SALTON et al., 2014; ASSMANN et al., 2017).

2.5 Conclusões

A intensificação de sistemas integrados de produção agropecuária é uma alternativa que incrementou não somente os estoques de C e N, mas também a qualidade da MOS. Os cultivos favoreceram o acúmulo de C, inclusive no manejo da área de pastagem extensiva, obtendo-se quantidades similares à vegetação nativa nas camadas subsuperficiais do solo. Parcialmente a hipótese do estudo foi aceita, pois em relação a área de pastagem extensiva a área de integração lavoura-pecuária promoveu acúmulo de C e N de 0,34 e 0,01 Mg ha^{-1}, respectivamente. Entretanto, a integração lavoura-pecuária-floresta reduziu esse potencial de acúmulo em média de 0,52 Mg ha^{-1} ano^{-1} e 0,03 Mg ha^{-1} ano^{-1} para o C e o N, respectivamente.

A espécie arbórea na integração lavoura-pecuária-floresta interferiu na origem do C sequestrado no solo reduzindo o $\delta^{13}C$ e também as quantidades de aporte de matéria orgânica leve ao solo ao longo dos cultivos. Nos sistemas integrados de produção agropecuária o período de lavoura favoreceu melhorias na fertilidade do solo e na qualidade da matéria orgânica. Dessa forma, as frações lábeis da matéria orgânica foram incrementadas pelo período

da lavoura e o período da pastagem promoveu sua estabilização do carbono e no nitrogênio no solo, o que garantiu incrementos nos seus estoques nos sistemas avaliados.

Diante dos resultados deste estudo, o uso de sistemas integrados é uma alternativa eficiente para que o Brasil possa atender os compromissos internacionais assumidos para redução da emissão de GEE (e.g., Acordo de Paris – 2015), bem como, uma estratégia de intensificação mais sustentável da sua produção agrícola. Porém, sugere-se remanejar o arranjo das árvores na integração lavoura-pecuária-floresta por meio de práticas culturais, pois houve limitação do aporte da matéria orgânica leve a partir do quarto ano de idade do eucalipto, em prol de evitar futuras reduções nos estoques de C e N desse sistema.

Referências

AIKEN, G. E. Invited Review: Grazing management options in meeting objectives of grazing experiments. **The Professional Animal Scientist**, Amsterdam, v. 32, n. 1, p. 1–9, 2016.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

ALVES, B. J. R.; MADARI, B. E.; BODDEY, R. M. Integrated crop–livestock–forestry systems: prospects for a sustainable agricultural intensification. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Heidelberg, v. 108, n. 1, p. 1–4, 2017.

ANDERSON, J. M.; INGRAM, J. S. I. **Tropical soil biology and fertility**: a handbook of methods. Wallingford: CAB International, 1989.

ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. D. F.; VALADÃO, S. E.; COSTA, G. de A. Abordagem sistêmica do solo em sistemas integrados de produção agrícola e pecuária no subtrópico brasileiro. **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa, v. 8, p. 325–380, 2013.

ASSMAN, J. M.; ANGHINONI, I.; MARTINS, A. P.; COSTA, S. E. V. G. A.; CECAGNO, D.; CARLOS, F. S.; CARVALHO, P. C. F. Soil carbon and nitrogen stocks and fractions in a long-term integrated crop – livestock system under no-tillage in southern Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 190, p. 52–59, 2014.

ASSMANN, J. M.; MARTINS, A. P.; ANGHINONI, I.; DE OLIVEIRA DENARDIN, L. G.; DE HOLANDA NICHEL, G.; DE ANDRADE COSTA, S. E. V. G.; PEREIRA E SILVA, R. A.; BALERINI, F.; DE FACCIO CARVALHO, P. C.; FRANZLUEBBERS, A. J. Phosphorus and potassium cycling in a long-term no-till integrated soybean-beef cattle production system under different grazing intensities insubtropics. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Heidelberg, v. 108, n. 1, p. 21–33, 2017.

BALBINO, L. C.; BARCELLOS, A. de O.; STONE, L. F. **Marco referencial**: integração lavoura-pecuária-floresta (iLPF). Brasília, DF: Embrapa, 2011.

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

BARRETO, P. A. B.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; GAMA-RODRIGUES, A. C. Carbono das frações da matéria orgânica em solos sob plantações de eucalipto de diferentes idades. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 104, p. 581–590, 2014.

BATEMAN, A. S.; KELLY, S. D.; JICKELLS, T. D. Nitrogen isotope relationships between crops and fertilizer: Implications for using nitrogen isotope analysis as an indicator of agricultural regime. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, DC, v. 53, n. 14, p. 5760–5765, 2005.

BENBI, D. K.; BOPARAI, A. K.; BRAR, K. Decomposition of particulate organic matter is more sensitive to temperature than the mineral associated organic matter. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 70, p. 183–192, 2014.

BIELUCZYK, W.; PEREIRA, M. G.; GUARESCHI, R. F.; BONETTI, J. D. A.; FREÓ, V. A.; DA SILVA NETO, E. C.; DE ANDRADE BONETTI, J.; FREÓ, V. A.; DA SILVA NETO, E. C. Granulometric and oxidizable carbon fractions of soil organic matter in crop-livestock integration systems. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 38, n. 2, p. 607–622, 2017a.

BIELUCZYK, W.; PEREIRA, M. G.; GUARESCHI, R. F.; DE ANDRADE BONETTI, J.; DA SILVA, G. N.; DA SILVA NETO, E. C. Soil carbon and nitrogen stocks, light organic matter, and remaining phosphorus under a crop-livestock integration system. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 38, n. 4, p. 1825–1840, 2017b.

BLAIR, G. J.; LEFROY, R. D. B.; LISLE, L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. **Australian Journal of Agricultural Research**, Melbourne, v. 46, n. 7, p. 1459, 1995.

BODDEY, R. M.; PEOPLES, M. B.; PALMER, B.; DART, P. J. Use of the 15 N natural abundance technique to quantify biological nitrogen fixation by woody perennials. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Heidelberg, v. 57, p. 235–270, 2000.

BORCARD, D.; GILLET, F.; LEGENDRE, P. Numerical ecology with R. New York: Springer, 2011.

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

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Plano setorial de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas para a consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono na agricultura**: Plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono). Brasília, DF: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento/Ministério do Desenvolvimento Agrário, 2012.

BREMER, E.; ELLERT, B. H.; JANZEN, H. H. Total and light-fraction carbon dynamics during four decades after cropping changes. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 59, n. 5, p. 1398–1403, 1995.

BUSTAMANTE, M. M. C.; MARTINELLI, L. A.; SILVA, D. A.; CAMARGO, P. B.; KLINK, C. A.; DOMINGUES, T. F.; SANTOS, R. V. 15N natural abundance in woody plants and soils of central Brazil savannas (Cerrado). **Ecological Applications**, Washington, DC, v. 14, n. sp4, p. 200–213, 2004.

CALDERANO FILHO, B.; SANTOS, H. G.; FONSECA, O. O. M.; PRIMAVESI, O.; PRIMAVESI, A. C. **Os solos da Fazenda Canchim, Centro de Pesquisa de Pecuária do Sudeste, São Carlos, SP**: Levantamento semidetalhado, propriedades e potenciais. Rio de Janeiro: EMBRAPA, CNPS; CPPSE, 1998. 95 p.

CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, n. 3, p. 777–783, 1992.

CARTER, M. R. Soil quality for sustainable land management: Organic matter and aggregation interactions that maintain soil functions. **Agronomy Journal**, Madison, v. 94, n. 1, p. 38–47, 2002.

CARVALHO, F. P.; MELO, C. A. D.; MACHADO, M. S.; DIAS, D. C. F. S.; ALVARENGA, E. M. The allelopathic effect of eucalyptus leaf extract on grass forage seed. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 33, n. 2, p. 193–201, 2015.

CARVALHO, J. L. N.; RAUCCI, G. S.; FRAZÃO, L. A.; CERRI, C. E. P.; BERNOUX, M.; CERRI, C. C. Crop-pasture rotation: A strategy to reduce soil greenhouse gas emissions in the Brazilian Cerrado. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 183, p. 167–175, 2014.

CARVALHO, J. L. N.; RAUCHI, G. S.; CERRI, C. E. P.; BERNOUX, M.; FEIGL, B. J.; WRUCK, F. J.; CERRI, C. C. Impact of pasture, agriculture and crop-livestock systems on soil C stocks in Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 110, n. 1, p. 175–186, 2010a.

CARVALHO, P. C. F.; ANGHINONI, I.; DE MORAES, A.; DE SOUZA, E. D.; SULC, R. M.; LANG, C. R.; FLORES, J. P. C.; TERRA LOPES, M. L.; DA SILVA, J. L. S.; CONTE, O.; DE LIMA WESP, C.; LEVIEN, R.; FONTANELI, R. S.; BAYER, C. Managing grazing animals to achieve nutrient cycling and soil improvement in no-till integrated systems. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Heidelberg, v. 88, n. 2, p. 259–273, 2010b.

CERLI, C.; CELI, L.; KALBITZ, K.; GUGGENBERGER, G.; KAISER, K. Separation of light and heavy organic matter fractions in soil - Testing for proper density cut-off and dispersion level. **Geoderma**, Amsterdam, v. 170, p. 403–416, 2012.

CHEN, G.; YANG, Y.; YANG, Z.; XIE, J.; GUO, J.; GAO, R.; YIN, Y.; ROBINSON, D. Accelerated soil carbon turnover under tree plantations limits soil carbon storage. **Scientific Reports**, v. 6, art. 19693, 2016. DOI: 10.1038/srep19693.

CHERUBIN, M. R.; KARLEN, D. L.; FRANCO, A. L. C.; CERRI, C. E. P.; TORMENA, C. A.; CERRI, C. C. A Soil Management Assessment Framework (SMAF) evaluation of Brazilian sugarcane expansion on soil quality. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 80, n. 1, p. 215–226, 2016.

COMPTON, J. E.; BOONE, R. D. Soil nitrogen transformations and the role of light fraction organic matter in forest soils. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 34, n. 7, p. 933–943, 2002.

CONCEIÇÃO, M. C. G.; MATOS, E. S.; BIDONE, E. D.; RODRIGUES, R. A. R.; CORDEIRO, R. C. Changes in soil carbon stocks under integrated crop-livestock-forest system in the Brazilian Amazon Region. **Agricultural Sciences**, Hubei Province, China, v. 8, n. 9, p. 904–913, 2017.

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

COSTA JUNIOR, C.; PICCOLO, M. D. C.; CAMARGO, P. B.; BERNOUX, M. M. Y.; SIQUEIRA NETO, M. Nitrogênio e abundância natural de 15N em agregados do solo no bioma Cerrado. **Ensaios e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde**, Campo Grande, v. 15, n. 2, p. 47–66, 2011.

DON, A.; SCHUMACHER, J.; FREIBAUER, A. Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks - a meta-analysis. **Global Change Biology**, Oxford, v. 17, n. 4, p. 1658–1670, 2011.

DONAGEMA, G. K.; CAMPOS, D. V. B.; CALDERANO, S. B.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. H. M. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011.

DURIGAN, M. R.; CHERUBIN, M. R.; CAMARGO, P. B.; FERREIRA, J. N.; BERENGUER, E.; GARDNER, T. A.; BARLOW, J.; DIAS, C. T. dos S.; SIGNOR, D.; OLIVEIRA JUNIOR, R. C. de; CERRI, C. E. P. Soil organic matter responses to anthropogenic forest disturbance and land use change in the Eastern Brazilian Amazon. **Sustainability**, New Rochelle, v. 9, n. 3, p. 379-394, 2017. doi:10.3390/su9030379.

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

EMBRAPA. **ILPF em números**. Sinop, MT: Embrapa Agrossilvipastoril, 2016. 12 p.

ERIKSEN, J.; HØGH-JENSEN, H. Variations in the natural abundance of15N in ryegrass/white clover shoot material as influenced by cattle grazing. **Plant and Soil**, The Hague, v. 205, n. 1, p. 67–76, 1998.

FAO. **FAOSTAT**. Rome, 2015. Disponível em: http://faostat.fao.org. Acesso em: 10 mar. 2018.

FEARNSIDE, P. M.; BARBOSA, R. I. Soil carbon changes from conversion of forest to pasture in Brazilian Amazonia. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 108, p. 147–166, 1998.

FERREIRA, A. O.; AMADO, T. J. C.; RICE, C. W.; RUIZ DIAZ, D. A.; BRIEDIS, C.; INAGAKI, T. M.; GONÇALVES, D. R. P. Driving factors of soil carbon accumulation in Oxisols in long-term no-till systems of South Brazil. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 622–623, p. 735–742, 2018.

FONSECA, G. A. B. The vanishing Brazilian Atlantic forest. **Biological Conservation**, Barking, v. 34, n. 1, p. 17–34, 1985.

FONTAN, I. C. I.; REIS, G. G.; REIS, M. G. F.; LEITE, H. G.; MONTE, M. A.; RAMOS, D. C.; SOUZA, F. C. Growth of pruned eucalypt clone in an agroforestry system in southeastern Brazil. **Agroforestry Systems**, Heidelberg, v. 83, n. 2, p. 121–131, 2011.

FRANCHINI, J. C.; COSTA, J. M. da; DEBIASI, H.; TORRES, E. Importância da rotação de culturas para a produção agrícola sustentável no Paraná. [s.l: s.n.]

FRANCO, A. L. C.; CHERUBIN, M. R.; PAVINATO, P. S.; CERRI, C. E. P.; SIX, J.; DAVIES, C. A.; CERRI, C. C. Soil carbon, nitrogen and phosphorus changes under sugarcane expansion in Brazil. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 515–516, p. 30–38, 2015.

FRANZLUEBBERS, A. J.; STUEDEMANN, J. A. Crop and cattle production responses to tillage and cover crop management in an integrated crop-livestock system in the southeastern USA. **European Journal of Agronomy**, Montrouge Cedex, v. 57, p. 62–70, 2014.

GIL, J.; SIEBOLD, M.; BERGER, T. Adoption and development of integrated crop-livestock-forestry systems in Mato Grosso, Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 199, p. 394–406, 2015.

GOSLING, P.; PARSONS, N.; BENDING, G. D. What are the primary factors controlling the light fraction and particulate soil organic matter content of agricultural soils ? **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 49, n. 8, p. 1001–1014, 2013.

GROPPO, J. D.; LINS, S. R. M.; CAMARGO, P. B.; ASSAD, E. D.; PINTO, H. S.; MARTINS, S. C.; SALGADO, P. R.; EVANGELISTA, B.; VASCONCELLOS, E.; SANO, E. E.; PAVÃO, E.; LUNA, R.; MARTINELLI, L. A. Changes in soil carbon, nitrogen, and phosphorus due to land-use changes in Brazil. **Biogeosciences**, Katlenberg-Lindau, v. 12, n. 15, p. 4765–4780, 2015.

GUO, L. B.; GIFFORD, R. M. Soil carbon stocks and land use change : a meta analysis. **Global Change Biology**, Oxford, v. 8, n. 4, p. 345–360, 2002.

GURMESA, G. A.; LU, X.; GUNDERSEN, P.; FANG, Y.; MAO, Q.; HAO, C.; MO, J. Nitrogen input15N signatures are reflected in plant 15N natural abundances in subtropical forests in China. **Biogeosciences**, Katlenberg-Lindau, v. 14, n. 9, p. 2359–2370, 2017.

HAYNES, R. J.; WILLIAMS, P. H. Nutrient cycling and soil fertility in the grazedpasture ecosystem. **Advances in Agronomy**, New York, v. 49, p. 119–199, 1993.

HOK, L.; DE MORAES SÁ, J. C.; REYES, M.; BOULAKIA, S.; TIVET, F.; LENG, V.; KONG, R.; BRIEDIS, C.; DA CRUZ HARTMAN, D.; FERREIRA, L. A.; INAGAKI, T. M.; GONÇALVES, D. R. P.; BRESSAN, P. T. Enzymes and C pools as indicators of C build up in short-term conservation agriculture in a savanna ecosystem in Cambodia. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 177, p. 125–133, 2018.

KARVATTE, N.; KLOSOWSKI, E. S.; DE ALMEIDA, R. G.; MESQUITA, E. E.; DE OLIVEIRA, C. C.; ALVES, F. V. Shading effect on microclimate and thermal comfort indexes in integrated crop-livestock-forest systems in the Brazilian Midwest. **International Journal of Biometeorology**, Leiden, v. 60, n. 12, p. 1933–1941, 2016.

LAMBAIS, G. R.; JOURDAN, C.; DE CÁSSIA PICCOLO, M.; GERMON, A.; PINHEIRO, R. C.; NOUVELLON, Y.; STAPE, J. L.; CAMPOE, O. C.; ROBIN, A.; BOUILLET, J. P.; LE MAIRE, G.; LACLAU, J. P. Contrasting phenology of *Eucalyptus grandis* fine roots in upper and very deep soil layers in Brazil. **Plant and Soil**, The Hague, v. 421, n. 1–2, p. 301–318, 2017.

LEMAIRE, G.; FRANZLUEBBERS, A.; CARVALHO, P. C. de F.; DEDIEU, B. Integrated crop-livestock systems: Strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 190, p. 4–8, 2014.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; GIÁCOMO, S. G.; PERIN, A.; ANJOS, L.; HELENA, C. Agregação, carbono e nitrogênio em agregados do solo sob plantio direto com integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 46, p. 1269–1276, 2011.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; PERIN, A.; BEUTLER, S. J. Carbon, nitrogen and natural abundance of δ 13 C e δ 15 N of light- fraction organic matter under no-tillage and crop-livestock integration systems. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 34, p. 465–472, 2012a.

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

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; PERIN, A.; ANJOS, L. H. C. dos. Abundância natural de δ13C e δ 15 N em sistemas de manejo conservacionista no cerrado. **Bioscience Journal**, Uberlandia, v. 30, n. 3, p. 604–615, 2014.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; COSTA, E. M.; BEUTLER, S. J.; PICCOLO, M. C. Soil fertility, humic fractions and natural abundance of 13C and 15N in soil under different land use in Paraná State, Southern Brazil. **IDESIA**, Arica, Chile, v. 34, n. 1, p. 27–38, 2016.

MACHADO, P. O. L. A.; SILVA, C. A. Soil management under no-tillage systems in the tropics with special reference to Brazil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Heidelberg, v. 61, n. 1–2, p. 119–130, 2001.

MAIA, S. M. F.; OGLE, S. M.; CERRI, C. E. P.; CERRI, C. C. Effect of grassland management on soil carbon sequestration in Rondônia and Mato Grosso states, Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 149, n. 1–2, p. 84–91, 2009.

MONTEIRO, F. A.; WERNER, J. C. Ciclagem de nutrientes minerais em pastagens. In. SIMPÓSIO SOBRE ECOSSISTEMA DE PASTAGENS, 1., 1989, Jaboticabal. **Anais...** Jaboticabal: FUNEP, 1989. p. 149-192.

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

MOTT, G. O.; LUCAS, H. L. The design conduct and interpretation of grazing trials on cultivated and improved pastures. **Proceedings of the International Grassland Congress**, Pensylvania, State College Press, v. 6, p.1380-1395, 1952.

NEFF, J. C; TOWNSEND, A. R.; GLEIIXNER, G.; LEHMAN, S. J.; TURNBULL, J.; BOWMAN, W. D. Variable effects of nitrogen additions on the stability and turnover of soil carbon. **Nature**, London, v. 419, n. 6910, p. 915–917, 2002.

NICOLOSO, R. da S.; LOVATO, T.; CARNEIRO, T. J.; BAYER, C.; LANZANOVA, M. E. Balanço do carbono orgânico no solo sob integração lavoura-pecuária no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 2425–2433, 2008.

OLIVEIRA, J. M.; MADARI, B. E.; CARVALHO, M. T. D. M.; ASSIS, P. C. R.; SILVEIRA, A. L. R.; DE LELES LIMA, M.; WRUCK, F. J.; MEDEIROS, J. C.; MACHADO, P. L. O. D. A. Integrated farming systems for improving soil carbon balance in the southern Amazon of Brazil. **Regional Environmental Change**, New York, v. 18, n. 1, p. 105–116, 2018.

OLIVEIRA, P. P. A.; PENATI, M. A.; CORSI, M. **Correção do solo e fertilização de pastagens em sistemas intensivos de produção de leite**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2008.

OORTS, K.; VANLAUWE, B.; MERCKX, R. Cation exchange capacities of soil organic matter fractions in a Ferric Lixisol with different organic matter inputs. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 100, n. 2–3, p. 161–171, 2003.

PAULA, R. R.; REIS, G. G.; REIS, M. G. F.; OLIVEIRA NETO, S. N.; LEITE, H. G.; MELIDO, R. C. N.; LOPES, H. N. S.; SOUZA, F. C. Eucalypt growth in monoculture and silvopastoral systems with varied tree initial densities and spatial arrangements. **Agroforestry Systems**, Heidelberg, v. 87, n. 6, p. 1295–1307, 2013.

PEZZOPANE, J. R. M.; BERNARDI, A. C. C.; BOSI, C.; OLIVEIRA, P. P. A.; MARCONATO, M. H.; PEDROSO, A. de F.; ESTEVES, S. N. Forage productivity and nutritive value during pasture renovation in integrated systems. **Agroforestry Systems**, Heidelberg, v. 1, p. 1–11, 2017.

PICCOLO, M. C.; NEILL, C.; CERRI, C. C. Natural abundance of lSN in soils along forest-to-pasture chronosequences in the western Brazilian Amazon Basin. **Oecologia**, Berlin, v. 99, n. 1–2, p. 112–117, 1994.

PITTELKOW, C. M.; LIANG, X.; LINQUIST, B. A.; GROENIGEN, L. J. Van; LEE, J.; LUNDY, M. E.; GESTEL, N. Van; SIX, J.; VENTEREA, R. T.; KESSEL, C. Van. Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture. **Nature**, London, v. 517, n. 7534, p. 365–368, 2015.

ROSSI, C. Q.; PEREIRA, M. G.; GIACOMO, S. G.; BETTA, M.; POLIDORO, J. C. Labile fractions of organic matter in cropping system with straw of brachiaria and sorghum. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 43, n. 1, p. 38–46, 2012.

SÁ, J. C. de M.; LAL, R.; CERRI, C. C.; LORENZ, K.; HUNGRIA, M.; DE FACCIO CARVALHO, P. C. Low-carbon agriculture in South America to mitigate global climate change and advance food security. **Environment International**, Oxford, v. 98, p. 102–112, 2017.

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; FABRÍCIO, A. C.; MACEDO, M. C. M.; BROCH, D. L. Teor e dinâmica do carbono no solo em sistemas de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 46, n. 10, p. 1349–1356, 2011.

SALTON, J. C.; MERCANTE, F. M.; TOMAZI, M.; ZANATTA, J. A.; CONCENÇO, G.; SILVA, W. M.; RETORE, M. Integrated crop-livestock system in tropical Brazil: Toward a sustainable production system. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 190, p. 70–79, 2014.

SANT-ANNA, S. A. C.; JANTALIA, C. P.; SÁ, J. M.; VILELA, L.; MARCHÃO, R. L.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Changes in soil organic carbon during 22 years of pastures, cropping or integrated crop/livestock systems in the Brazilian Cerrado. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Heidelberg, v. 108, n. 1, p. 101–120, 2017.

SCHIAVO, J. A.; ROSSET, J. S.; GERVASIO, M.; CESAR, J. Índice de manejo de carbono e atributos químicos de Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 46, n. 10, p. 1332–1338, 2011.

SILVA, F. D.; AMADO, T. J. C.; FERREIRA, A. O.; ASSMANN, J. M.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. de F. Soil carbon indices as affected by 10 years of integrated crop-livestock production with different pasture grazing intensities in Southern Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 190, p. 60–69, 2014.

SIX, J.; CONANT, R. T.; PAUL, E. A.; PAUSTIAN, K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. Plant and Soil, The Hague, v. 241, n. 2, p. 155–176, 2002a.

SIX, J.; FELLER, C.; DENEF, K.; OGLE, S.; SA, J. C. de M.; ALBRECHT, A. Agronomy for sustainable development. **Italian Journal of Agronomy**, Pavia, v. 22, n. 7–8, p. 755–775, 2002b.

SMITH, B. N.; EPSTEIN, S. Two categories of 13C/12C ratios for higher plants. **Plant Physiology**, Rockville, v. 47, n. 3, p. 380–384, 1971.

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

STRASSBURG, B. B. N.; LATAWIEC, A. E.; BARIONI, L. G.; NOBRE, C. A.; DA SILVA, V. P.; VALENTIM, J. F.; VIANNA, M.; ASSAD, E. D. When enough should be enough: Improving the use of current agricultural lands could meet production demands and spare natural habitats in Brazil. **Global Environmental Change**, Guildford, v. 28, n. 1, p. 84–97, 2014.

SULC, R. M.; FRANZLUEBBERS, A. J. Exploring integrated crop-livestock systems in different ecoregions of the United States. **European Journal of Agronomy**, Montrouge Cedex, v. 57, p. 21–30, 2014.

SZPAK, P. Complexities of nitrogen isotope biogeochemistry in plant-soil systems: implications for the study of ancient agricultural and animal management practices. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 5, p. 1–19, 2014.

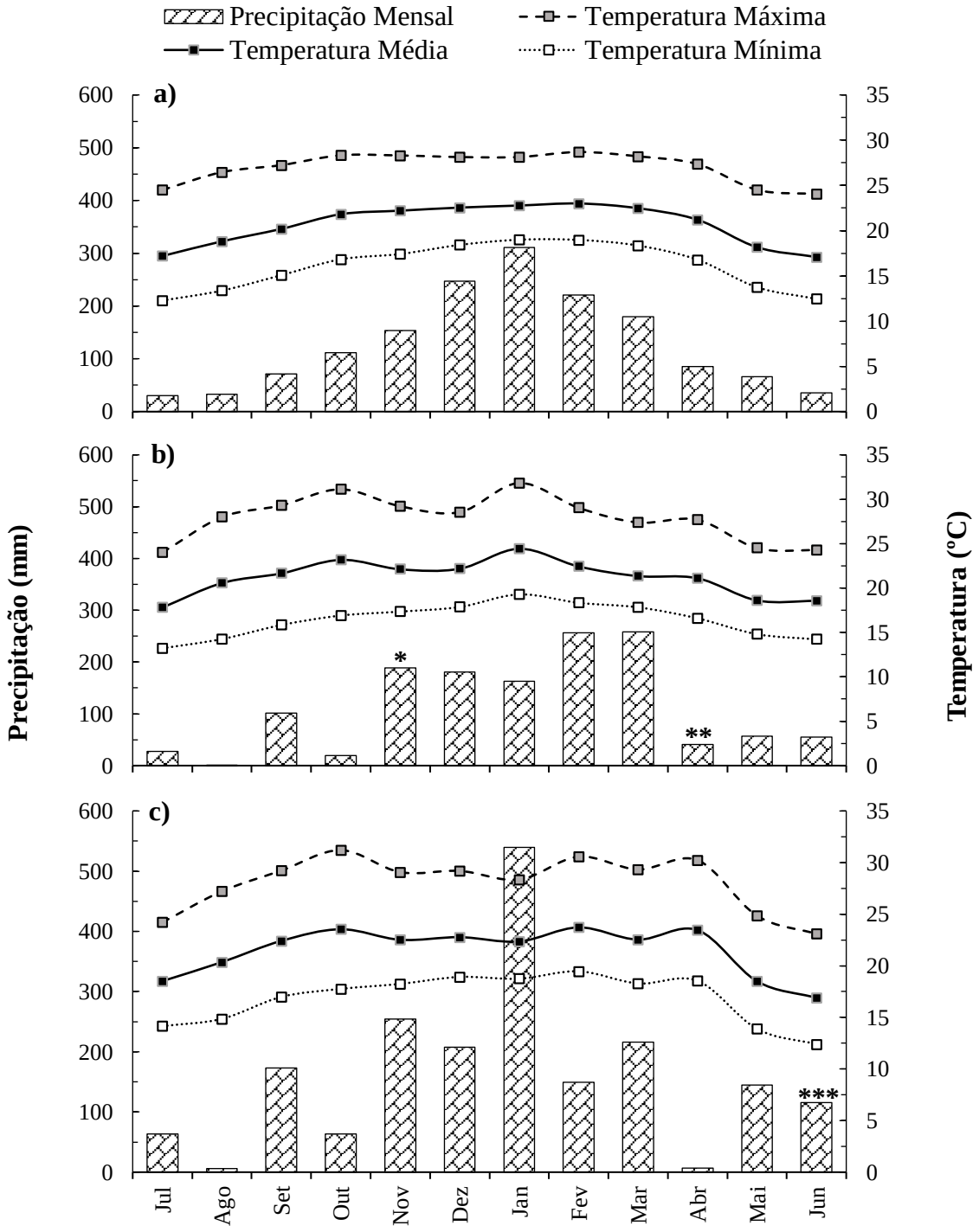
THOMAZINI, A.; MENDONÇA, E. S.; CARDOSO, I. M.; GARBIN, M. L. SOC dynamics and soil quality index of agroforestry systems in the Atlantic rainforest of Brazil. **Geoderma Regional**, Amsterdam, v. 5, p. 15–24, 2015.

TIEMANN, L. K.; GRANDY, A. S.; ATKINSON, E. E.; MARIN-SPIOTTA, E.; MCDANIEL, M. D. Crop rotational diversity enhances belowground communities and functions in an agroecosystem. **Ecology Letters**, Oxford, v. 18, n. 8, p. 761–771, 2015.

WANDER, M. M. Soil organic matter fractions and their relevance to soil function. In: MAGDOFF, F.; WEIL, R. (Ed.). **Soil organic matter in sustainable agriculture**. Boca Raton: CRC Press, 2004.

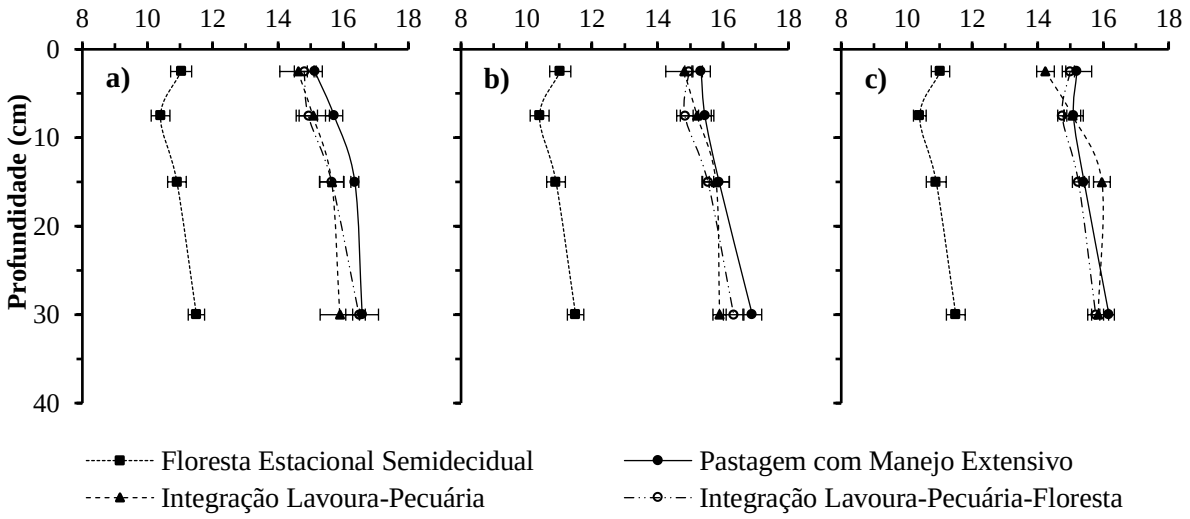
APÊNDICES

Figura S1. Valores históricos de 1983-2014 **(a)** (Fonte: INMET - estação meteorológica de São Carlos – 83726) e durante a execução do experimento de julho de 2014 a junho 2015 **(b)** e julho de 2015 a junho de 2016 **(c)**



Valores totais mensais de precipitação pluvial e médios mensais de temperaturas mínima, média e máxima do ar atmosférico. *Coleta Pós Pastejo – 2014. **Coleta Pós Lavoura – 2015. *** Coleta Pós Pastejo – 2016. (Fonte: Embrapa Pecuária Sudeste)

Figura S2 - Relação carbono/nitrogênio em áreas com sistemas integrados de agricultura pecuária, e floresta e áreas de referência de pastagem e floresta, em coletas sucessivas após dois anos de pastejo com bovinos de corte (a), após cultivo do milho, em abril de 2015 (b) e novamente após um ano de pastejo com bovinos de corte (c)



*Valores médios nos sistemas de PE e ILP (n=6) e, FES e ILPF (n=18) acompanhados pelos erros padrão.

Tabela S1. Coeficientes de correlação de Spearman (r) e probabilidade de erro (p) entre atributos indicadores de qualidade da matéria orgânica e algumas propriedades físicas e químicas do solo em áreas sob cultivo de pastagem com manejo extensivo (PE), integração lavoura-pecuária (ILP) e integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF)

	§TB	CTC	SB	P	^{15}N	N	^{13}C	C	CN	est-C	est-N	COP	COM	MOL
CTC	**0,90**													
	*<0,001**													
SB	**0,84**	0,55												
	<0,001	*<0,001*												
P	**0,70**	0,59	0,64											
	<0,001	*<0,001*	*<0,001*											
^{15}N	**-0,87**	**-0,93**	-0,56	-0,53										
	<0,001	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*										
N	**0,87**	**0,91**	0,60	0,56	**-0,92**									
	<0,001	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*									
^{13}C	0,67	0,53	0,65	0,65	-0,48	0,53								
	<0,001	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*								
C	**0,84**	**0,89**	0,57	0,53	**-0,91**	**0,99**	0,49							
	<0,001	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*							
C:N	**-0,76**	**-0,75**	-0,56	-0,60	**0,70**	**-0,75**	-0,64	-0,68						
	<0,001	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*						
est-C	**0,77**	**0,73**	0,42	0,44	**-0,76**	**0,87**	0,44	**0,88**	-0,55					
	<0,001	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*					
est-N	**0,72**	**0,77**	0,46	0,48	**-0,79**	**0,89**	0,49	**0,89**	-0,63	**0,98**				
	<0,001	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*				
COP	**0,81**	**0,73**	0,67	0,65	**-0,73**	**0,73**	0,50	**0,71**	-0,64	0,56	0,60			
	<0,001	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*			
COM	0,53	0,64	0,26	0,21	-0,66	**0,80**	0,25	**0,83**	-0,45	**0,83**	**0,80**	0,28		
	<0,001	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*		
MOL	**0,83**	**0,74**	0,69	0,61	**-0,77**	**0,75**	0,52	**0,74**	-0,58	0,572	0,594	**0,75**	0,41	
	<0,001	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	
Ds	-0,49	-0,55	-0,31	-0,28	0,56	-0,52	-0,25	-0,51	0,47	-0,22	-0,26	-0,45	-0,26	-0,43
	<0,001	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*	*<0,001*

§ TB: soma das bases; CTC: capacidade de troca de cátions (pH=7); SB: saturação por bases; P: fósforo disponível (Mehlich-1); ^{15}N: abundância natural de δ ^{15}N; N: nitrogênio total; ^{13}C: abundância natural de δ ^{13}C; C: carbono total; CN: relação carbono-nitrogênio; est-C: estoques de carbono total; est-N: estoques de nitrogênio total; COP: carbono orgânico particulado; COM: carbono orgânico associado aos minerais; MOL: matéria orgânica leve em água; Ds: densidade do solo. Em negrito estão selecionados os coeficientes (r) acima de 0,7. Utilizados os resultados de todas épocas avaliadas nos tratamentos som sistemas de cultivo agrícola (n=216). *probabilidade de erro.

3 DINÂMICA DA UMIDADE DO SOLO E DO CRESCIMENTO E DECOMPOSIÇÃO DAS RAÍZES FINAS EM SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA

Resumo

A qualidade dos solos em sistemas integrados de produção depende da dinâmica de crescimento, decomposição e interações radiculares das espécies vegetais ao longo dos ciclos de cultivo. Esse estudo investigou os efeitos da intensificação de sistemas integrados de produção agropecuária (SIPAs) na dinâmica do crescimento e da decomposição radicular de espécies vegetais durante os períodos de lavoura e de pastejo. Dois SIPAs foram avaliados: integração-lavoura-pecuária (ILP) e integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF). Uma área de pastagem extensiva (não degradada) foi utilizada de referência. Duas épocas de avaliação foram consideradas: período lavoura (verão de 2014/15) e período pastagem (inverno de 2015 e verão e inverno de 2015/16). O crescimento e decomposição dos sistemas radiculares das espécies vegetais, a densidade do solo e o fluxo de água no perfil do solo (0-0,7 m) foram avaliados durante os períodos de lavoura e de pastagem. Adicionalmente, na ILPF também foram avaliados estes parâmetros de plantas e solos em três distâncias das linhas de cultivo do eucalipto (1,9; 4,5 e 7,3 m). A densidade do solo foi aumentada na camada de 0-0,05 m quando os sistemas ILP e ILPF estiveram sob pastejo. O eucalipto, entre três e cinco anos de idade, reduziu a umidade do solo no sistema ILPF. Quando comparados a área de referência a ILP e a ILPF produziram, e também decomporam, mais raízes no perfil do solo (0-0,70 m). O eucalipto no arranjo estudado limitou a produção radicular das gramíneas em toda a entrelinha no período da lavoura, e somente em locais próximos as árvores (1,9 m) no período de pastejo. A colonização ectomicorrízica foi verificada somente na ILPF, associada às raízes do eucalipto. As taxas de ciclagem das raízes foram incrementadas de acordo com o gradiente de intensificação (pastagem extensiva < ILP < ILPF), com os grupos avaliados (ectomicorrizadas < eucalipto < gramíneas) e com os menores diâmetros (1,0-2,0 mm < 0,5-1,0 mm < 0-0,05 mm). Ao final dos ciclos de cultivo a ILP foi o manejo mais promissor em estocar C no solo via raízes, pois estas se distribuíram melhor no perfil do solo e suas taxas de ciclagem foram intermediárias entre pastagem extensiva e ILPF. Na ILPF, entretanto, a simbiose com ectomicorrizas pode exercer funções importantes para incrementar a ciclagem de nutrientes e água no solo. Diante tal dinâmica, com destaque para a ILP, recomenda-se a implementação de sistemas integrados de produção agropecuária sob área de pastagem extensiva não degradada.

Palavras-chave: agroflorestal, água no solo, integração, intensificação, sistema radicular,

Abstract

Soil quality in integrated farming systems (IS) depends on the dynamics of growth, decomposition and root interactions of plant species throughout crop cycles. This study investigated the effects of the intensification of IS on the root growth and decomposition dynamics of plant species during cropping and grazing periods. Two IS were evaluated: integration-crop-livestock (ICL) and crop-livestock-forest integration (ICLF). An extensive grazing area (not degraded) was used for reference. Two evaluation periods were considered: cropping (summer of 2014/15) and grazing period (winter of 2015 and summer and winter of 2015/16). The growth and decomposition of the root systems of the plant species, soil density and water flow in the soil profile (0-0.7 m) were evaluated during cropping and grazing periods. In addition, in ICLF also these parameters of plants and soils were evaluated at three distances of eucalyptus rows (1.9, 4.5 and 7.3 m). Soil bulk density was increased in the 0-0.05 m layer when the ICL and ICLF systems were under grazing. Eucalyptus, between three and five years of age, reduced soil moisture in the ICLF system. When compared to the reference area ICL and ICLF systems produced, and also decomposed, more root lengh in the soil profile (0-0.70 m). The eucalyptus in the studied arrangement limited the root production of grasses in all distances between its rows during the cropping season, and only in places close to the trees (1.9 m) in the grazing period. The ectomycorrhizal colonization was verified only in the ICLF system, associated to the eucalyptus roots. Root turnover was increased according to the intensification gradient (extensive grazing < ICL < ICLF), with the evaluated species groups (mycorrhizal colonizations < eucalyptus < grasses) and with the decreasing diameter (1.0-2.0 mm < 0.5-1.0 mm <0-0.05 mm). At the end of the crop cycles ICL was the most promising management to store C in the soil via plant roots, as they were better distributed in the soil profile and their turnover were intermediate between extensive grazing and ICLF. In ICLF system, however, symbiosis with ectomycorrhizas can perform important functions for increasing the cycling of nutrients and water in the soil. Given these dynamics, with emphasis on the ICL system, it is recommended the implementation of integrated farming systems were extensive non-degraded pasture was cultivated.

Keywords: agroforestry, integration, intensification, root system, soil water

3.1 Introdução

Globalmente, sistemas integrados de produção agropecuária têm sido apontados como estratégias sustentáveis para incrementar a produção por área cultivada (POFFENBARGER et al., 2017) e diversificar a produção (ALVES; MADARI; BODDEY, 2017). Estes sistemas contemplam múltiplas variações de diversificação e níveis de intensificação dependendo das condições edafoclimáticas e socioeconômicas de cada região [e.g., América do Sul (MORAES et al., 2014) e do Norte (RUSSELLE; ENTZ; FRANZLUEBBERS, 2007), Europa (PEYRAUD; TABOADA; DELABY, 2014), Oriente Médio (VAN DUIVENBOODEN et al., 2000), África (BAUDRON et al., 2014) e Oceania (BELL; MOORE, 2012)].

Quando bem manejados, sistemas integrados promovem melhorias das condições químicas (CARVALHO et al., 2010B), físicas (AULER et al., 2017) e biológicas (SOUZA et al., 2010) dos solos. Assim, a intensificação dos sistemas tem promovido alterações principalmente na incorporação de carbono (CONCEIÇÃO et al., 2017), ciclagem dos nutrientes (CARVALHO et al., 2010b) e nas melhorias da estruturação dos solos (SALTON et al., 2014). Tais alterações influenciam na dinâmica da água (MARTINS et al., 2016), na temperatura (BONETTI; ANGHINONI; ZULPO, 2017), na resistência à penetração (CONTE et al., 2008) e na aeração dos solos (BETIOLI JUNIOR et al., 2014), afetando diretamente o crescimento do sistema radicular das culturas (CARDINAEL et al., 2015), e por consequência, resultando em alterações no crescimento parte aérea (BONETTI et al., 2015) e produtividade das culturas (BELL et al., 2011).

A distribuição e a profundidade de crescimento do sistema radicular dependem da espécie (BODNER et al., 2013) e da sua interação com as condições físicas, químicas e biológicas do solo (GREGORY et al., 2013). Sistemas de cultivo com diversificação de espécies com diferentes sistemas radiculares destacam-se como estratégia de manejo eficiente para melhoria da qualidade física dos solos em sistema plantio direto (MORAES et al., 2016). A intensificação da produção agropecuária, com inserção de novas espécies vegetais (LEMAIRE et al., 2014), promove alterações na estrutura dos solos (MUNKHOLM; HECK; DEEN, 2013), entretanto, a competição entre espécies em cultivos consorciados pode reduzir o desempenho das culturas em relação ao cultivo isolado (PARIZ et al., 2011). Assim, poderá haver alterações na distribuição radicular no perfil do solo, sendo que principalmente as árvores podem favorecer o crescimento de raízes em camadas mais profundas pouco exploradas pelas culturas anuais (CARDINAEL et al., 2015).

A eficiência de absorção de água e nutrientes pelas raízes das plantas (HIRTE et al., 2018) depende principalmente da disponibilidade hídrica do solo, do diâmetro e da distribuição do sistema radicular (DE JONG VAN LIER et al., 2008). Além disso, a absorção de água e nutrientes pode ser alterada no perfil do solo devido a sinais hormonais ou hídricos das plantas (HUBER et al., 2014). Neste sentido, em sistemas com consórcio de culturas a distribuição radicular no perfil do solo associada com a variação de tipos de raízes poderá favorecer a absorção de água e nutrientes por algumas plantas (CARDINAEL et al., 2015), resultando em alterações na produtividade de raízes e de grãos/biomassa/madeira nos sistemas integrados de produção agropecuária. Assim, as estratégias para incremento de produtividade nos sistemas produtivos e florestais têm sido relacionadas com a associação simbiótica com bactérias promotoras de crescimento (HUNGRIA; NOGUEIRA; ARAUJO, 2016), com a melhoria da distribuição das raízes no perfil do solo (BENJAMIN; NIELSEN, 2006) e com o incremento do crescimento radicular em camadas profundas (LACLAU et al., 2013).

A caracterização e quantificação da distribuição e decomposição do sistema radicular das culturas em sistemas integrados de produção devido às alterações das limitações físicas do solo associada com o fluxo de água no perfil do solo poderá favorecer o entendimento dos processos relacionados com os sistemas de produção. Além disso, o entendimento da dinâmica da ciclagem das raízes nos agroecossistemas melhora a compreensão das alterações do uso da terra e suas relações com a ciclagem dos nutrientes e manutenção da biodiversidade do solo (CAMPOS; CRUZ; ROCHA, 2017) e do carbono no solo (RASSE; RUMPEL; DIGNAC, 2005; HIRTE et al., 2018). Adicionalmente, a dinâmica temporal do crescimento radicular e fluxos de água podem ser complementares e/ou essenciais para selecionar sistemas agrícolas mais produtivos e de maior sustentabilidade em longo prazo.

Diante do exposto, a hipótese deste estudo é de que o consórcio de culturas em sistemas integrados de produção agropecuária incrementa a produção de biomassa total de raízes e melhoram a distribuição destas raízes no perfil do solo. O objetivo deste estudo foi avaliar a dinâmica do crescimento e decomposição radicular de espécies vegetais durante o ciclo de cultivo de milho e período de pastejo em sistemas integrados de produção agropecuária em um Latossolo no Sudeste do Brasil.

3.2 Material e Métodos

3.2.1. Caracterização e histórico das áreas de estudo

A caracterização e histórico das áreas de estudo estão apresentadas no item 2.2.1 do Capítulo I.

3.2.2 Delineamento experimental e manejo das áreas

O delineamento experimental e manejo das áreas estão apresentadas no item 2.2.1 do Capítulo I.

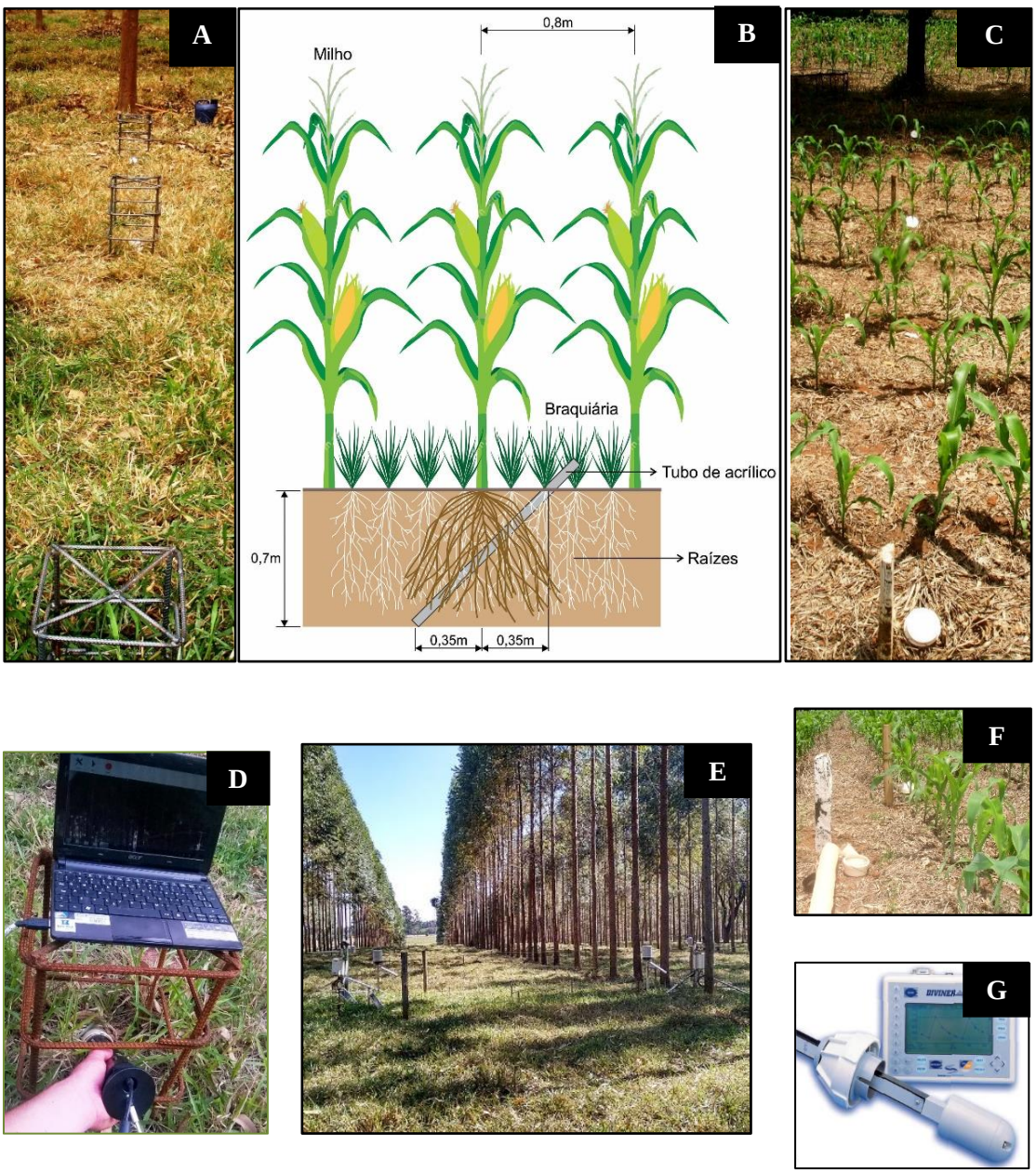
3.2.3 Instalação do experimento e épocas das amostragens

O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico, com textura franco arenosa e ausência de pedras ou materiais primários, possibilitando a instalação dos tubos de acrílico para o acesso do minirhizotron. Tais tubos foram instalados em junho de 2014, 5 meses antes da semeadura das culturas de verão, para reduzir os distúrbios do solo no período das avaliações. Orifícios com diâmetro de 63 mm e 1,2 m de profundidade com ângulo de 45º (Figura 3.1 B) foram abertos no solo com uso de trado, e após a extremidade exposta do tubo foi protegida com uma tampa PVC, para evitar a entrada de luz, água e folhas, e por grades metálicas, para evitar avarias pelo pisoteio animal (Figura 3.1 A, D). O posicionamento dos tubos de acrílico, inseridos nos orifícios, é indicado por abranger o crescimento radicular na linha e entrelinhas, representando todo o sistema radicular das espécies vegetais cultivadas (REWALD; EPHRATH, 2013).

3.2.4 Determinação do conteúdo de água do solo

O conteúdo de água do solo foi determinado a cada dois dias durante o ciclo das culturas de lavoura de 2014/15 (dezembro a março) e de pastagem (2015/16). Os tubos para acesso da sonda de capacitância (Sentek®, modelo Diviner 2000) (Figura 3.1 F, G) foram instalados em dezembro de 2014 nos tratamentos ILP (n=5) e ILPF (n=15). Entretanto, devido a problemas técnicos, os tubos somente foram instalados em fevereiro de 2015 na área com pastagem extensiva (n=5). Um tubo para acesso da sonda Diviner 2000 foi instalado próximo a cada tubo para acesso dos minirhizotrons (Figura 3.1 F). As leituras, a cada 0,10 m até 1,5 m de profundidade, com a sonda foram obtidas em volts e convertidas em permissividade dielétrica com posterior determinação do conteúdo de água do solo. As equações de conteúdo de água e permissividade dielétrica foram calibradas para o solo deste experimento.

Figura 3.1 - Disposição dos tubos dos minirhizotrons no solo e na área de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF)



A) Tubos de acrílico para acesso do minirhizotron no cultivo da pastagem. B) Esquema da instalação na entrelinha do milho. C) Tubos de acrílico para acesso do minirhizotron no cultivo do milho. D) Proteções dos tubos e inserção do escâner para a produção de imagens. E) estações meteorológicas. F) Tubos de acesso para sonda Divinner 2000 próximos aos tubos de acrílico dos minirhizotrons. G) Sonda de capacitância da marca Sentek®, modelo Diviner 2000. Fonte: Fotos de Wanderlei Bieluczyk

3.2.5 Avaliação do crescimento radicular no período de verão 2014/15 (lavoura)

No período de novembro de 2014 a março de 2015, foram avaliadas as culturas de braquiária (pastagem extensiva), milho+braquiária (ILP) e milho+braquiária+eucalipto (ILPF). As imagens do sistema radicular das culturas foram coletadas em intervalos de 14 dias, sendo que o monitoramento da produção de raízes finas foi realizado com o auxílio de um escâner rotativo, modelo CI-600 Root Growth Monitoring System (CID Inc., WA, EUA).

O escâner foi introduzido dentro dos tubos de acrílico e foram produzidas imagens do sistema radicular nas profundidades de 0-0,2, 0,2-0,4, 0,4-0,6, 0,6-0,8 e 0,8-1,0 m. Considerando o ângulo de 45º de inserção dos tubos, as profundidades verticais correspondem às camadas de 0-0,14; 0,15-0,28; 0,29-0,42; 0,43-0,56 e 0,57-0,70 m, respectivamente. Assim, no total do período de lavoura, foram obtidas 1625 imagens.

3.2.6 Avaliação do crescimento radicular sob pastejo 2015/16 (pastagem)

No período pós-lavoura, o crescimento do sistema radicular dos cultivos de braquiária (PE e ILP) e braquiária + eucalipto (ILPF) foi avaliado durante o crescimento e a formação da pastagem (abril e maio de 2015), e no período de pastejo (junho de 2015 a agosto de 2016). Durante o período de cultivo da pastagem as imagens do sistema radicular foram produzidas a cada 30 dias, considerando as mesmas camadas já apresentadas para o verão de 2014/15. Durante o período de pastagem foram obtidas 2375 imagens radiculares.

3.2.7 Processamento das imagens radiculares

Em ambos os períodos de avaliações (cultivo de verão e de pastagem), as imagens da interface tubo-solo em 360º na escala de 300 dpi de resolução foram analisadas separadamente por meio do programa WinRHIZO Tron MF 2013c (Régent–Canadá). No total, foram produzidas quatro mil imagens radiculares, sendo o comprimento e diâmetro individual das raízes traçados manualmente para cada imagem (Figura S3).

Dispondo de imagens temporalmente sequenciais, para identificar as mudanças no comprimento e características das raízes, as novas imagens temporais foram sobrepostas sobre as imagens da sessão prévia de avaliação. Isso permitiu identificar se as raízes cresceram, ou desapareceram pela decomposição ao longo do tempo. As raízes foram consideradas decompostas quando desapareceram totalmente entre duas datas de amostragem.

As raízes também foram separadas em grupos (Figura S3 A, B, C): (i) raízes do grupo das gramíneas (braquiária+milho); (ii) raízes de eucalipto; (iii) raízes associadas às ectomicorrizas. A diferenciação dos tipos de raízes foi realizada por meio de análises morfológicas de coloração, taxa e forma de crescimento e diâmetro radicular. A colonização ectomicorrízica (Figura S4 A, B, C, D) foi considerada positiva quando estruturas dicotômicas e/ou manto fúngico estiveram presentes (LAMBAIS et al., 2017), e tais estruturas quantificadas separadamente. Somente as raízes finas (diâmetro ≤ 2 mm) foram consideradas para as avaliações, e seccionadas em três classes de diâmetro (<0,5 mm, 0,5-1,0 mm e 1-2 mm).

3.2.8 Cálculos da produção, decomposição e da taxa de ciclagem das raízes

A produção de raízes finas (PRF) entre duas sessões temporais de escaneamento no t_{-1} e t ($PRF_{t-1,\ t}$, cm m^{-2}) foi calculada adicionando o incremento no comprimento de cada raiz entre o t_{-1} e t, dividido pela área de solo observada em cada imagem. Similarmente a decomposição de raízes finas ($DRF_{t-1,\ t}$, cm m^{-2}) considerou os incrementos temporais (t_{-1} e t) em comprimento de raízes desaparecidas, divididos pela área observada nas imagens. A produção diária de raízes finas ($PDRF_{t-1,\ t}$, cm m^{-2}) e a decomposição diária de raízes finas ($DDRF_{t-1,\ t}$, cm m^{-2}) foram obtidas dividindo $PRF_{t-1,\ t}$, cm m^{-2} e $DRF_{t-1,\ t}$, cm m^{-2} pelo número de dias entre dois escaneamentos sucessivos de imagens (t_i-t_{i-1}, que foi aproximadamente de 14 e 30 dias no período de cultivo do milho e pastagem nos sistemas integrados, respectivamente). O comprimento total acumulado de raízes produzidas (CTAP m m^{-2}) e o comprimento total acumulado de raízes decompostas (CTAD m m^{-2}) foram calculados pela soma da PRF e DRF, respectivamente, com área de solo convertida para metros quadrados, ao longo de todo o período da lavoura, e período da pastagem.

A taxa de ciclagem individual das raízes foi calculada a partir da diferença de dias entre o primeiro dia de aparecimento da raiz e a data de seu desaparecimento. Para esta análise todas as raízes foram consideradas individualmente, e tiveram o mesmo peso nos cálculos. Dessa forma foi calculado o tempo de residência (TR) das raízes, expresso em dias, que consistiu na mediana do tempo entre o aparecimento e desaparecimento das raízes. Posteriormente foi calculada a taxa anual de ciclagem (TC) que foi obtida dividindo o número de dias em um ano (365 dias) pelo tempo de residência das raízes. Tais análises da ciclagem foram realizadas somente nas raízes declaradas desaparecidas no tempo decorrido do experimento.

Nesse trabalho não foi avaliada a marcha de decomposição radicular no período da lavoura. Ao longo desse ciclo entre 10 a 30 % das raízes produzidas foram cobertas por movimentação de terra e desaparecido das imagens, fato este comum em análises com minirhizoton em cultivos agrícolas. Tais raízes foram identificadas no programa como "*raiz coberta por terra*", seu comprimento contabilizado e desprezado nas avaliações de turnover das raízes.

3.2.9 Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos diários de radiação fotossintética ativa, precipitação pluviométrica e dados de temperatura do solo foram obtidos da Estação Meteorológica da Embrapa Pecuária Sudeste na área experimental, durante os períodos de lavoura e pastagem. Os pesquisadores da instituição estão empregando os dados em estudos do microclima gerado pelos sistemas integrados de produção. Tais avaliações são parte de um projeto de âmbito maior intitulado "Dinâmica de gases de efeito estufa em sistemas de produção da agropecuária brasileira – Rede PECUS". Portanto, neste estudo os parâmetros meteorológicos diários foram utilizados, oportunamente, no apoio da discussão dos resultados verificados para a dinâmica radicular avaliada nos sistemas.

3.2.10. Análise dos dados

O efeito dos sistemas de cultivo (pastagem extensiva [n=5], ILP [n=5] e ILPF [n=15] e das distâncias às linhas do eucalipto na ILPF (1,9 m [n=5], 4,3 m [n=5] e 7,5 m [n=5]) foram analisados para os atributos avaliados. A análise de variância (ANOVA) foi empregada utilizando o procedimento PROC GLM para testar a influência dos sistemas de cultivo no comprimento total das raízes acumuladas e decompostas na lavoura e na pastagem. Quando significativo, as médias foram comparados entre si pelo teste de Tukey ($p<0.05$). Foram avaliados os efeitos dos sistemas (PE, ILP e ILPF), das distâncias às linhas do eucalipto (1,9, 4,3 e 7,5 m), dos grupos de espécies (gramíneas, eucalipto e raízes ectomicorrizadas) e dos calibres de diâmetro (<0,5 mm, 0,5-1,0 mm e 1-2 mm) foram avaliados sobre o tempo de residência e taxa de ciclagem pelo teste de Tukey-Kramer ($p<0,05$). Os dados desbalanceados com diversos números de repetições, pois cada raiz decomposta teve o mesmo peso nos cálculos e consistiu em n=1.

Para avaliar a dinâmica temporal dos resultados foram utilizadas duas estratégias de análises: (i) análise multivariada de perfil utilizando o teste de Pillai's Trace, seccionando o período do cultivo do milho+braquiária de acordo com a idade do milho (0-30, 31-65 e 66-128 dias) e também o período de pastejo em épocas sazonais (período seco de 2015, período chuvoso 2015/2016 e período seco de 2016). Esse teste comparou entre si os sistemas de cultivo e as distâncias na ILPF para o CTAP e CTAD de raízes, o CTAP de raízes de gramíneas, de eucalipto e de raízes associadas a ectomicorrizas, a PDRF e a DDRF; e, (ii) agrupamentos de Tukey-Kramer dos dados temporais de PDRF e de DDRF sob período de pastagem.

A distribuição dos conteúdos de água e do CTAP e CTAD das raízes finas ao longo do perfil do solo e do cultivo do milho e do pastejo nos diferentes sistemas e distâncias na ILPF foi apresentada por meio de gráficos de contorno. Os dados de conteúdo de água do solo e crescimento radicular obtidos nas diferentes camadas do solo ao longo do tempo foram interpolados por krigagem (OLIVER; WEBSTER, 1990), objetivando facilitar a visualização e a interpretação da dinâmica dos atributos em profundidade e ao longo do tempo. As análises dos resultados foram realizadas com auxílio dos programas estatísticos Statistical Analysis System – SAS v. 9.4 (SAS Inc., Cary, USA), Surfer v.10 (10.0® (Golden Software Inc.) e Minitab v. 18 (Minitab Inc., State College, PA, USA).

3.3 Resultados

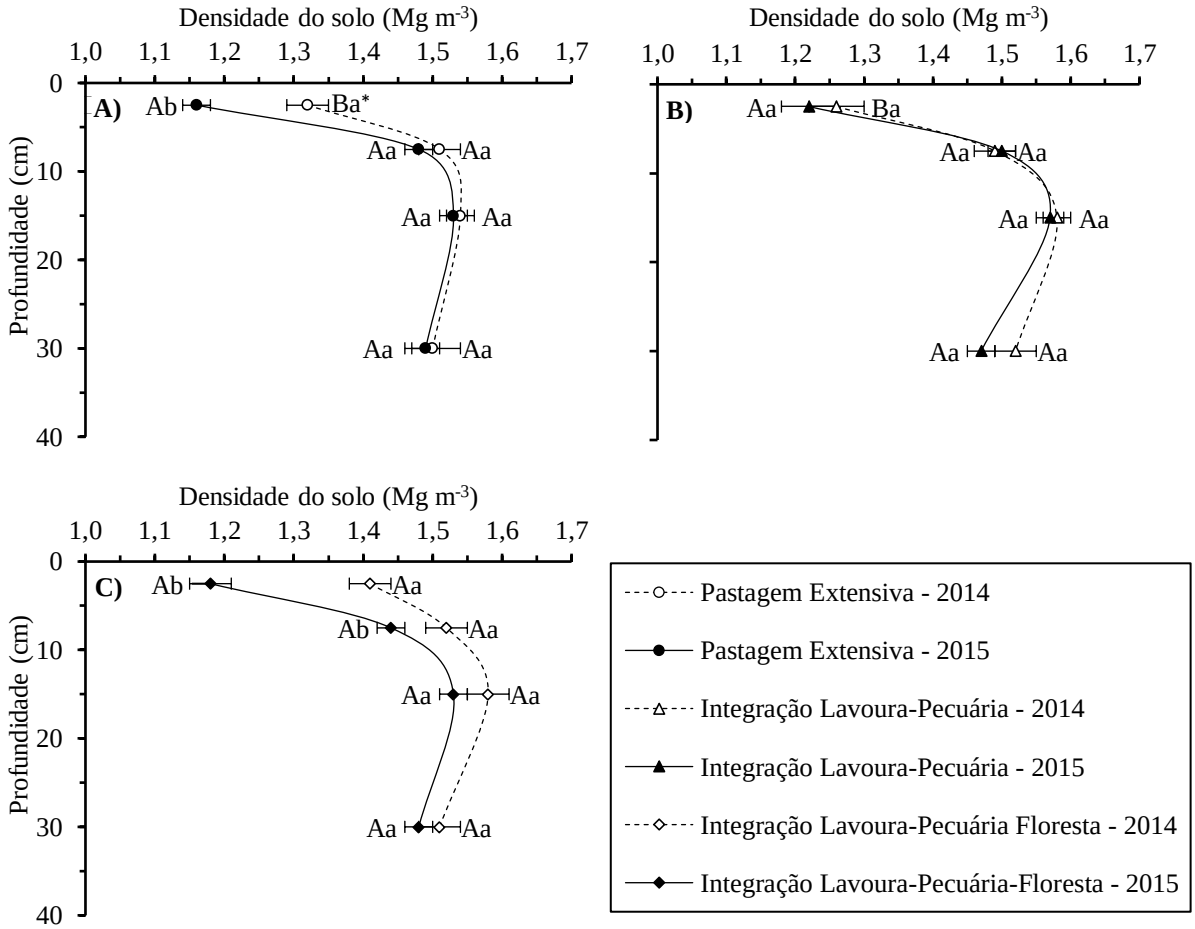
3.3.1 Período de lavoura

3.3.1.1 Densidade do solo

A densidade do solo na camada de 0-5 cm, no período após pastagem e anterior à semeadura do milho (novembro de 2014) da ILPF (1,41 Mg m^{-3}) foi maior quando comparada à ILP (1,26 Mg m^{-3}) e a pastagem extensiva (1,32 Mg m^{-3}) (Figura 3.2 A, B, C). Na área com ILPF houve redução dos valores de densidade do solo nas camadas de 0-5 e 5-10 cm durante o período de lavoura, já na área com ILP não houve alterações destes valores após o cultivo de milho. Os valores de densidade do solo após o período de lavoura foram iguais em todos os sistemas (Figura 3.2 A, B, C). A área de pastagem extensiva (Figura 3.2 A) apresentou efeito de resiliência, considerando que esta não é utilizada para agricultura, com a redução da densidade do solo na camada de 0-0,05 m no período chuvoso.

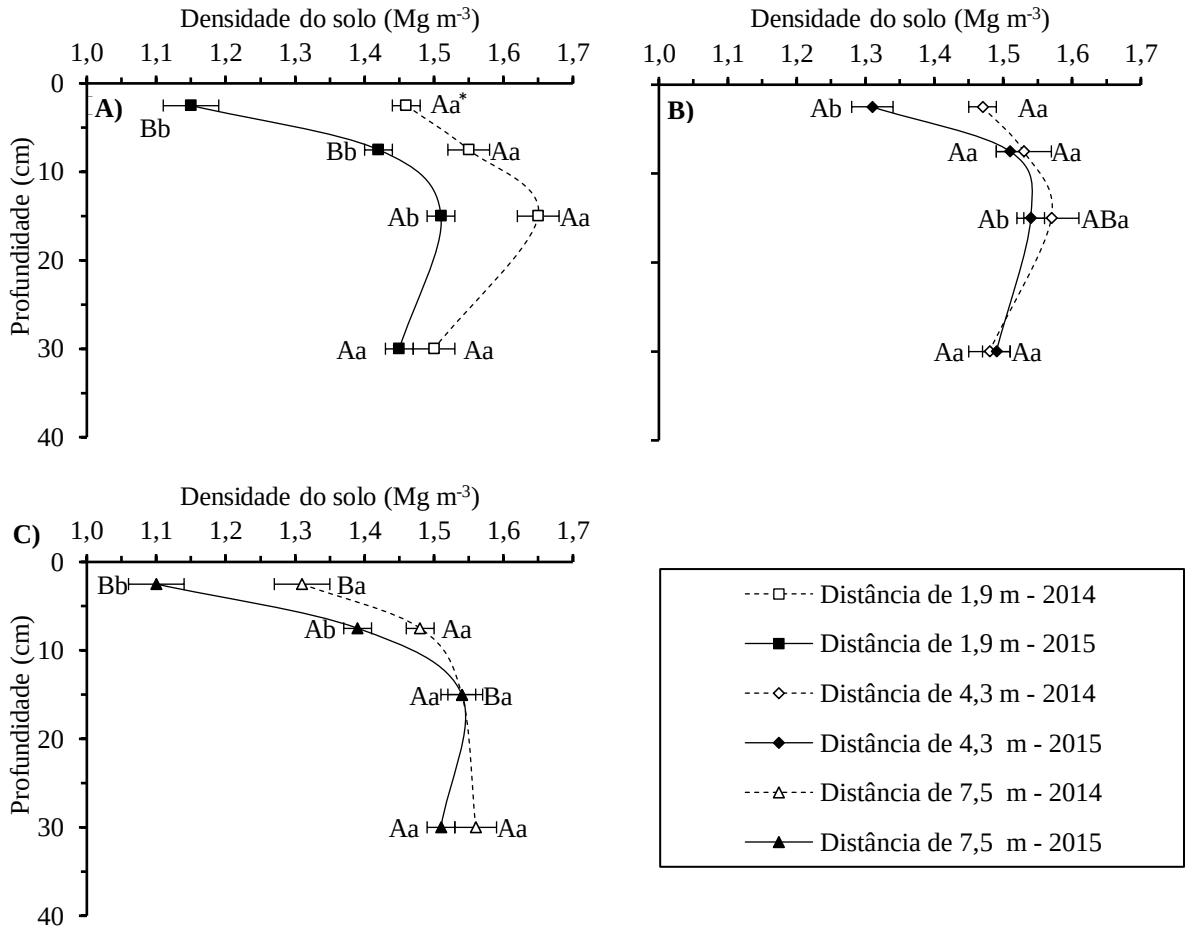
De forma geral a densidade do solo aumentou em profundidade, principalmente de 0-0,05 m para 0,05-0,10 m, com tendências de decréscimos nos seus valores a partir de 0,20 m de profundidade. Na ILPF a densidade do solo foi maior principalmente em locais mais próximos das árvores (1,9 m às linhas do eucalipto) antes da semeadura do milho, entretanto o período de cultivo da lavoura favoreceu a redução desta variável nesse sistema (Figura 3.3 A, B, C). Assim, foram verificadas reduções significativas da densidade do solo na camada de 0-0,05 m em todas as distâncias avaliadas, na camada de 0,05-0,10 m (1,9 e 7,5 m), na camada de 0,10-0,20 m (1,9 e 4,3 m) e na camada de 0,20-0,40 m na distância de 7,5 m.

Figura 3.2 - Densidade do solo em área de pastagem com manejo extensivo (A), integração lavoura-pecuária (B) e integração lavoura-pecuária-floresta (C) antes (ano de 2014, linhas tracejadas) e depois (ano de 2015, linhas sólidas) do cultivo da cultura do milho+braquiária nos dois sistemas integrados de produção agropecuária



*Letras maiúsculas comparam tratamentos (pastagem extensiva, integração lavoura-pecuária e integração lavoura-pecuária-floresta) e letras minúsculas comparam épocas (antes e após cultivo do milho nos sistemas integrados) pelo teste de Tukey ($p<0.05$).

Figura 3.3 - Densidade do solo em área de integração lavoura-pecuária-floresta à 1,9 m (A), 4,3 m (B) e 7,5 m (C) das linhas do eucalipto antes (ano de 2014, linhas tracejadas) e depois (ano de 2015, linhas sólidas) do cultivo da cultura do milho+braquiária



*Letras maiúsculas comparam tratamentos (pastagem extensiva, integração lavoura-pecuária e integração lavoura-pecuária-floresta) e letras minúsculas comparam épocas (antes e após cultivo do milho nos sistemas integrados) pelo teste de Tukey ($p<0.05$).

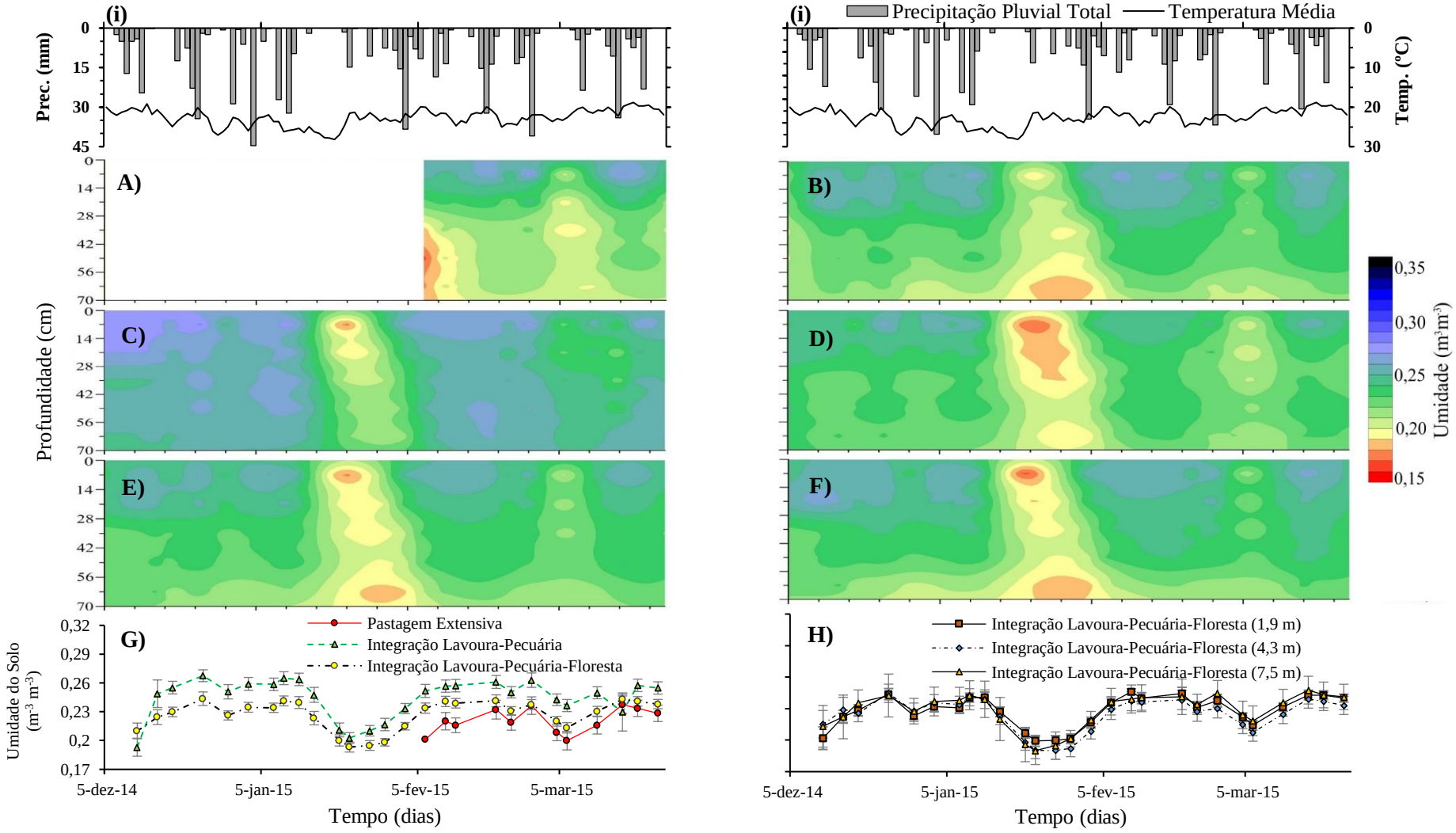
3.3.1.2 Umidade do solo

As avaliações da umidade do solo iniciaram em 05/12/2014 na ILP e ILPF e em 06/02/2015 na área de pastagem extensiva (Figura 3.4). A umidade volumétrica do solo foi maior na camada de 0-0,28 m quando comparada ao restante do perfil, sendo esse padrão mais expressivo na área de pastagem extensiva e na distância de 1,9 m às linhas do eucalipto na ILPF (Figura 3.4 A, B). Na área de ILP foi observada uma melhor distribuição do conteúdo de água ao longo do perfil do solo, com maior homogeneidade entre as camadas avaliadas (Figura 3.4 C).

Devido ao período com menores índices de precipitação entre 12 e 30/01/2015 (Figura 3.4i) a umidade volumétrica foi reduzida em todos os solos dos sistemas avaliados chegando a atingir valores inferiores a 0,18 m^3 m^{-3}. Nesse mesmo período, em locais mais próximos ao eucalipto (1,9 m) a amplitude de variação da umidade do solo foi menor, principalmente nas camadas superficiais do solo (0-0,14 m e 0,15-0,28 m).

De forma geral, em camadas mais profundas da ILPF (0,29-0,42 m, 0,43-0,56 m e 0,57-70 m) os conteúdos de água no solo foram menores se comparados à ILP ao longo do tempo (Figura 3.4 C, E). Mesmo com elevados índices de precipitação pluvial, bem distribuídos ao longo do mês de fevereiro na ILPF os valores de umidade volumétrica foram menores a 0,24 m^3 m^{-3} em camadas mais profundas a 0,28 m na ILPF, enquanto foram sempre maiores a 0,25 m^3 m^{-3} na ILP. Em um padrão diferenciado à ILP, as três distâncias avaliadas na ILPF apresentaram decréscimos na umidade volumétrica do solo em profundidade ao longo do tempo (Figura 3.4 B, D, F), o que resultou em valores médios de água menores no perfil do solo (0-0,7 m) desse sistema avaliado (Figura 3.4 G).

Figura 3.4 - Umidade volumétrica do solo (m^3 m^{-3}) no período de lavoura em profundidades (0-0,70 m) nos sistemas com pastagem de manejo extensivo (A; n=5), com integração lavoura-pecuária (C; n=5) e integração lavoura-pecuária-floresta (E; n=15), e à 1,9 m (B; n=5), 4,3 m (D; n=5) e 7,5 m (E; n=5) de distância às linhas dos eucaliptos no sistema de integração lavoura-pecuária-floresta. Os valores médios da umidade do solo (± erro padrão) sob sistemas de manejo (G) e sob diversas distâncias (1,9, 4,3 e 7,5 m) da linha do eucalipto em integração-lavoura-pecuária-floresta (H)



Na camada de solo total avaliada (0-0,70 m) a umidade foi sempre menor ao longo do tempo na área de ILPF quando comparada com a ILP (Figura 3.4 G), contendo em média 8 % menos do conteúdo de água no solo. No período de 12 a 30 de janeiro de 2015 houve um período com baixa disponibilidade pluviométrica (37 mm) (Figura 3.4i), o qual coincidiu com o período de maior demanda hídrica das culturas, favorecendo reduções nos conteúdos de água do solo, principalmente entre 20 de janeiro e 02 de fevereiro (Figura 3.4 G). Nesse período o conteúdo de água na ILP foi de 0,20 a 0,23 m^3 m^{-3}, enquanto os valores de umidade do solo na ILPF foram de 0,22 a 0,19 m^3 m^{-3}. De forma geral, a área de pastagem apresentou valores similares de umidade do solo quando comparada a área de ILPF. As diferentes distâncias na ILPF não mostraram diferenças para esse parâmetro ao longo do tempo, exceto no final do ciclo do milho quando o centro da entrelinha apresentou maiores conteúdo de água do solo quando comparado aos pontos mais próximos das linhas das árvores (Figura 3.4 H e Tabela 3.1).

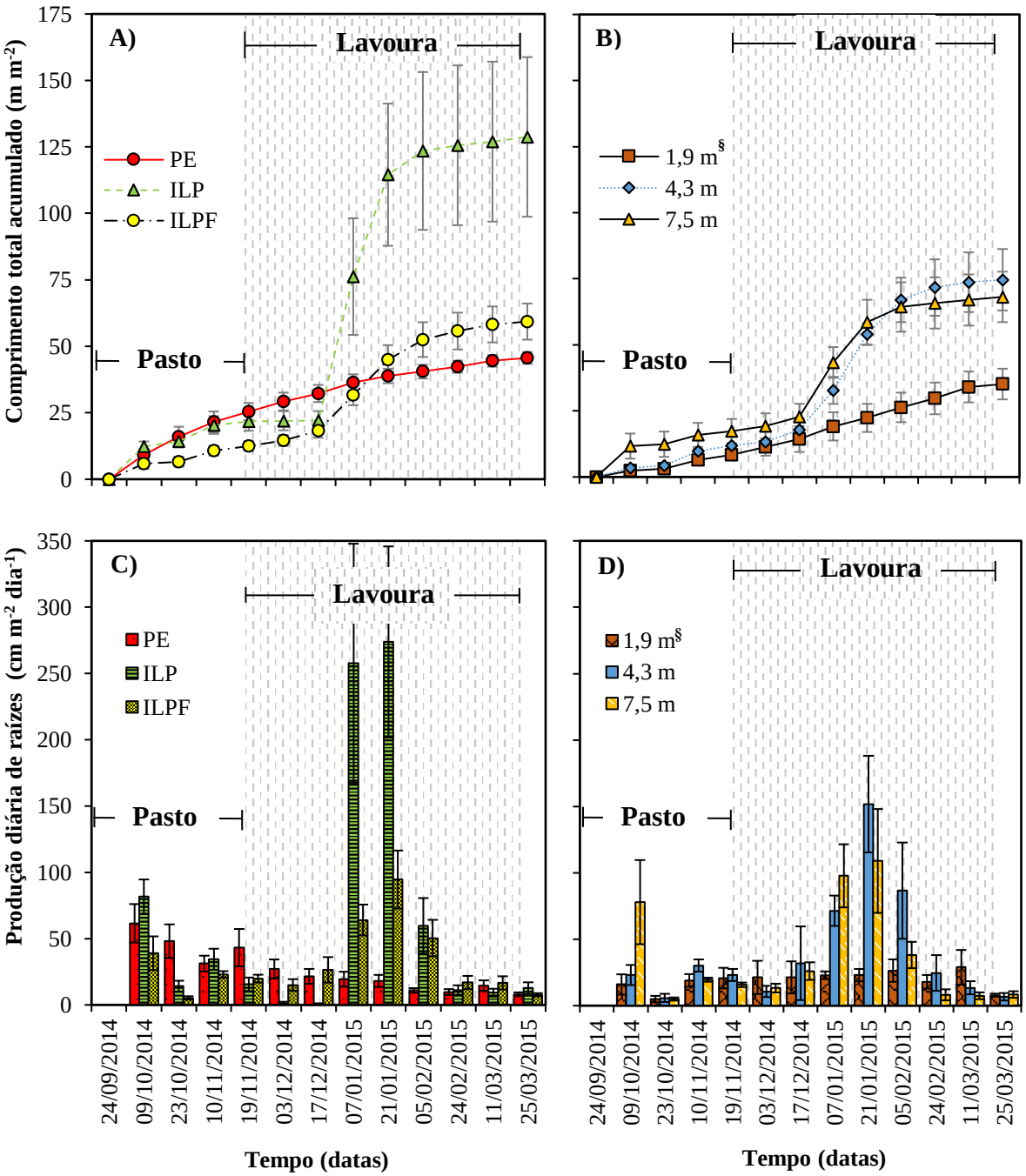
3.3.1.3 Crescimento diário e acúmulo de raízes finas

Os sistemas de uso do solo interferiram no acúmulo total e na dinâmica de crescimento de raízes (Figura 3.5) para o período que compreendeu o cultivo de milho+braquiária nos sistemas de ILP e ILPF. Em período anterior à semeadura do milho (17/11/2014), a área de pastagem extensiva apresentou 21,6 m m^{-2} de comprimento total acumulado produzido (CTAP) de raízes finas, seguida pela ILP com 20,4 m m^{-2}, e a ILPF com 10,7 m m^{-2}. Até o estádio fenológico V7 do milho nos sistemas integrados (0-30 dias) a produção diária de raízes finas (PDRF) variou de 21,5 a 43,1 cm m^{-2} dia^{-1} na pastagem extensiva, 0,8 a 15,5 cm m^{-2} dia^{-1} na ILP e 15,5 a 26,4 cm m^{-2} dia^{-1} na ILPF (Figura 3.5 C). É importante destacar que para a semeadura do milho a braquiária foi dessecada, e que na ILPF continuou havendo o desenvolvimento de raízes do eucalipto pós dessecação da pastagem.

Nos primeiros 30 dias da lavoura do milho a pastagem extensiva apresentou maior crescimento radicular (Figura 3.5A, C) diferenciando-se significativamente dos sistemas integrados de produção (Tabela 3.1). Nesse mesmo período, no ILPF, ocorreram as menores taxas de crescimento radicular das gramíneas (p=0,0372) na distância de 1,9 m em relação 7,5 m de distância das linhas de cultivo do eucalipto (Tabela 3.1).

O período de 31 a 65 dias de idade do milho, que conteve aos estádios fenológicos com maiores taxas de crescimento da parte aérea dessa cultura (V7 ao pendoamento) se caracterizou pelo incremento da produção diária de raízes finas na ILP e na ILPF (Figura 3.5 C). Nesse período a ILP apresentou maior produção diária de raízes finas com média de 202,8 cm m^{-2} dia^{-1}, seguida pelas áreas com uso de ILPF de 68,5 cm m^{-2} dia^{-1} e de pastagem extensiva, com valores de 16,5 cm m^{-2} dia^{-1}. De acordo com esses resultados, nestes estádios vegetativos da cultura do milho, a produtividade de raízes finas foi limitada na ILPF em comparação a ILP (Tabela 3.1), sendo a ILPF restritiva à produtividade das raízes das gramíneas, principalmente na distância mais próxima aos eucaliptos (Figura 3.5 B, D). Nesse período a produção e comprimento total de raízes finas das distâncias mais ao centro da entrelinha (7,5 m e 4,3 m) se assemelharam entre si (Tabela 3.1), entretanto na distância de 1,9 m a ILPF acumulou 12 m m^{-2}, o que correspondeu a apenas a 24 % do acumulado na distância de 7,5 m.

Figura 3.5 - Valores médios (n=5 ± erro padrão) de 0-0,70 m no perfil do solo do comprimento total acumulado de raízes finas (A, B) e da produção diária de raízes finas (C, D) em sistemas com pastagem de manejo extensivo (PE), com integração lavoura-pecuária (ILP), com integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e distâncias na entrelinha do eucalipto na ILPF



§1,9, 4,3 e 7,5 m correspondem as distâncias às linhas de eucalipto na ILPF. O espaço hachurado corresponde ao período de cultivo do milho, plantado em 17/11/2014 e colhido dia 20/03/2015.

Tabela 3.1 - Análise multivariada de perfil contrastando os sistemas de produção agropecuária, e as distâncias na entrelinha do eucalipto em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta, no comprimento total acumulado produzido de raízes finas (CTAP), no CTAP das raízes das gramíneas, do eucalipto e das raízes ectomicorrizadas, na produção diária de raízes finas (PDRF) e na umidade do solo

	Sistemas avaliados			**Entrelinha da ILPF**		
	ILP x PE	**ILPF x PE**	**ILPF x ILP**	**4,3 m x 1,9 m§**	**7,5 m x 1,9 m**	**7,5 m x 4,3 m**
			0-30 dias			
CTAP	**0,0084***	**0,0295**	0,1373	0,3268	0,1323	0,6877
CTAP (gramíneas)	**0,0084**	**0,0009**	**0,0436**	**0,0740**	**0,0372**	0,4553
CTAP (eucalipto)	-	-	-	0,3656	0,2135	0,3238
CTAP (ectomicor.)	-	-	-	0,2744	0,1053	0,8251
PDRF (total)	**0,0367**	0,0922	0,2296	0,1193	0,8044	0,1576
			31-65 dias			
CTAP	**0,0082**	0,1269	**0,0058**	**0,0280**	**0,0217**	0,1068
CTAP (gramíneas)	**0,0082**	**0,0472**	**0,0008**	**0,0042**	**0,0049**	0,4291
CTAP (eucalipto)	-	-	-	0,6709	0,6263	0,1517
CTAP (ectomicor.)	-	-	-	0,1753	0,8618	0,4560
PDRF (total)	**0,0070**	0,3189	**0,0065**	**0,0025**	**0,0043**	0,3632
			66-128 dias			
CTAP	**0,0379**	0,9366	**0,0539**	0,8468	**0,0558**	**0,0401**
CTAP (gramíneas)	**0,0379**	0,9349	**0,0193**	0,7469	**0,0033**	**0,0035**
CTAP (eucalipto)	-	-	-	0,5235	0,3405	0,4223
CTAP (ectomicor.)	-	-	-	0,5745	0,6364	0,4457
PDRF (total)	0,5014	0,7059	0,3043	0,3525	0,4135	0,3394

*Probabilidade estatística da hipótese nula pelo teste multivariado de Pillai's Trace. PE (n=5): pastagem com manejo extensivo. ILP (n=5): integração lavoura-pecuária. ILPF (n=15): integração lavoura-pecuária-floresta.
§1,9 (n=5), 4,3 (n=5) e 7,5 m (n=5) correspondem as distâncias às linhas do eucalipto.

Em período posterior ao pendoamento, enquanto o milho se encontrou em estágios reprodutivos e foi colhido para a ensilagem aos 128 dias de idade, a produtividade de raízes do milho+braquiária foi reduzido em relação às fases anteriores na ILP e na ILPF (Figura 3.5 C, D). A ILP produziu em média nesse período 22,6 cm m^{-2} dia^{-1}, a ILPF 14,1 cm m^{-2} dia^{-1} e a pastagem extensiva 10,7 cm m^{-2} dia^{-1}. O CTAP de raízes (p=0,9366), bem como das gramíneas (p=0,9349) nesse período foi estatisticamente similar entre a área de pastagem extensiva e a ILPF. Para esse período, os maiores acúmulos de raízes ocorreram na ILP quando contrastada com a pastagem extensiva (p=0,0379), e também com a ILPF ($p \leq 0,0539$). A distância de 7,5 m na ILPF acumulou 3,8 m m^{-2} de raízes, e o CTAP foi de 8,8 e 7,6 m m^{-2} nas distâncias de 1,9 e 4,3 m respectivamente.

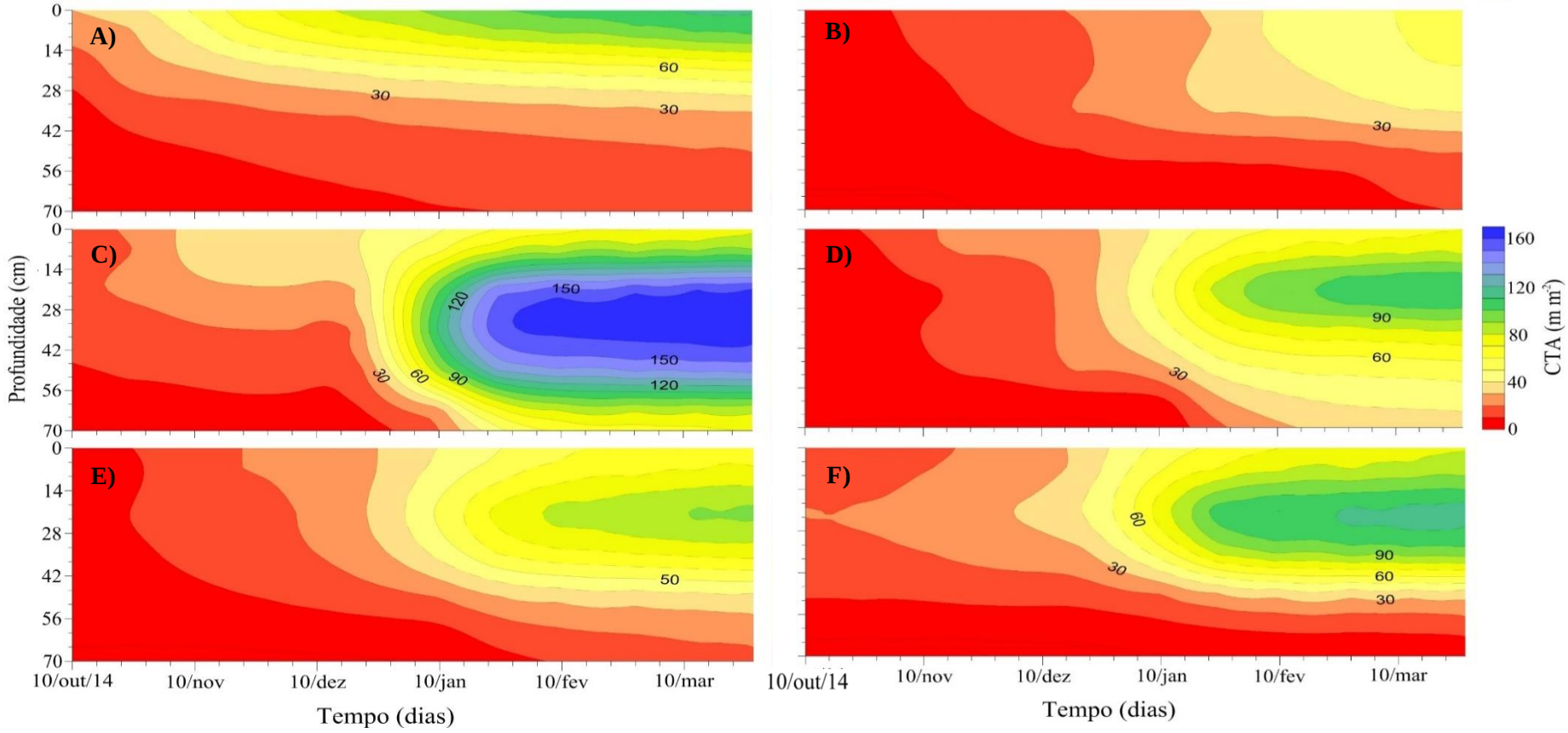
3.3.1.4 Distribuição radicular e conteúdo de água no perfil do solo

No sistema de pastagem extensiva o acúmulo de raízes ocorreu de forma mais homogênea ao longo do tempo, e ficou restrito principalmente às camadas 0-0,14 m e 0,15-0,28 m de profundidade (Figura 3.6 A). Ao final do ciclo, nessas duas camadas o CTAP de raízes variou entre 40 e 110 m m^{-1}, enquanto nas demais o CTAP de raízes foi menor à 30 m m^{-2}. Ao final das avaliações mais de 80 % do comprimento radicular, o que caracteriza a profundidade efetiva, na área de pastagem extensiva esteve concentrado na camada de 0-0,42 m.

Nos sistemas de ILP (Figura 3.6 C) e ILPF (Figura 3.6 E) sob cultivo do milho+braquiária ocorreu identificação de maiores crescimentos diários e acumulados de raízes nas camadas de 0,14-0,28 m e 0,29-0,42 m, devido a presença da cultura do milho. Entretanto, este incremento de raízes observadas somente nestas camadas foi devido ao posicionamento dos tubos de acrílico para acesso do minirhizotron (Figura 3.1 B), os quais estavam inseridos nas entrelinhas e linhas de cultivo com ângulo de 45º. Assim, esta disposição dos tubos contribuiu para incrementos exponenciais da quantidade de raízes ao longo do tempo nas posições centrais da linha de cultivo do milho (posição na camada de 0,29-0,42 m). Os sistemas de ILP e ILPF proporcionaram incrementos na profundidade efetiva do sistema radicular das culturas. A área de ILP apresentou os maiores CTAP de raízes finas e o acúmulo foi maior entre 30 e 65 dias após a semeadura do milho+braquiária, principalmente na camada de 0,28-0,42 m, que foi em torno de 120 m m^{-2} para tal período (Figura 3.6 C). Na ILPF o acúmulo ocorreu preferencialmente nessa mesma camada e período, entretanto foi menor (cerca de 50 m m^{-2}) (Figura 3.6 E).

Dentre as distâncias na ILPF o maior acúmulo do sistema radicular no perfil e crescimento em profundidade ocorreu nas distâncias de 4,3 e 7,5 m às linhas das árvores, apresentando entre 60 e 110 m m^{-2} de CTAP de raízes finas (Figura 3.6 D, F). Na distância de 1,9 m na ILPF (Figura 3.6 B) o acúmulo total não ultrapassou 50 m m^{-2}, ocorrendo incrementos a partir dos 51 dias de idade do milho. Em função desses menores valores e considerando que nesse local o acúmulo ocorreu de forma mais homogênea ao longo do perfil, sugere-se que o crescimento da das raízes do milho foi bastante limitado pelo sombreamento das árvores do eucalipto. A distância de 4,3 m foi a que permitiu melhor desenvolvimento das raízes nas camadas mais profundas a 0,42 m, com acúmulo variando de 40 a 60 m m^{-2}, enquanto de forma geral nas outras duas distâncias a CTAP foi menor a 40 m m^{-2}.

Figura 3.6 - Comprimento total acumulado produzido (CTAP) de raízes finas no período de lavoura em profundidades (0-0,70 m) nos sistemas com pastagem de manejo extensivo (A; n=5), com integração lavoura-pecuária (C; n=5) e integração lavoura-pecuária-floresta (E; n=15), e à 1,9 m (B; n=5), 4,3 m (D; n=5) e 7,5 m (F; n=5) de distância às linhas dos eucaliptos no sistema de integração lavoura-pecuária-floresta



3.3.1.5 Distribuição das raízes em grupos, comprimento total acumulado e decomposto

Na ILPF, ao final do período avaliado 74 % do CTAP foram de raízes de gramíneas, 17 % de eucalipto e 9 % com ectomicorrização (Figura 3.7 A). O crescimento das raízes das gramíneas na distância de 1,9 m foi limitado em todo o ciclo, sendo o CTAP no final do ciclo reduzido 58 e 61 % em relação às distâncias de 4,3 m e 7,5 m, respectivamente. Os erros padrões para o CTAP de raízes de eucalipto (Figura 3.7 C) e de raízes associadas às ectomicorrizas (Figura 3.7 D) foram bastante elevados em função da grande variação encontrada para as raízes de eucalipto, considerando também que sempre as ectomicorrizas estiveram associadas às raízes dessa espécie vegetal. Devido a essas variações, não foram verificadas diferenças entre as três distâncias avaliadas, sendo que as raízes de eucalipto, e as ectomicorrizas associadas se desenvolveram preferencialmente até a metade da entrelinha das árvores (4,3 m).

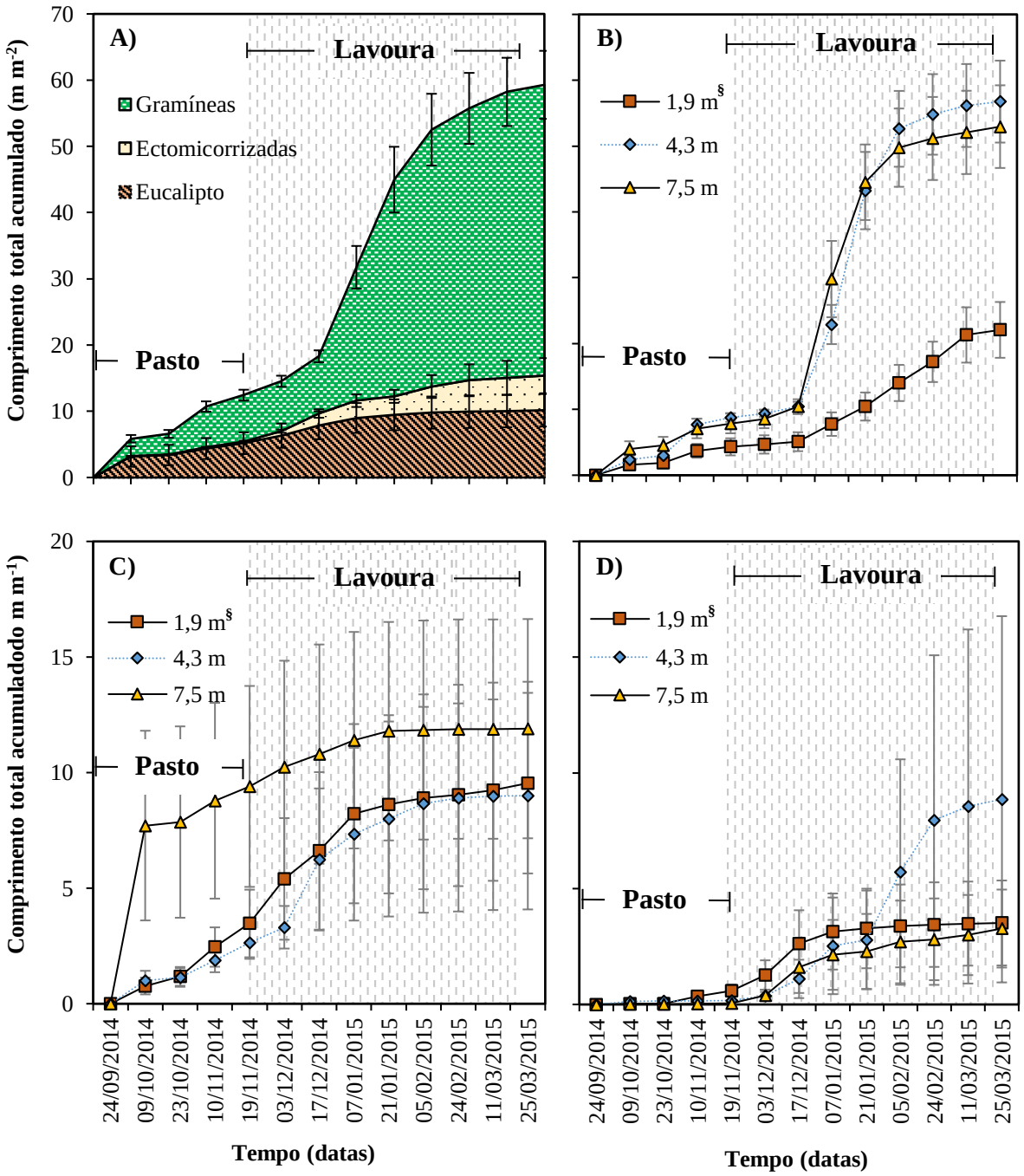
Ao final do ciclo avaliado a ILP acumulou o maior comprimento de raízes entre os sistemas; e entre as distâncias na ILPF os maiores valores foram verificados à 4,3 m, seguidos pelos de 7,5 m, às linhas das árvores (Tabela 3.2). Mesmo no ponto de melhor produção de raízes da ILPF (74,6 m m^{-2}) esta foi cerca de 42 % menor quando comparada ao tratamento sem a presença da árvore (ILP). A cobertura de algumas raízes presentes em amostragens antecedentes por movimentação de solo dificultou a avaliação detalhada e acurada da decomposição do sistema radicular nesse período. Esta movimentação de terra pode estar associada ao tempo de instalação dos tubos (5 a 9 meses), a atividade de máquinas para o manejo agrícola ou mesmo a atividade da macrofauna do solo, comumente mais expressiva em sistemas agrícolas conservacionistas (BUSARI et al., 2015). As raízes cobertas pela terra e as realmente decompostas foram quantificadas e estão apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Comprimento total acumulado produzido (CTAP), comprimento total acumulado decomposto (CTAD), e comprimento total coberto por terra (CTCT) em sistemas com pastagem de manejo extensivo (PE), integração lavoura-pecuária (ILP) e integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) no período de cultivo da lavoura de milho+braquiária (ILP e ILPF) na camada de 0-0,70m

	Sistemas Avaliados			**Entrelinha na ILPF**		
	PE	ILP	ILPF	1,9 m §	4,3 m	7,5 m
CTAP (m m^{-2})	45,6±2,5 B*	128,8±30 A	59,3±6,8 B	35,1±5,8 B	74,6±13,0 A	68,1±9,6 A
CTAD (m m^{-2})	2,0±1,6 A	8,9±3,9 A	4,4±0,9 A	2,8±1,1 A	3,7±1,3 A	6,7±2,2 A
CTCT (m m^{-2})	14±3,3 A	15,6±3,4 A	9,1±2,0 A	7,9±2,2 A	7,9±2,3 A	11,5±1,7 A

*****Letras diferentes na linha representam diferenças significativas pelo teste de tukey ($p<0.05$). §1,9, 4,3 e 7,5 m correspondem as distâncias às linhas do eucalipto.

Figura 3.7 - Valores médios (n=5 ± erro padrão) de 0-0,70 m no perfil do solo do comprimento de raízes de diferentes grupos (A) e comparação entre as distâncias da linha do eucalipto para raízes de gramíneas (B), para raízes de eucalipto (C) e para as raízes ectomicorrizadas (D) em sistema de integração-lavoura-pecuária-floresta



§1,9, 4,3 e 7,5 m correspondem as distâncias às linhas de eucalipto na ILPF. O espaço hachurado corresponde ao período de cultivo do milho, plantado em 17/11/2014 e colhido dia 20/03/2015.

3.3.2 Período de pastagem

3.3.2.1 Densidade do solo

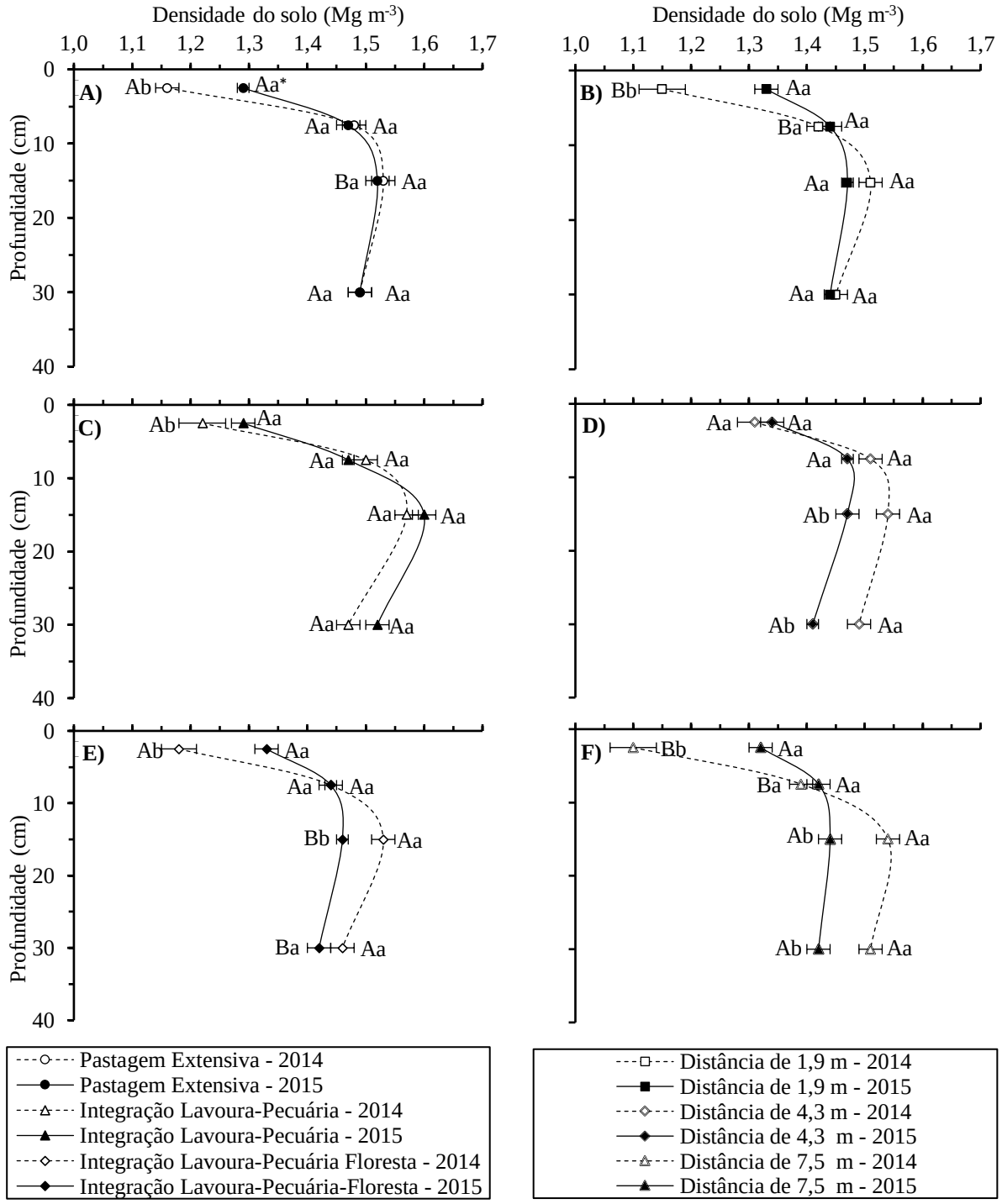
Os sistemas de integração (ILP e ILPF) e a pastagem extensiva, após o período de cultivo com lavoura, apresentaram valores semelhantes de densidade do solo ao longo do perfil do solo (Figura 3.8 A, C, E). Entretanto, após o período de um ano de pastejo, em junho de 2016, os valores de densidade do solo foram incrementados em todos os sistemas (pastagem extensiva, ILP e ILPF) na camada de 0-0,05 m. Nesse mesmo período a área de ILPF reduziu a densidade do solo em camadas abaixo de 0,20 m de profundidade, ao final apresentando menores valores do que nas áreas de pastagem e ILP. Em ambas as avaliações nas áreas avaliadas a densidade do solo aumentou em profundidade, principalmente de 0-0,05 m para 0,05-0,10 m, apresentando tendências de decréscimos nos seus valores a partir de 0,20 m de profundidade.

Na camada superficial da ILPF a densidade do solo foi menor em 2015 nas distâncias de 1,9 m e 7,5 m às linhas do eucalipto (Figura 3.8 B, D, F). O período de pastejo proporcionou incrementos da densidade do solo na camada superficial da ILPF nas distâncias de 1,9 e 4,3 m e redução nas camadas de 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m nas distâncias de 4,3 e 7,5 m. Após o período de pastejo, em 2016, não foram verificadas diferenças da densidade do solo entre as distâncias na entrelinha do eucalipto.

3.3.2.2 Umidade do solo

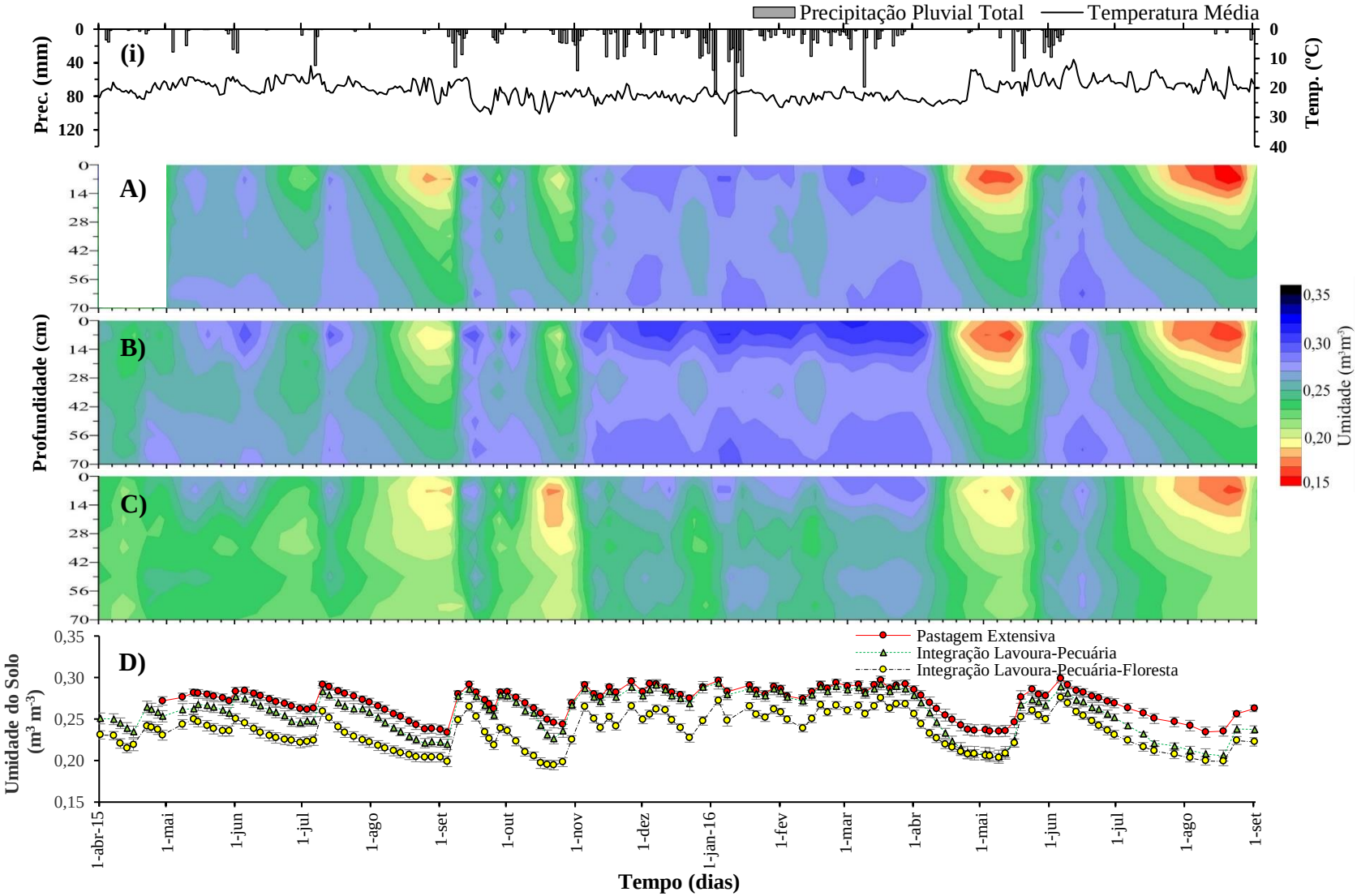
O primeiro mês após a colheita do milho (abril de 2015) foi caracterizado por baixos índices pluviométricos, de apenas 40 mm (Figura 3.9i) o que refletiu em baixa disponibilidade de água, principalmente entre 07 e 16 de abril na área ILPF (< 0,23 $m^3 m^{-3}$) (Figura 3.9 D). A área de ILP nesse período apresentou decréscimos nos conteúdos de água no solo no decorrer do tempo, entretanto com valores médios inferiores a 0,23 $m^3 m^{-3}$. Na ILPF as camadas até 0,70 m indicaram redução da umidade do solo (Figura 3.9 A, D) enquanto na ILP a diminuição foi preferencial em camadas superficiais (Figura 3.9 C). Em função de problemas técnicos a umidade do solo na área de pastagem extensiva não foi quantificada no mês de abril de 2015.

Figura 3.8 - Densidade do solo em área de pastagem com manejo extensivo (A; n=5), integração lavoura-pecuária (C; n=5) e integração lavoura-pecuária-floresta (E; n=15), e nas distâncias de 1,9 m (B; n=5), 4, 3 m (D; n=5) e 7,5 m (F; n=5) às linhas do eucalipto antes (2015 - linhas tracejadas) e depois (2016 - linhas sólidas) do período de pastejo por bovinos de corte nos dois sistemas integrados de produção agropecuária



*Letras maiúsculas comparam tratamentos (pastagem extensiva, integração lavoura-pecuária e integração lavoura-pecuária-floresta) e as distâncias na integração lavoura-pecuária-floresta (1,9, 4,3 e 7,5 m) e letras minúsculas comparam épocas (antes e após pastejo nos sistemas integrados) pelo teste de Tukey ($p<0.05$).

Figura 3.9 - Umidade volumétrica do solo (m^3 m^{-3}) no período de manejo e uso do solo sob pastejo de bovinos de corte em camadas de solo nos sistemas com pastagem extensiva (A; n=5), com integração lavoura-pecuária (B; n=5) e integração lavoura-pecuária-floresta (C; n=15); umidade volumétrica do solo (± erro padrão) na camada de 0-0,7 m (D); e, valores de precipitação e temperaturas diárias (i)



As precipitações acumuladas de 57 mm no início do mês de maio incrementaram de 0,1 a 0,2 $m^3 m^{-3}$ os valores de umidade do solo nas áreas de sistemas integrados de produção. Da mesma forma pode ser observado que precipitações pluviais no início do mês de junho (52 mm) e julho (60 mm) proporcionaram aumentos na umidade do solo principalmente nas camadas superficiais da ILP e ILPF (0-0,14 e 0,14-0,28 m), seguidos de decréscimos devido à posterior ausência de chuvas. Praticamente não choveu no período de julho a setembro (final do período seco), com precipitação de apenas 27 mm.

Dessa forma no período de agosto a setembro os conteúdos de água no solo foram os mais baixos verificados no inverno de 2015. Nesse período de inverno os conteúdos de água do solo sempre foram menores na área de ILPF quando comparada ás áreas de pastagem extensiva e ILP. Além disso, para esse período o conteúdo de água do solo na área de pastagem extensiva não se diferenciou da área de ILP (Tabela 3.3).

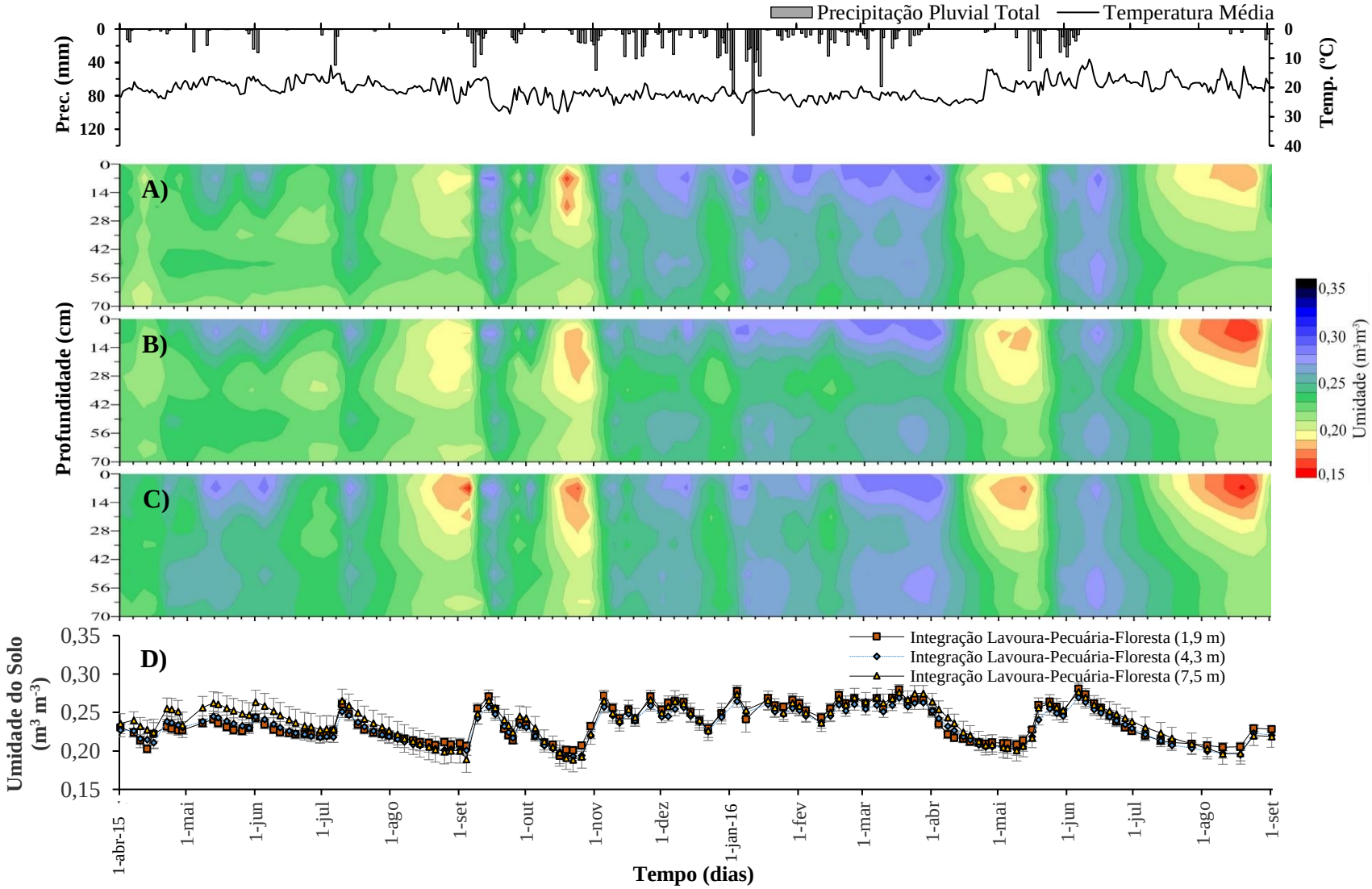
Embora com maiores volumes de chuva na segunda semana de setembro de 2015 (117 mm), o que refletiu em incrementos na umidade do solo em todas as áreas, o mês de outubro foi atípico com apenas 63 mm acumulados de chuva. Dessa forma os conteúdos de água no solo diminuíram durante o mês de outubro como média no perfil (0-0,7 m) de 0,28 para 0,24 $m^3 m^{-3}$ na pastagem extensiva e ILP e de 0,24 para 0,20 $m^3 m^{-3}$ na área de ILPF. A partir de novembro de 2015 até março de 2016 ocorreu boa disponibilidade hídrica, pois as chuvas foram frequentes e típicas de um verão chuvoso em clima local (tipo Cwa). Principalmente no mês de janeiro de 2016 as precipitações foram muito elevadas acumulando um total de 540 mm nesse mês. Os conteúdos de água no solo foram inicialmente incrementados e bastante homogêneos ao longo desses meses.

No período de chuvas os maiores conteúdos de água foram verificados na ILP na camada superficial (> 0,30 $m^3 m^{-3}$) e também abaixo de 0,56 m (> 0,29 $m^3 m^{-3}$). Entre os sistemas a ILPF, nesse período, apresentou menores conteúdos de água, sempre menores a 0,26 mm abaixo de 0,28 m de profundidade. Dentre os três sistemas a distribuição mais homogênea de água longo do perfil do solo foi na área de pastagem extensiva.

No período chuvoso de 2015/16 não houve diferenças de conteúdos de água no perfil do solo (0-0,7 m) entre as áreas de ILP e da pastagem extensiva, e esses foram na maior parte do período mais elevados na ILP quando comparados à área de ILPF.

Na maior parte do período de pastagem a variação do conteúdo de água do solo ao longo do tempo foi similar ao longo da entrelinha de cultivo do eucalipto (ILPF). Entretanto, para os períodos secos de 2015 e de 2016 (meses de abril a setembro), os conteúdos de água foram maiores no centro da entrelinha de cultivo (7,5 m) do eucalipto do que em locais próximas às árvores (1,9 m) (Tabela 3.3). Em camadas superficiais, entretanto (0-0,14 e 0,14-0,28 m) nos períodos secos (2015 e 2016) a distância de 1,9 m foi a que apresentou os maiores valores de umidade do solo (Figura 3.10 A, B, C).

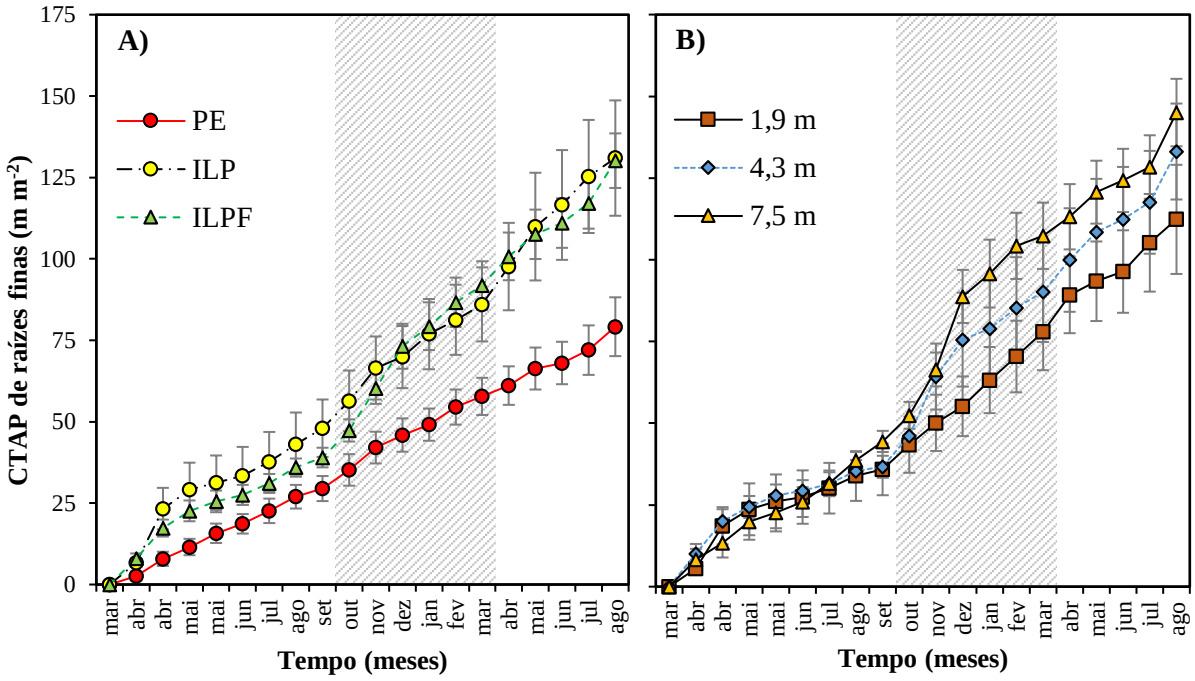
Figura 3.10 - Umidade volumétrica do solo (n=5) no período de manejo e uso do solo sob pastejo de bovinos de corte em camadas de solo à 1,9 m (A), 4,3 m (B) e 7, 5 m (C) de distância às linhas dos eucaliptos em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta; umidade volumétrica do solo (± erro padrão) na camada de 0-0,7 m (D); e, valores de precipitação e temperaturas diárias (i)



3.3.2.3 Crescimento diário e acúmulo de raízes finas

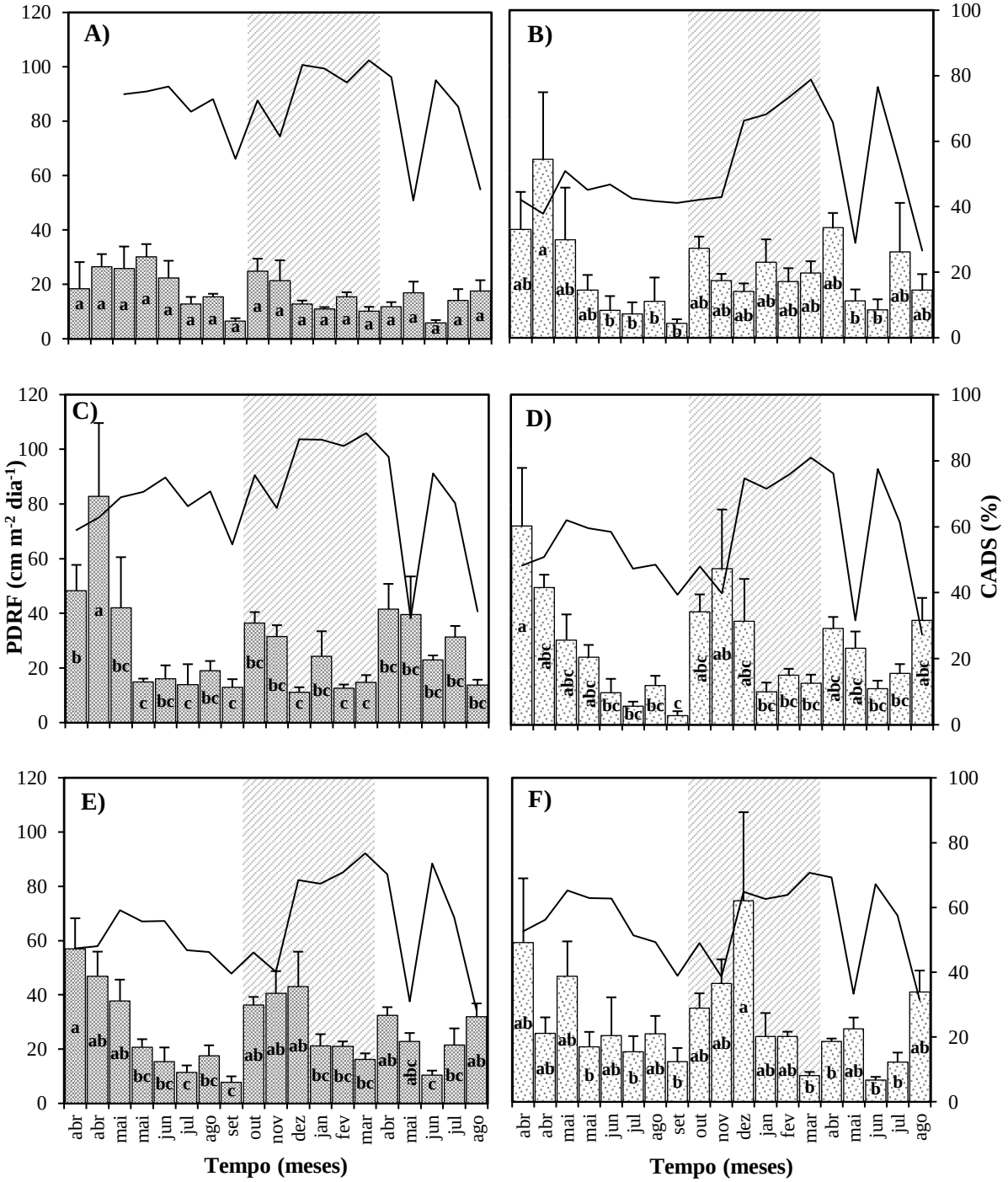
Após a colheita do milho (abril e maio), a cultura da braquiária nos sistemas de ILP e ILPF incrementou rapidamente o comprimento radicular (Figura 3.11 A) devido ao aumento da taxa de crescimento radicular (Figura 3.12 C, D). Nesse período a área de ILP acumulou 29,2 m m^{-2}, a área de ILPF 22,6 m m^{-2} e a área de pastagem extensiva apenas 11,5 m m^{-2} de raízes finas. O crescimento radicular de braquiária (pastagem extensiva e ILP) ou braquiária e eucalipto (ILPF) reduziram nos meses do inverno (segunda quinzena de maio a setembro). Entre essas datas a produtividade diária média de raízes foi de 14,9, 14,3, e 13,0 cm m^{-2} dia^{-1} nas áreas de ILP, pastagem extensiva e ILPF, respectivamente.

Figura 3.11 - Valores médios (± erro padrão; n=5) do comprimento total acumulado (CTA) de raízes finas (A, B) e do comprimento total de raízes decompostas (C, D) em sistemas com pastagem de manejo extensivo (PE), com integração lavoura-pecuária (ILP), com integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) e sob distâncias na entrelinha do eucalipto na ILPF, em período sob pastejo de bovinos de corte



A área hachurada corresponde ao período chuvoso. §1,9, 4,3 e 7,5 m correspondem as distâncias às linhas de eucalipto na ILPF. Amostragens quinzenais nos meses de abril e maio e mensais (início do mês) a partir de junho de 2015.

Figura 3.12 - Valores médios (± erro padrão; n=5) da produção diária de raízes finas (PDRF) na camada de 0-0,70 m nos sistemas com pastagem de manejo extensivo (A; n=5), com integração lavoura-pecuária (C; n=5) e integração lavoura-pecuária-floresta (E; n=15), e à 1,9 m (B; n=5), 4,3 m (D; n=5) e 7,5 m (F; n=5) de distância às linhas dos eucaliptos no sistema de integração lavoura-pecuária-floresta



A área hachurada corresponde ao período chuvoso. **CADS:** Médias do conteúdo de água disponível no solo indicadas pela linha sólida. Amostragens quinzenais nos meses de abril e maio e mensais (início do mês) a partir de junho de 2015.

Com um efeito cumulativo entre esses dois períodos, no período seco de 2015 não foram verificadas diferenças para o comprimento total acumulado produzido (CTAP), para o CTAP de gramíneas e para a produção diária de raízes finas (PDRF) entre as áreas de ILP e ILPF (Tabela 3.3). Entretanto, nessa estação seca a área de pastagem extensiva apresentou os menores CTAP e PDRF quando comparada as áreas de sistemas integrados de produção agropecuária (Figura 3.11 A; Figura 3.12 A, C, E; Tabela 3.3).

Tabela 3.3 - Análise multivariada de perfil contrastando os sistemas de produção agropecuária, e as distâncias na entrelinha do eucalipto em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta, no comprimento total acumulado produzido (CTAP) de raízes finas, no CTAP das gramíneas, do eucalipto e das raízes ectomicorrizadas, na produção diária de raízes finas (PDRF)

	Sistemas avaliados			**Entrelinha da ILPF**		
	ILP x PE	**ILPF x PE**	**ILPF x ILP**	**4,3m x 1,9m§**	**7,5m x 1,9m**	**7,5m x 4,3m**
	Período seco (abril a setembro de 2015)					
CTAP	**0,0053***	**0,0360**	0,1014	0,7580	0,3081	0,2849
CTAP (gramíneas)	**0,0053**	**0,0518**	0,2573	0,2195	**0,0370**	0,1988
CTAP (eucalipto)	-	-	-	0,5696	**0,0212**	0,0626
CTAP (ectomic.)	-	-	-	0,8767	0,2759	0,3930
PDRF (total)	**0,0061**	**0,0391**	0,1097	0,7589	0,3067	0,2843
	Período chuvoso (outubro de 2015 – março de 2016)					
CTAP	0,3488	**0,0258**	0,0841	0,4170	0,1501	0,6264
CTAP (gramíneas)	0,3488	**0,0249**	0,0948	0,3823	0,1338	0,5695
CTAP (eucalipto)	-	-	-	0,8794	0,0604	**0,0268**
CTAP (ectomic.)	-	-	-	0,5338	0,2308	0,6638
PDRF (total)	0,2049	**0,0158**	0,0812	0,4421	0,1501	0,5321
	Período seco (abril a agosto de 2016)					
CTAP	**0,0008**	**0,0019**	0,0514	**0,0474**	**0,0360**	0,9660
CTAP (gramíneas)	**0,0008**	**0,0013**	0,0558	**0,0540**	**0,0425**	0,9871
CTAP (eucalipto)	-	-	-	0,9141	0,5680	0,5479
CTAP (ectomic.)	-	-	-	0,7173	0,9468	0,6130
PDRF (total)	**0,0002**	**0,0003**	0,1074	0,2150	**0,0133**	0,1246

*Probabilidade estatística da hipótese nula pelo teste multivariado de Pillai's Trace. PE (n=5): pastagem com manejo extensivo. ILP (n=5): integração lavoura-pecuária. ILPF (n=15): integração lavoura-pecuária-floresta. §1,9 (n=5), 4,3 (n=5) e 7,5 m (n=5) correspondem as distâncias às linhas do eucalipto. Camada de solo avaliada de 0-70 cm.

Nas primeiras chuvas do verão (entre outubro e dezembro de 2015) o crescimento radicular foi incrementado na ILP (26,4 cm m^{-2} dia^{-1}) e ILPF (39,9 cm m^{-2} dia^{-1}) e nos meses chuvosos seguintes tendeu a diminuir (Figura 3.12 A, C, E). No período de elevada disponibilidade hídrica (outubro de 2015 a março de 2016) o acúmulo no comprimento de raízes foi de 33,4, 24,0 e 17,9 cm m^{-2} dia^{-1} nas áreas de ILPF, ILP e pastagem extensiva, respectivamente. Dessa forma nessa estação a área de ILPF (com maior PDRF e CTAP de raízes) se diferiu da área de pastagem extensiva (com menor PDRF e CTAP de raízes). A ILP apresentou valores de produção e acúmulo de raízes intermediárias entre a ILPF e pastagem extensiva e não se diferiu estatisticamente das mesmas (Tabela 3.3).

No período seco de 2016 o acúmulo de raízes foi de 44,9, 38,3 e 21,4 m m^{-2} nas áreas de ILP, ILPF e pastagem extensiva, respectivamente. Uma redução nos conteúdos de água no solo na área de ILP pode estar relacionada ao maior desenvolvimento radicular nesse período (Figura 3.12 C). Durante o período seco de 2016, não houve diferenças na quantidade total de raízes nas áreas de ILP (28,6 cm m^{-2} dia^{-1}) e ILPF (24,4 cm m^{-2} dia^{-1}), as quais produziram mais raízes que a pastagem extensiva (13,6 cm m^{-2} dia^{-1}) (Tabela 3.3).

Durante o período seco de 2015, seguinte à colheita do milho, a produção de raízes finas foi de 44,4, 36,7 e 35,9 m m^{-2} nas distâncias de 7,5, 4,3 e 1,9 m, respectivamente, na área de ILPF (Figura 3.11 B), sendo as diferenças significativas para o CTAP das gramíneas e do eucalipto entre as distâncias de 7,5 e 1,9 m (Tabela 3.3). Nessa estação as maiores taxas de crescimento radicular ocorreram principalmente no mês de abril e a primeira quinzena de maio (Figura 3.12 B, D, F). No período chuvoso 2015/16, no ILPF foram acumulados 62,9, 53,5 e 42,1 m de raízes finas nas distâncias de 7,5, 4,3 e 1,9 m, respectivamente, não apresentando diferenças entre as distâncias avaliadas (Tabela 3.3).

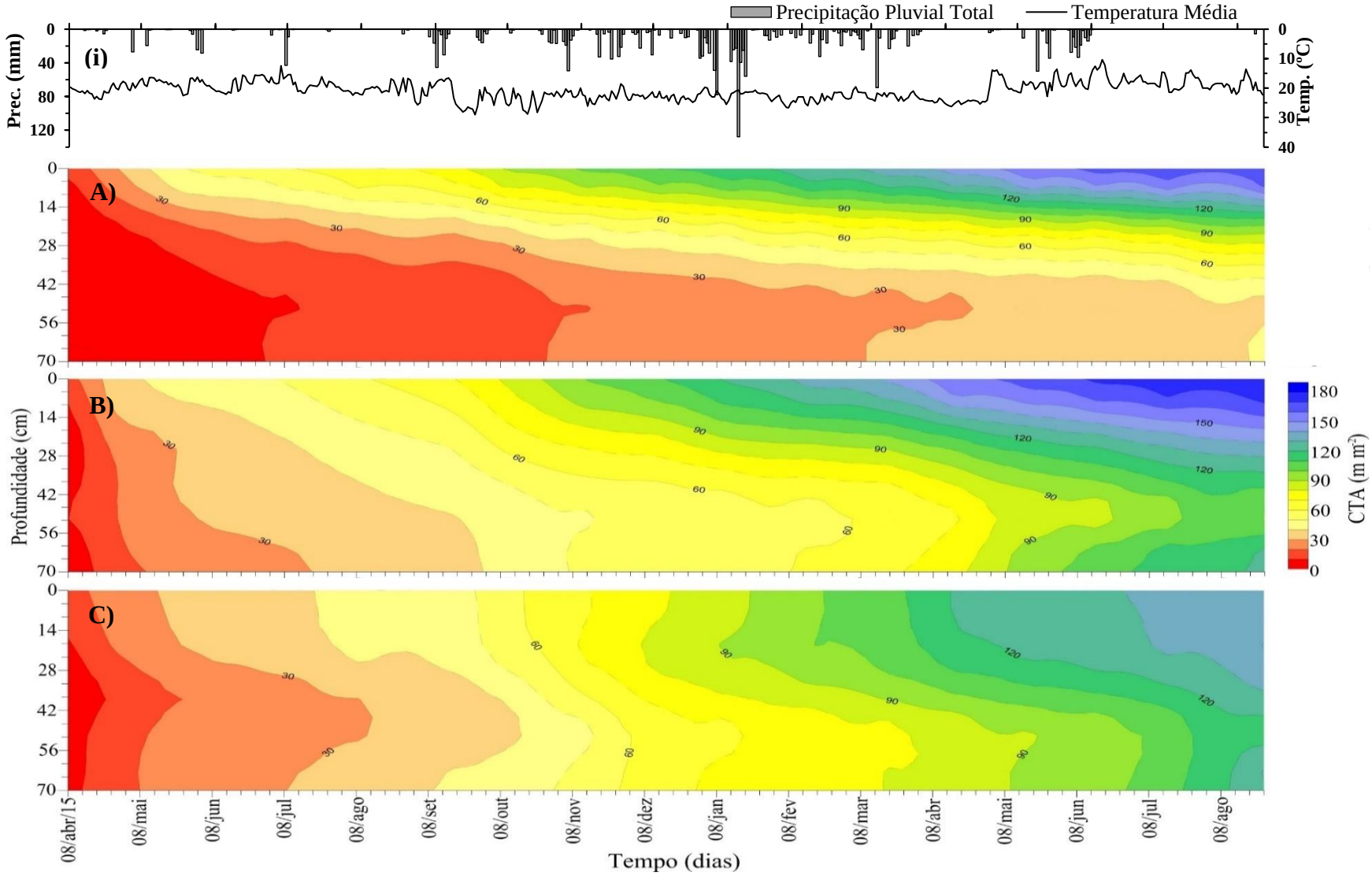
Para o último período, no inverno seco de 2016 o acumulado de raízes foi de 37,7, 43,0, e 34,4 m nas distâncias de 7,5, 4,3 e 1,9 m, respectivamente (Figura 4 B). Dessa forma, nesse último período a distância intermediária de 4,3 m foi a que apresentou a maior produtividade de raízes finas das gramíneas, não havendo diferenças para o CTAP do eucalipto e das raízes associadas às ectomicorrizas (Tabela 3.3).

3.3.2.4 Distribuição radicular no perfil do solo

A área de pastagem extensiva apresentou acúmulo de raízes preferencialmente nas duas camadas superficiais (0-0,14 e 0,14-0,28 m), com mais de 80 % do comprimento total de raízes desenvolvido na camada de 0-0,42 m (Figura 3.13 A). O acúmulo nas diversas camadas dessa área ao longo das avaliações foi bastante homogêneo (Figura 3.13 A), como verificado para a PDRF em todo o perfil avaliado (Figura 3.12 A). Ao final das avaliações abaixo de 0,42 m de profundidade na pastagem extensiva o acumulado de raízes não ultrapassou 40 m m^{-2} enquanto os valores observados na ILP e ILPF foram maiores do que 100 m m^{-2}.

Outro aspecto é que, no final das avaliações, na ILPF a distribuição das raízes foi mais homogênea em profundidade (entre 110 e 130 m m^{-2} de raízes ao logo do perfil) enquanto na ILP os maiores acúmulos se ocorreram nas camadas superficiais, com variação entre 110 a 180 m m^{-2}. O sistema de ILPF produziu mais raízes em camadas mais profundas no período chuvoso, e a ILP favoreceu maiores crescimentos radiculares no início do período seco de 2016. Na camada de 0-0,14 cm tanto a área de PE, quanto a área de ILP acumularam mais raízes ao longo do tempo quando comparadas a ILPF.

Figura 3.13 - Comprimento total acumulado (CTA) de raízes finas em camadas de solo no período de manejo e uso do solo sob pastejo de bovinos de corte nos sistemas com pastagem extensiva (A; n=5), com integração lavoura-pecuária (B; n=5) e integração lavoura-pecuária-floresta (C; n=15)



Na ILPF o comprimento total acumulado de raízes, no início do período chuvoso (outubro a dezembro de 2015), foi incrementado do centro da entrelinha para a linha de cultivo (7,5 m = 4,3 m >1,9 m) (Figura 3.11 A; Figura 3.14 A, B, C). Nas duas distâncias da entrelinha de cultivo do ILPF (4,3 e 7,5m) o CTAP de raízes foi maior nas camadas de 0-0,14 e 0,14-0,28 m e reduziu em profundidade, padrão que se diferiu da distância de 1,9 m que apresentou reduções até a profundidade de 0,56 m e na camada de 0,56-0,70 incrementou o CTAP de raízes finas. Ao final do ciclo avaliado os acúmulos de comprimento radicular no solo variaram de 90 a 140 m m^{-2}, de 110 a 150 m m^{-2} e de 130 a 150 m m^{-2} a 1,9, 4,3 e 7,5 m, respectivamente, de distância às linhas do eucalipto.

3.3.2.5 Distribuição das raízes em grupos, comprimento total acumulado e decomposto

No período de pastagem, a quantidade total de raízes de eucalipto que cresceram no perfil do solo foi muito inferior à quantidade originada da braquiária (Figura 3.15 A). Na camada de 0-0,7 m da ILPF foram verificados 3,5 m m^{-2} de raízes de eucalipto, 3,0 m m^{-2} de raízes com status de ectomicorrização e 123,6 m m^{-2} de raízes de gramíneas. Dessa forma pode ser afirmado que a dinâmica do total das raízes nesse sistema, apresentada anteriormente, se aplica para as raízes das gramíneas. O CTAP de raízes de eucalipto foi incrementado entre os meses de julho e dezembro de 2015 nas distâncias de 7,5 m (3,9 m m^{-2}) e 1,9 m (3,1 m m^{-2}) e consequentemente, no período de dezembro de 2015 a janeiro de 2016, houve os maiores incrementos de raízes associadas à ectomicorrizas. Assim, ao final das avaliações o centro das entrelinhas do eucalipto (7,5 m) foi a posição em que houve maiores desenvolvimentos de raízes de eucalipto e raízes associadas às ectomicorrizas (1,3 m m^{-2}).

Nesse período de pastagem a quantidade de raízes cobertas por terra foi apenas 4 %, o que possibilitou a avaliação da decomposição de raízes. A ILP e a ILPF no período da pastagem acumularam quantidades de raízes de 131,1 m m^{-2} e 130,2 m m^{-2}, sendo similares entre si, enquanto a PE acumulou valores menores de 79,2 m m^{-2}. Nesses dois sistemas o comprimento total acumulado de raízes também foi maior quando comparado à área de pastagem extensiva (Tabela 3.4). Nas distâncias de 7,5 e 4,3 m das linhas do eucalipto (ILPF) houve maiores crescimento acumulado de raízes (145 e 133 m m^{-2}) e de decomposição radicular (95 e 99 m m^{-2}) quando comparadas a área de pastagem extensiva, que acumulou 113 e 51 m m^{-2} de raízes produzidas e decompostas, respectivamente. Nesse período de pastagem pode ser observado que o CTAP de raízes ao centro das entrelinhas do eucalipto (145 m m^{-2}) foi maior do que no sistema ILP (131,1 m m^{-2}).

Figura 3.14 - Comprimento total acumulado (CTA) de raízes finas (n=5) em camadas de solo no período de manejo e uso do solo sob pastejo de bovinos de corte a 1,9 m (A), 4,3 m (B) e 7,5 m (C) de distância às linhas dos eucaliptos em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta

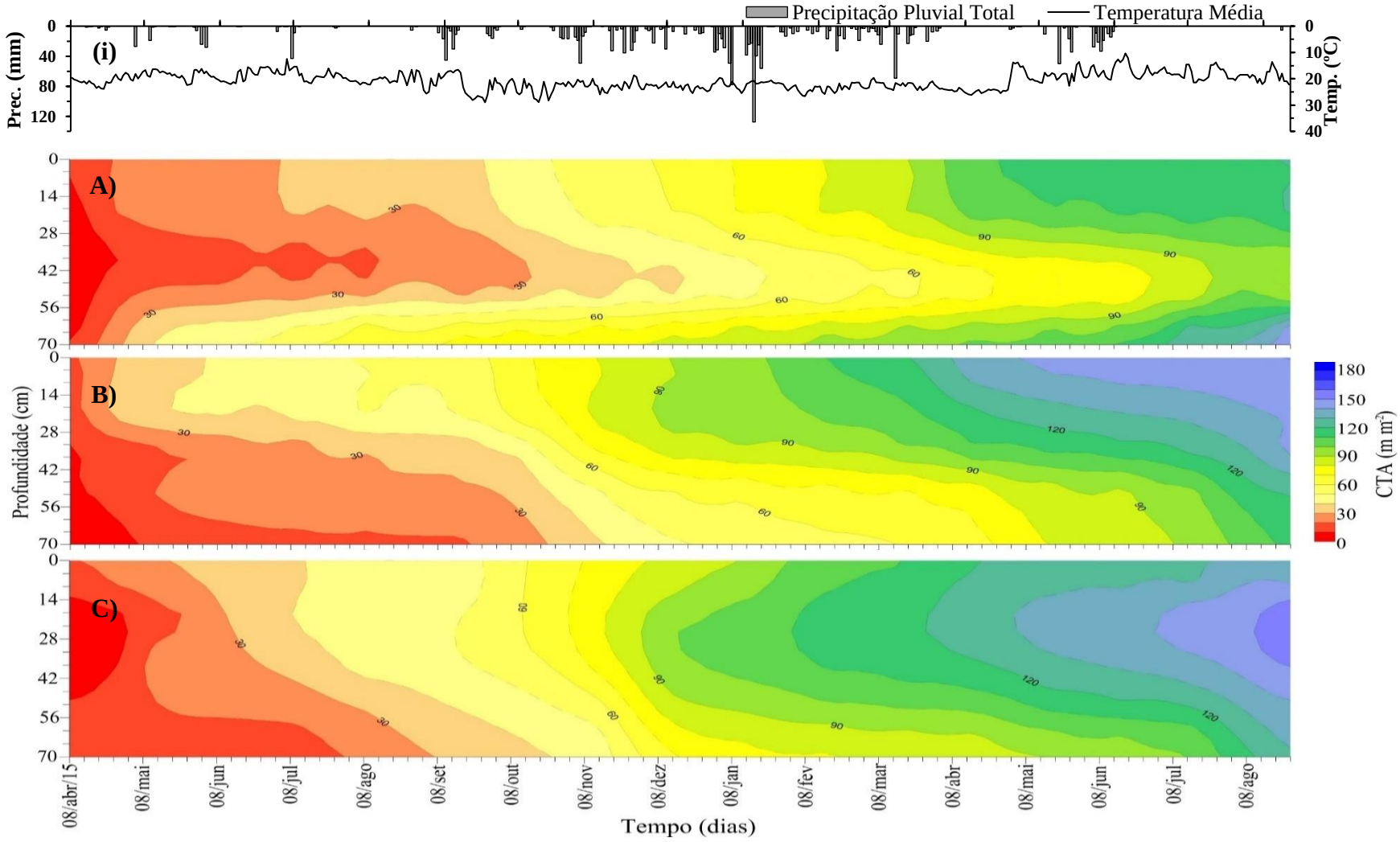
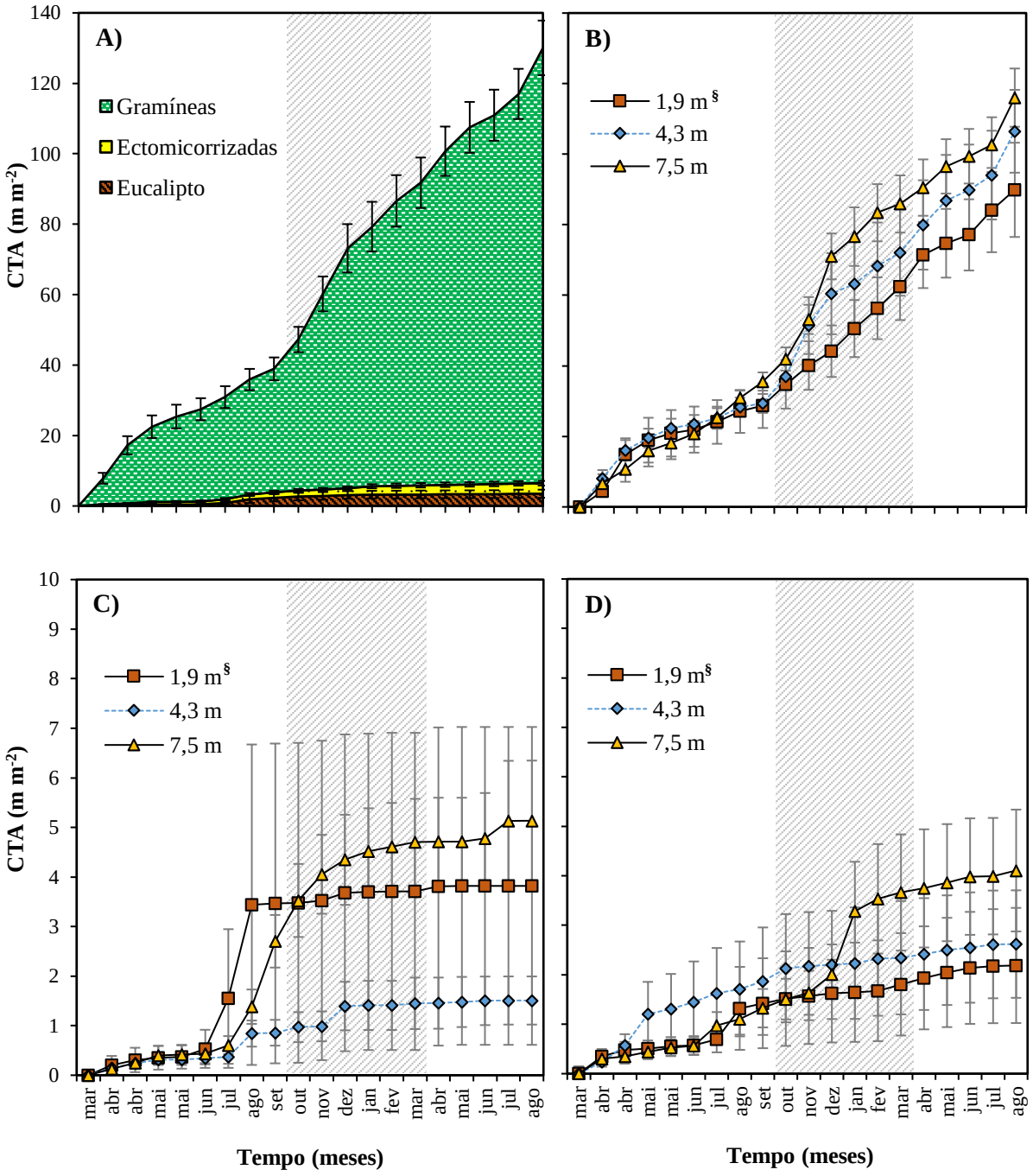


Figura 3.15 - Valores médios (± erro padrão; n=5) do comprimento total acumulado (CTA) de raízes de diferentes espécies vegetais (A) e comparação entre as distâncias da linha do eucalipto para raízes de gramíneas (B), de eucalipto (C) e para as ectomicorrizadas (D) sob pastejo de bovinos de corte em sistema de integração-lavoura-pecuária-floresta



A área hachurada corresponde ao período chuvoso. §1,9, 4,3 e 7,5 m correspondem as distâncias às linhas de eucalipto na ILPF. Amostragens quinzenais nos meses de abril e maio e mensais (início do mês) a partir de junho de 2015. Camada de solo avaliada de 0-70 cm

Tabela 3.4 Comprimento total acumulado (CTAP), comprimento total decomposto (CTAD) e comprimento total coberto por terra (CTCT) em sistemas com pastagem de manejo extensivo (PE), integração lavoura-pecuária (ILP) e integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) sob pastejo de bovinos de corte (ILP e ILPF) na camada de solo avaliada de 0-0,70 m

	Sistemas avaliados			**Entrelinha da ILPF**		
	PE	**ILP**	**ILPF**	**1,9 m** [§]	**4,3 m**	**7,5 m**
CTAP (m m^{-2})	79,2±10,1 B	131,1±17,7 A	130,2±8,4 A	113±11 B	133±13 A	145±10 A
CTAD (m m^{-2})	31,2±4,6 B	70,3±12,5 A	81,5±8,1 A	51±7 B	99±18 A	95±5 A
CTCT (m m^{-2})	3,4±1,7 A	5,2±1,7 A	3,6±0,5 A	2,1±1,5 A	4,1±1,5 A	4,5±0,5 A

[§]1,9, 4,3 e 7,5 m correspondem as distâncias às linhas do eucalipto. *****Letras diferentes na linha representam diferenças significativas pelo teste de tukey ($p<0.05$) e comparam entre si os sistemas avaliados (PE,ILP e ILPF) e as distâncias na ILPF (1,9, 4,3, e 7,5 m).

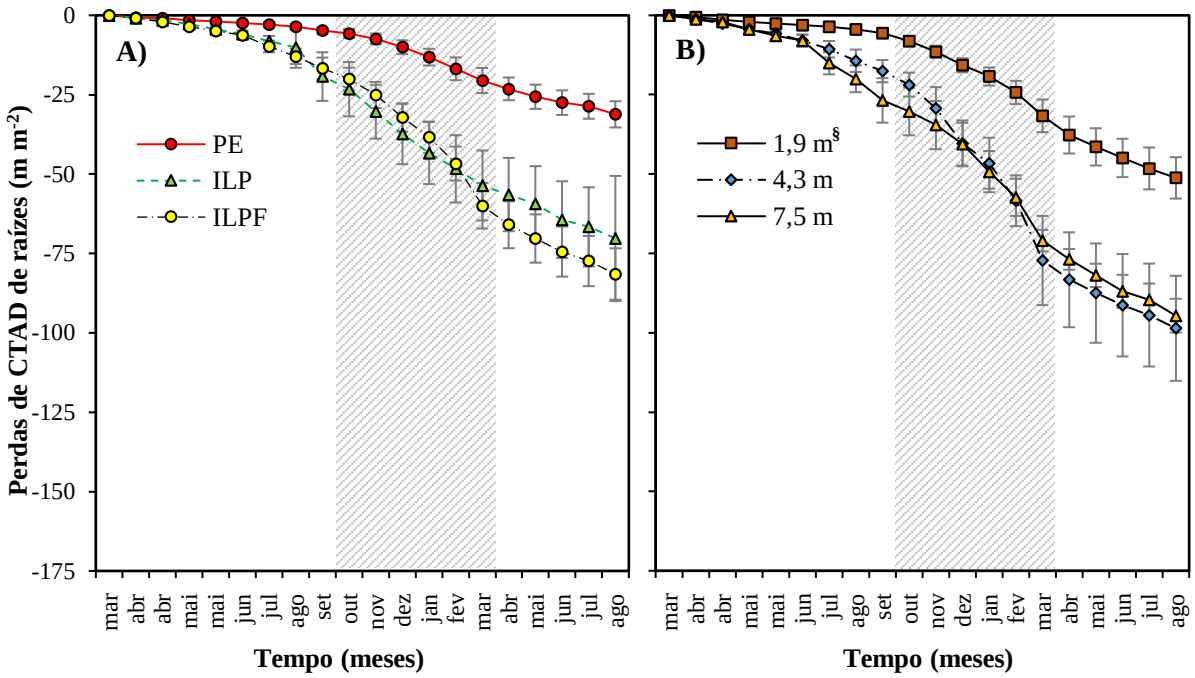
3.3.3 Dinâmica de decomposição radicular

3.3.3.1 Decomposição acumulada e diária de raízes em sistemas integrados de produção no período de pastagem

A decomposição das raízes esteve associada aos fluxos hídricos e às variações na temperatura de acordo com as estações do ano. Durante o período seco de abril a setembro de 2015 o comprimento total acumulado (Figura 3.16) e a decomposição diária (Figura 3.17) de raízes foram baixos e não foram verificadas diferenças significativas entre os sistemas de cultivo avaliados (Tabela 3.5). Nesse período a decomposição diária de raízes finas (DDRF) foi em média 2,8, 11,1 e 9,6 cm m^{-2} dia^{-1} nos sistemas de pastagem extensiva, ILP e ILPF, respectivamente. Entretanto, no sistema de ILPF as distâncias de 4,3 (10,1 cm m^{-2} dia^{-1}) e 7,5 m (15,4 cm m^{-2} dia^{-1}), mais distantes das árvores de eucalipto apresentaram maior comprimento acumulado decomposto (CTAD) e decomposição diária de raízes quando comparadas ao local mais próximo das árvores, onde se decompôs 3,2 cm m^{-2} dia^{-1} (Figura 3.16 B; Figura 3.17 B, D, E; Tabela 3.5).

No período chuvoso a decomposição radicular foi incrementada em todos os sistemas de cultivo e também ao longo da entrelinha na ILPF (Figura 3.17). Entre os sistemas, a pastagem extensiva apresentou a menor decomposição diária de raízes finas (Figura 3.17A, C, E; Tabela 3.5) com 8,7 cm m^{-2} dia^{-1}, sendo que a área de ILP decompôs 18,9 cm m^{-2} dia^{-1} e a ILPF 23,9 cm m^{-2} dia^{-1}. Nesse período a distância mais próxima as árvores na ILP permaneceu com menor perda do comprimento radicular de 14,4 cm m^{-2} dia^{-1} enquanto nas outras duas distâncias a decomposição diária de raízes média foi de 33,0 e 24,4 cm m^{-2} dia^{-1} nas distâncias de 4,3 e 7,5 m, respectivamente.

Figura 3.16 - Valores médios (± erro padrão; n=5) em período sob pastejo de bovinos de corte do comprimento total acumulado (CTA) de raízes finas decompostas sob sistemas de produção (A) com pastagem de manejo extensivo (PE), com integração lavoura-pecuária (ILP), com integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), e (B) sob distâncias na entrelinha do eucalipto na ILPF

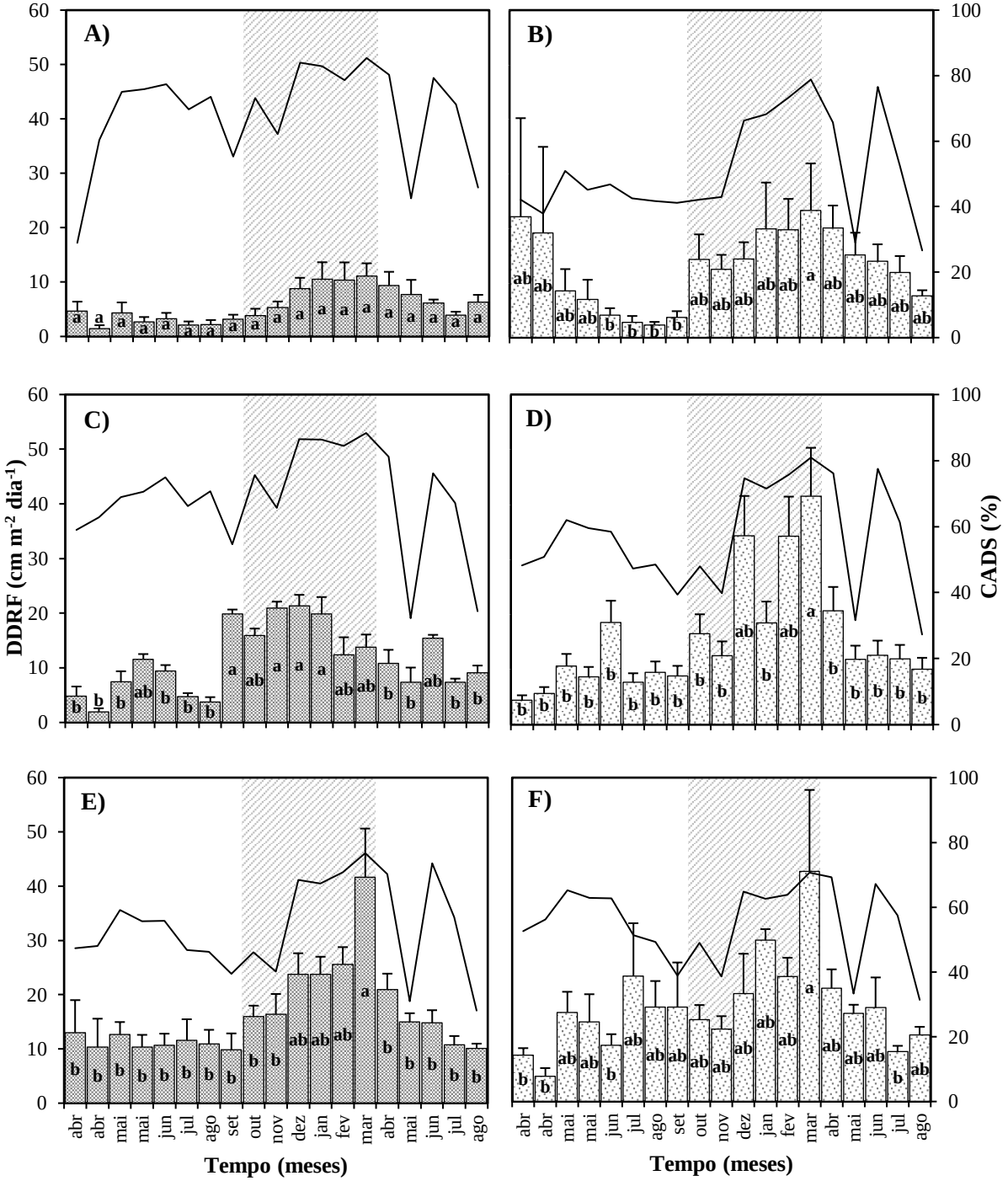


§1,9, 4,3 e 7,5 m correspondem as distâncias às linhas de eucalipto na ILPF. Amostragens quinzenais nos meses de abril e maio e mensais (início do mês) a partir de junho de 2015. Camada de solo avaliada de 0-0,70 m. A área hachurada corresponde ao período chuvoso.

No período seco de 2016 (abril a agosto) a decomposição de raízes nos sistemas integrados de produção reduziu sazonalmente com médias de 13,7 e 10,6 cm m^{-2} dia^{-1} para a ILPF e ILP, respectivamente. O comprimento decomposto de 10,7 m m^{-2} (Figura 3.16 A) e a decomposição diária de 6,8 cm m^{-2} dia^{-1} (Figura 3.17 B) de raízes finas na pastagem extensiva foram menores entre os sistemas nesse período (Tabela 3.5). Para as distâncias na ILPF as médias da decomposição diária de raízes para o período foram de 12,4, 13,6 e 15,1 cm m^{-2} dia^{-1} nas distâncias de 1,9, 4,3 e 7,5 m, respectivamente (Figura 3.17 B, D, F) não sendo verificadas diferenças significativas nessa estação (Tabela 3.5).

Ao final do ciclo avaliado a ILPF (81,5 m m^{-2}) e a ILP (70,3 m m^{-2}) se assemelharam para o comprimento total decomposto de raízes, enquanto a ILP apresentou menor acúmulo de raízes decompostas (31,2 m m^{-2}) (Figura 3.16 A). A ILPF, que apresentou a maior ciclagem radicular, se caracterizou por decompor 95, 99 e 51 m m^{-2} nas distâncias de 7,5, 4,3 e 1,9 às linhas do eucalipto, respectivamente (Figura 3.16 B).

Figura 3.17 - Valores médios (± erro padrão; n=5) da decomposição diária de raízes finas (DDRF) nos sistemas com pastagem de manejo extensivo (A; n=5), com integração lavoura-pecuária (C; n=5) e integração lavoura-pecuária-floresta (E; n=15), bem como, e a 1,9 m (B; n=5), 4,3 m (D; n=5) e 7,5 m (F; n=5) de distância às linhas dos eucaliptos no sistema de integração lavoura-pecuária-floresta



CADS: Médias do conteúdo de água disponível no solo são indicadas pela linha preta sólida. Amostragens quinzenais entre abril e maio e mensais (início do mês) a partir de junho de 2015. Camada de solo avaliada de 0-0,70 m. A área hachurada corresponde ao período chuvoso.

Tabela 3.5 Análise multivariada de perfil contrastando os sistemas de produção agropecuária, e as distâncias na entrelinha do eucalipto em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta, no comprimento total acumulado decomposto (CTAD) de raízes decompostas e na decomposição diária de raízes finas (DDRF)

	Sistemas avaliados			**Entrelinha da ILPF**		
	ILP x PE	**ILPF x PE**	**ILPF x ILP**	**4,3m x 1,9m§**	**7,5m x 1,9m**	**7,5m x 4,3m**
			Período seco (abril a setembro de 2015)			
CTAD (m m^{-2})	0,3739*	0,1323	0,7826	**0,0248**	**0,0065**	0,2231
DDRF (cm m^{-2} dia^{-1})	0,7642	0,3610	0,3374	**0,0553**	**0,0257**	0,4332
			Período chuvoso (outubro de 2015 – março de 2016)			
CTAD (m m^{-2})	**0,0883**	**0,0613**	0,2594	**0,0256**	**0,0080**	**0,0580**
DDRF (cm m^{-2} dia^{-1})	**0,0692**	**0,0675**	0,6286	**0,0495**	**0,0338**	0,0695
			Período seco (abril a agosto de 2016)			
CTAD (m m^{-2})	**0,0111**	**0,0451**	0,1110	0,1789	0,1540	0,4695
DDRF (cm m^{-2} dia^{-1})	0,1207	**0,0600**	0,2290	0,8009	0,3550	0,8573

*Probabilidade estatística da hipótese nula pelo teste multivariado de Pillai's Trace. PE (n=5): pastagem com manejo extensivo. ILP (n=5): integração lavoura-pecuária. ILPF (n=15): integração lavoura-pecuária-floresta. §1,9 (n=5), 4,3 (n=5) e 7,5 m (n=5) correspondem às distâncias às linhas do eucalipto. Camada de solo avaliada de 0-70 cm.

3.3.3.2 Distribuição da decomposição radicular no perfil do solo

A decomposição das raízes na área de pastagem extensiva ocorreu de forma bastante homogênea preferencialmente após as primeiras chuvas no período chuvoso (a partir de outubro) e predominantemente nas camadas superficiais do solo (i.e., 0-0,14 e 0,14-0,28 m) (Figura 3.18 A). Ao final do ciclo, o acumulado de raízes decompostas nestas duas camadas superficiais variou de 20 a 120 m m^{-2}. Na ILP a dinâmica temporal seguiu o mesmo padrão da área de pastagem extensiva, entretanto a distribuição de raízes decompostas foi mais homogênea no perfil, principalmente até a profundidade de 0,56 m. No ciclo de pastejo a ILP, entre 30 e 110 m m^{-2} de raízes foram decompostos, sendo os valores superiores a 60 m m^{-2} em camadas mais superficiais à 0,42 m. A área de ILPF apresentou maior decomposição ao longo do perfil (0-0,70 m) com acúmulos entre 40 e 110 m m^{-2} de raízes decompostas. A decomposição das raízes gradativamente decresceu em profundidade.

Nos sistemas ILPF, a decomposição radicular foi incrementada em direção ao centro da entrelinha do eucalipto (Figura 3.19 A,B,C). Nas posições mais ao centro da entrelinha (4,3 m e 7,5 m às linhas do eucalipto) verificou-se maior decomposição de raízes em camadas profundas comparado a posição mais próxima da linha de eucalipto (1,9 m), onde a decomposição foi mais intensa na camada superficial do solo. Ao final do ciclo, observou-se comprimento total de raízes decompostas foi inferior à 80 m m^{-2} em todas camadas na posição próxima a linha de eucalipto (1,9 m), enquanto que para as posições centrais, valores maiores de decomposição foram verificados nas camadas superficiais do solo (até 0,56 m).

Figura 3.18 - Comprimento total acumulado (CTA) de raízes decompostas sob pastejo de bovinos de corte em profundidades nos sistemas com pastagem extensiva (A; n=5), com integração lavoura-pecuária (B; n=5) e integração lavoura-pecuária-floresta (C; n=15)

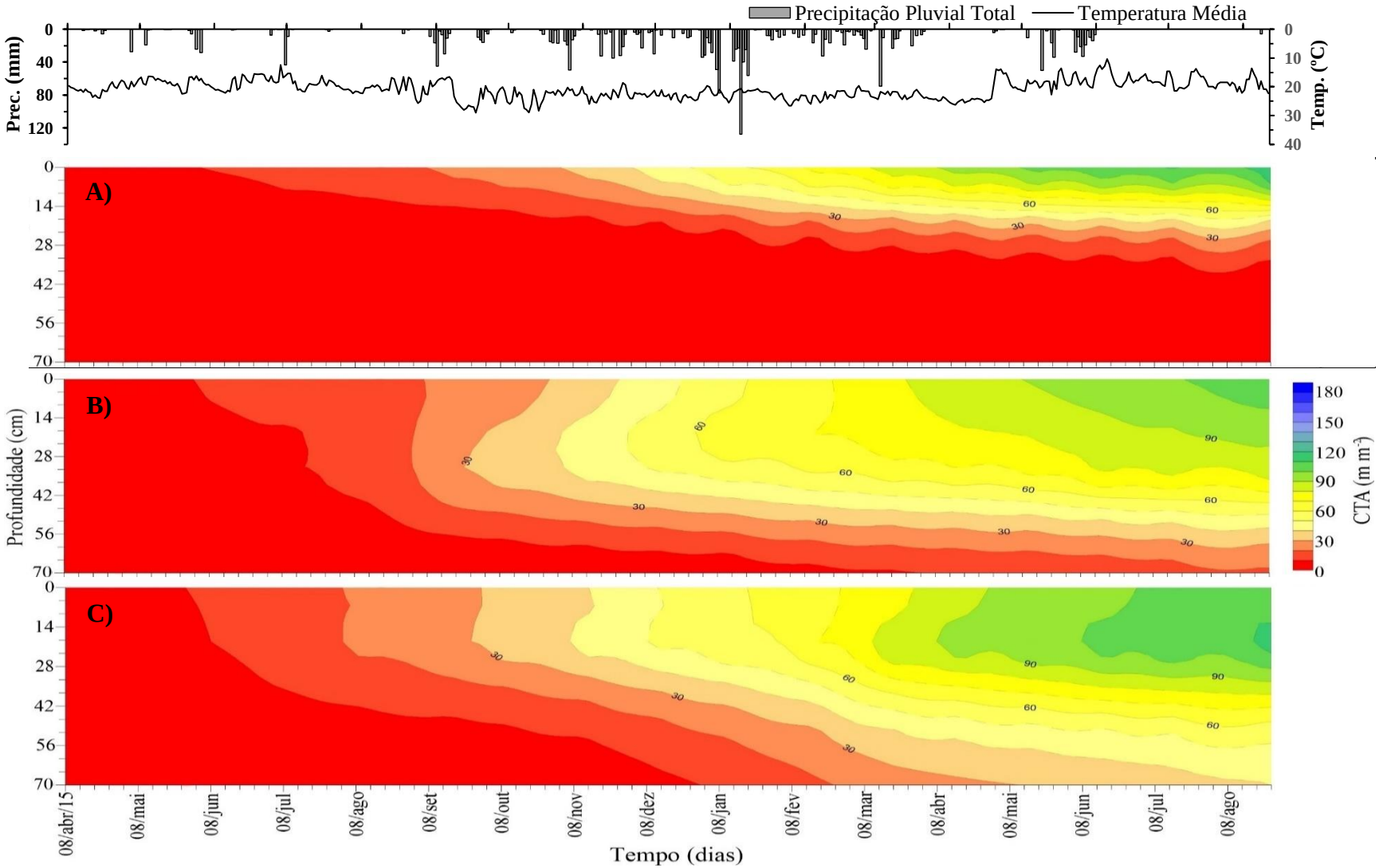
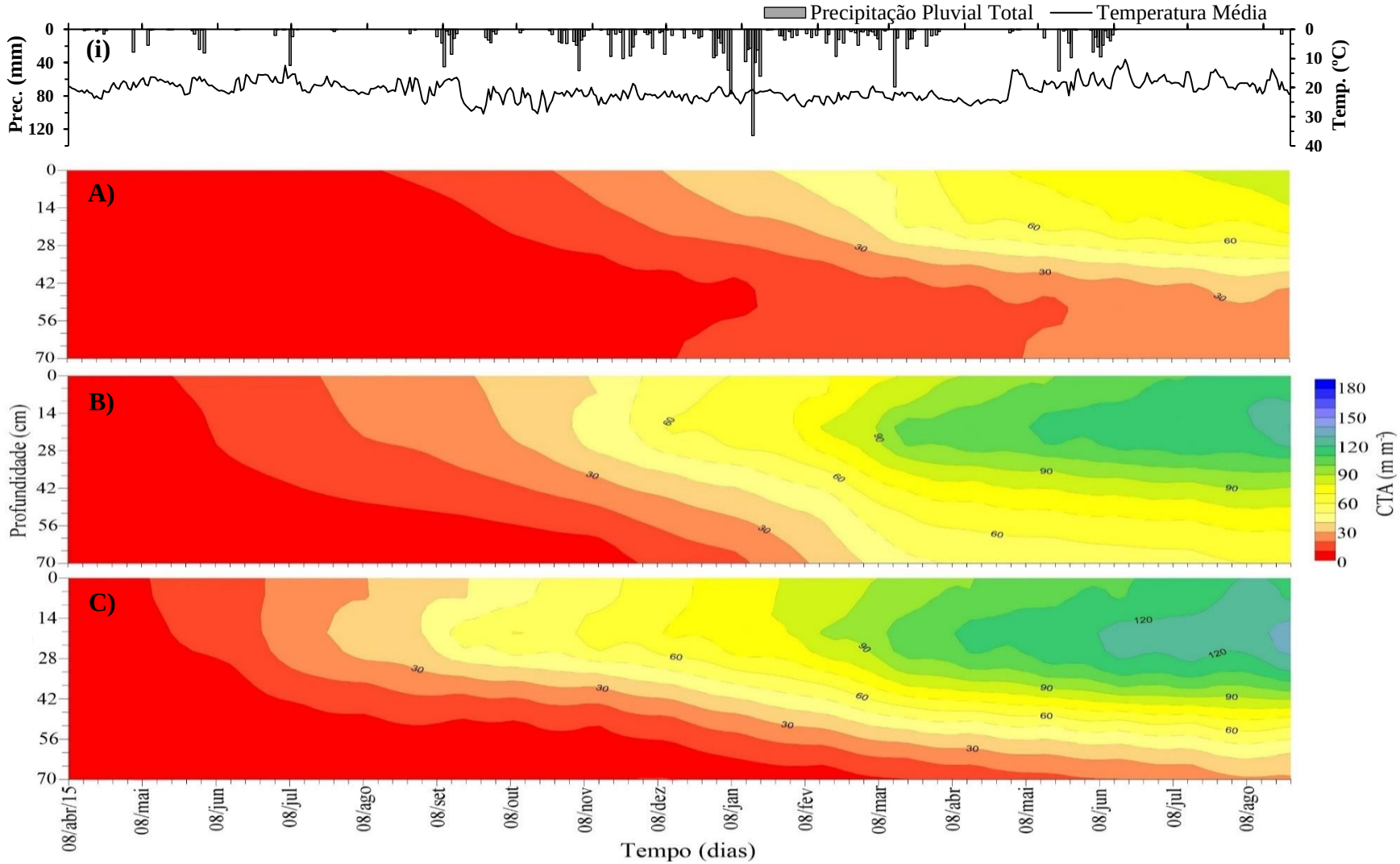


Figura 3.19 - Comprimento total acumulado (CTA) de raízes decompostas (n=5) à 1,9 m (A), 4,3 m (B) e 7,5 m (C) de distância às linhas dos eucaliptos em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta no período de manejo e uso do solo sob pastejo de bovinos de corte



3.3.3.3 Distribuição das raízes vivas em classes de diâmetro

O diâmetro das raízes do eucalipto foi maior quando comparado ao das gramíneas e das raízes ectomicorrizadas (Figura 3.20). Ao longo do tempo, entre 19 e 28 %, 30 e 46 %, e 30 a 40 % das raízes do eucalipto apresentaram diâmetros nas classes de 1-2 mm, 0,5-1 mm, e menores que 0,5 mm, respectivamente (Figura 3.20 F). Houve algumas variações ao longo do tempo havendo incrementos nos diâmetros das raízes de gramíneas (Figura 3.20 A, B, C, D), entretanto entre 2 e 12 %, 16 e 43 %, e 50 a 80 % apresentaram diâmetros nas classes de 1-2 mm, 0,5-1 mm, e menores que 0,5 mm, respectivamente. As raízes associadas às ectomicorrizas apresentaram menor diâmetro (Figura 3.20 E), sendo que entre 1 e 8 % pertenceram a classe 0,5-1 mm enquanto que entre 92 a 96 % das raízes apresentaram diâmetros inferiores à 0,5 mm. Quando considerado todo o período avaliado as médias de distribuição para as classes de 1-2 mm, 0,5-1 mm, e menores que 0,5 mm foram, respectivamente, as seguintes: (i) 0, 3 e 97 % para as raízes associadas às ectomicorrizas; (ii) 7, 35 e 58 % para as raízes das gramíneas; e, (iii) 23, 41 e 36 % para as raízes do eucalipto.

3.3.3.4 Ciclagem do sistema radicular

Do total das raízes, a porcentagem no comprimento decomposto foi maior no sistema de ILPF (45 %) seguida pelo ILP (30 %) e pela pastagem extensiva (26 %) ao final dos dois anos de avaliação (Figura 3.21). No sistema ILPF a proporção de raízes decompostas foi similar entre as posições 7,5 (48 %) e 4,3 m (49 %) das linhas do eucalipto, enquanto que este valor reduziu para 36 % na posição 1,9 m da linha de eucalipto.

A dinâmica de ciclagem das raízes finas foi alterada pelos sistemas integrados de produção. O tempo de residência das raízes finas foi maior na pastagem extensiva (247 dias) seguido pela ILP (237 dias) e ILPF (212 dias), apresentando taxas de ciclagem (*turnover*) de 1,48, 1,54 e 1,72 ano^{-1}, na ILP, pastagem extensiva e ILPF, respectivamente (Tabela 3.6). A taxa de ciclagem das raízes na ILPF foi maior ao centro da entrelinha (1,96 ano^{-1} e tempo de residência de 186 dias) seguida pela da distância de 1,9 m (1,72 ano^{-1} e tempo de residência de 212 dias). Na posição 4,3 m das linhas do eucalipto verificou-se a menor taxa de ciclagem das raízes (1,62 ano^{-1}), resultando em um tempo de residência médio de 225 dias.

Figura 3.20 - Distribuição em porcentagem do comprimento total acumulado vivo (CTAV) de distintos calibres de diâmetro de raízes vivas (± erro padrão; n=5) ao longo de dois anos de uso e manejo do solo de gramíneas na área de pastagem extensiva (A), gramíneas na integração-lavoura-pecuária (B), todas as raízes na integração lavoura-pecuária-floresta (C), bem como de gramíneas (D), ectomicorrizadas (E) e de eucalipto na integração lavoura-pecuária-floresta (F)

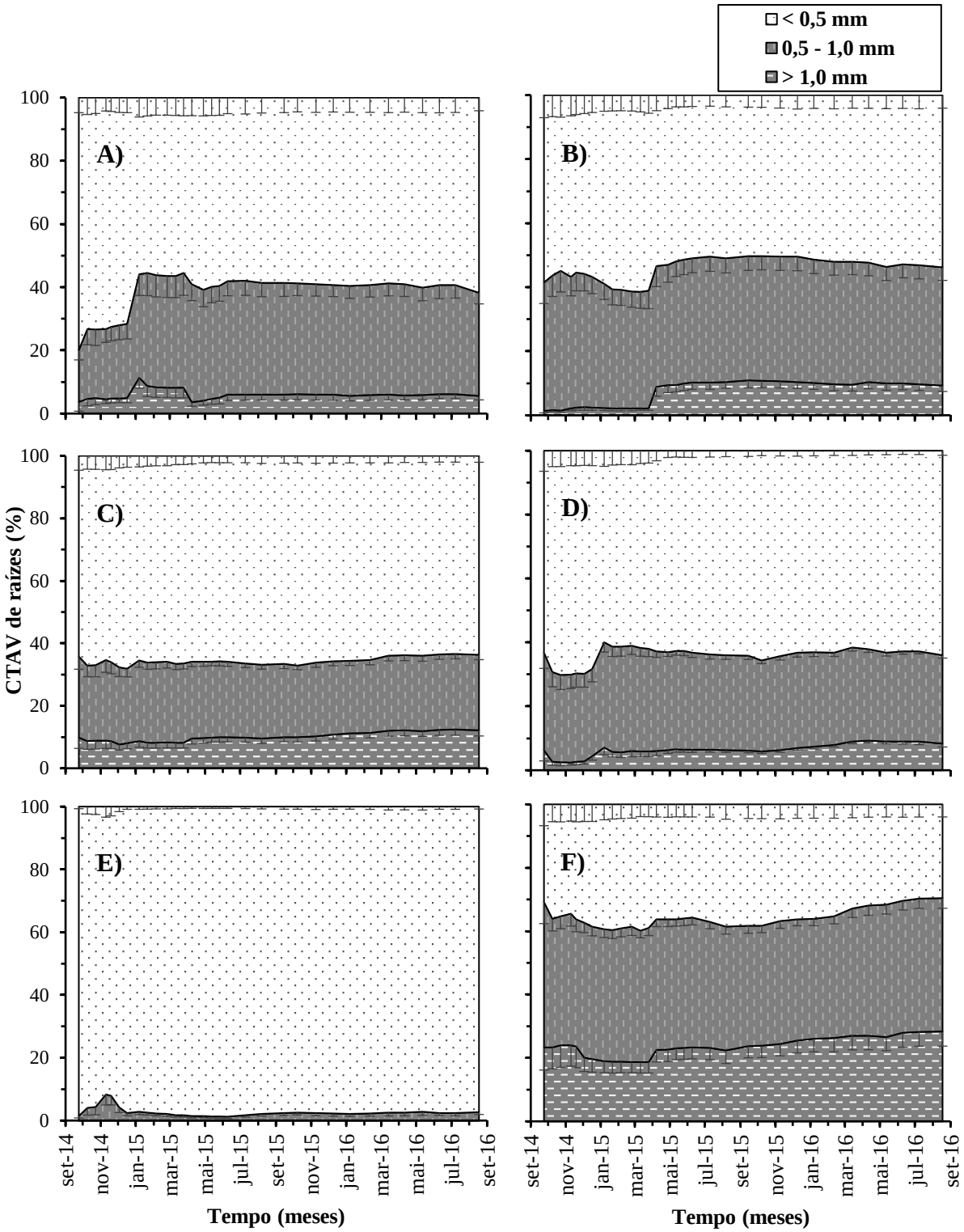
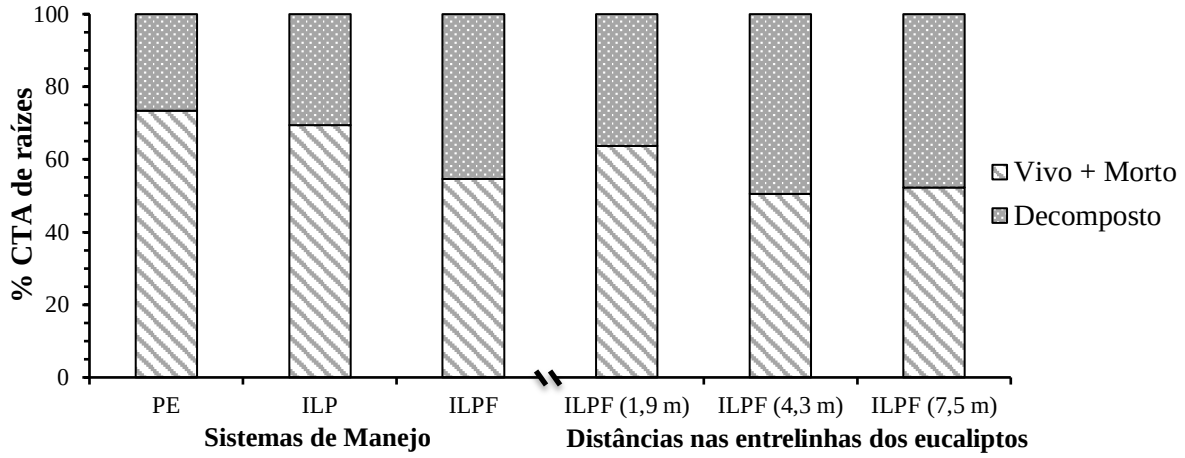


Figura 3.21 – Porcentagem do comprimento total acumulado (CTA) vivo + morto, e decomposto de raízes finas nos sistemas com pastagem de manejo extensivo (n=5), com integração lavoura-pecuária (n=5) e integração lavoura-pecuária-floresta (n=15), e à 1,9 m (n=5), 4,3 m (n=5) e 7,5 m (n=5) de distância às linhas dos eucaliptos no sistema de integração lavoura-pecuária-floresta



A taxa de ciclagem das raízes foi distinta entre os grupos e por vezes, entre as classes de diâmetro, das raízes avaliadas (Tabela 3.7). Independentemente das classes de diâmetro, as raízes finas das gramíneas apresentaram a maior taxa de ciclagem (1,96 ano^{-1}), seguida pelas taxas das raízes do eucalipto (1,73 ano^{-1}) e as associadas às ectomicorrizas (1,31 ano^{-1}), havendo um gradiente de tempo de residência das raízes no solo entre os grupos avaliados. O aumento do diâmetro radicular (eucalipto e gramíneas) favoreceu maior período de residência, ou seja, entre a emergência e a decomposição das raízes no solo. Entretanto, as raízes do eucalipto de diâmetros de 0,5-1,0 mm e 1,0-2,0 mm, permaneceram 91 e 149 dias, respectivamente, a mais quando comparadas as raízes de mesmo diâmetro das gramíneas.

Tabela 3.6 – Tempo de residência (dias), taxa de ciclagem (ano^{-1}), decomposição (%) e número de raízes observadas ao longo de dois anos em sistemas com pastagem de manejo extensivo (PE), integração lavoura-pecuária (ILP) e integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF).

	Sistemas avaliados			**Entrelinha da ILPF**		
	PE	**ILP**	**ILPF**	**1,9 m[§]**	**4,3 m**	**7,5 m**
Tempo de residência (dias)	247±3 A	237±2 B	212±1 C	212±2 B	225±1 A	186±1 C
Taxa de ciclagem (ano^{-1})	1,48	1,54	1,72	1,72	1,62	1,96
Raízes decompostas (%)	28	45	46	39	48	51
Raízes avaliadas (#)	3589	22559	32097	6988	13459	11650

[§]1,9, 4,3 e 7,5 m correspondem as distâncias às linhas do eucalipto. Letras maiúsculas diferentes na linha representam diferenças significativas pelo teste de Tukey ($p<0.05$). Camada de solo avaliada de 0-0,70 m.

Tabela 3.7 – Tempo de residência (dias), taxa de ciclagem (ano^{-1}), decomposição (%) e número de raízes observadas ao longo de dois anos em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) caracterizando espécies vegetais e classes de diâmetro radicular.

		Tempo de residência *(dias)*	**Taxa de ciclagem** *(ano^{-1})*	**Raízes decompostas** *(%)*	**Raízes avaliadas** *(#)*
Grupos	Gramíneas	186±1 C*	1,96	42	23050
	Eucalipto	211±4 B	1,73	66	1746
	Ectomicorrizadas	279±2 A	1,31	81	5337
Gramíneas	0,0-0,5 (mm)	185±1 B	1,97	42	19871
	0,5-1,0 (mm)	201±2 B	1,82	43	3036
	1,0-2,0 (mm)	251±11 A	1,45	20	143
Eucalipto	0,0-0,5 (mm)	183±4 C	1,99	71	1423
	0,5-1,0 (mm)	292±10 B	1,25	53	276
	1,0-2,0 (mm)	400±24 A	0,91	40	47

*médias seguidas por letras maiúsculas diferentes na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey-Kramer ($p<0,05$). Camada de solo avaliada de 0-0,70 m.

3.4 Discussão

3.4.1 Período da lavoura

3.4.1.1 Adoção do sistema de integração lavoura-pecuária (ILP): alterações na qualidade física do solo e no crescimento radicular das plantas

O pisoteio intensivo durante a fase de pastejo dos bovinos de corte em sistema ILP pode incrementar a densidade do solo, impactando negativamente a qualidade estrutural do solo (MORAES et al., 2014). O solo quando compactado, apresenta redução da macroporosidade (PIANO et al., 2015), condutividade hidráulica saturada, e infiltração de água (CECAGNO et al., 2017), além de alteração nos fluxos de calor (BONETTI; ANGHINONI; ZULPO, 2017). No entanto, durante o período agrícola em sistemas integrados, associado às práticas conservacionistas (e.g. sistema plantio direto), os impactos negativos do pisoteio dos animais podem ser atenuados ou totalmente eliminados (CONTE et al., 2011). Alterações nos atributos físicos do solo como aumento da densidade e redução dos conteúdos de água podem reduzir o crescimento radicular (VALENTINE et al., 2012), e consequentemente modificar a arquitetura

do sistema radicular (JIN et al., 2015), limitando a profundidade efetiva do sistema radicular no perfil do solo (MORAES et al., 2018).

Entretanto, nesse estudo o sistema de pastagem extensiva, utilizado como referência, recebeu manejo com apropriada lotação de animais no pasto (i.e. 1 UA ha^{-1}), e encontra-se isento de sinais de degradação. Assim, a densidade do solo na pastagem extensiva não foi limitante ao crescimento radicular da braquiária, e encontra-se abaixo dos valores comumente sugeridos como críticos ao crescimento das plantas em solos de textura média (1,60 Mg m^{-3} (REYNOLDS et al., 2002; REICHERT; REINERT; BRAIDA, 2003). Dessa forma, a adoção do sistema ILP não refletiu em reduções dos valores de densidade do solo (Figura 3.2). Portanto, sugere-se que a estrutura do solo não foi fator determinante para as diferenças verificadas no crescimento radicular entre esses dois sistemas (pastagem extensiva e ILP). Em camadas mais profundas que 0,20 m os valores de densidade do solo apresentaram tendência de diminuição, não havendo camada de impedimento ao desenvolvimento das raízes.

Entretanto, a pastagem extensiva, apresentou menores teores de umidade do solo, com concentração preferencial em camadas mais superficiais. Paralelamente, a área de ILP recebeu adubação e calagem associadas ao cultivo da lavoura, práticas culturais ausentes no sistema extensivo. Embora sem diferenças para a estrutura do solo, a ILP também apresentou melhor distribuição da água no perfil do solo, com maiores conteúdos de água em profundidade quando comparada a pastagem extensiva. Tais fatores sob esse sistema conservacionista favorecem um rápido estabelecimento e desenvolvimento das culturas cultivadas, como o milho e/ou braquiária (MORAES et al., 2014; SALTON et al., 2014). Consequentemente, pode haver aumentos na biomassa das plantas e em paralelo na produção de raízes finas (COSTA et al., 2014). Nesse mesmo experimento na área de ILP foi verificada produção de 12,1 Mg ha^{-1} de massa seca da parte aérea em ano chuvoso (2014/2015) e 8,1 Mg ha^{-1} em período com déficit hídrico (2013/2014) (PEZZOPANE et al., 2017). A boa disponibilidade hídrica, exceto para um período de contido na segunda quinzena de janeiro que também coincidiu com o maior crescimento radicular na área de ILP na safra de 2014/2015 (Figura 3.6i C).

A área de pastagem extensiva produziu raízes de forma mais homogênea ao longo do tempo, pois ao contrário da área de ILP, a pastagem não foi dessecada e também não foram semeadas novas culturas. O cultivo do milho+braquiária na ILP favoreceu um pico produtivo de raízes entre 31-65 dias após a semeadura do milho (Figura 3.5 C). Nesse período a ILP acumulou entorno de nove vezes o comprimento total produzido (CTAP) de raízes finas (93 m m^{-2}) quando comparada a pastagem extensiva (10 m m^{-2}). Provavelmente essa alta produtividade relaciona-se com os estádios fenológicos de rápido desenvolvimento do milho

contida entre o estádio vegetativo (V7) e o pendoamento (VT). Nestes estádios fenológicos a cultura apresenta maior demanda hídrica e nutricional (MAGALHÃES; DURÃES, 2006). Assim, a planta estimula o crescimento radicular a fim de aumentar a área radicular para absorção de água e nutrientes (LYNCH, 2013), para suprir a demanda transpirativa da parte aérea (MARTINS et al., 2013) e produção de biomassa (LIEDGENS; RICHNER, 2001a), consequentemente possibilitando a formação e enchimento de grãos. Principalmente após o estádio reprodutivo R1 (embonecamento e polinização – após 05/02/2015) a taxa de crescimento radicular na ILP diminuiu, indicando que com o sistema radicular já formado, a cultura redistribui o uso dos nutrientes, sendo usados principalmente para a formação dos grãos.

Nos sistemas integrados de produção (ILP e ILPF) o período com maior crescimento da braquiária está relacionado com a menor competição por radiação solar com as outras culturas (i.e. milho ou eucalipto), assim, no final do ciclo do cultivo do milho a braquiária apresenta maior desenvolvimento de sua parte aérea (PORTES; ISABEL; CARVALHO, 2000). Nesse período a eficiência na interceptação solar pela cultura do milho diminui com a menor atividade fotossintética e senescência das folhas (MÜLLER; BERGAMASCHI, 2005), portanto, a competição do milho com a braquiária é reduzida. Consequentemente, o crescimento radicular dessa cultura pode aumentar nesse período, entrando em concordância com os resultados observados nos estágios fenológicos reprodutivos da cultura do milho (65-128 dias). Nesse período um maior desenvolvimento radicular na área de ILP (22,6 cm m^{-2} dia^{-1}) em comparação a pastagem extensiva (10,7 cm m^{-2} dia^{-1}) foi observado (Figura 3.5C).

Na ILP o crescimento radicular das culturas também foi mais profundo (atingindo 0,7 m) quando comparado a pastagem extensiva (0,42 m), principalmente a partir do estágio V7 da cultura do milho (Figura 3.6 A,C). Embora a disposição dos tubos (Figura 3.1 B) possa ter favorecido a concentração das raízes entre 0,29 e 0,42 m (Figura 3.6 B) o desenvolvimento radicular em profundidade pode ser apontado como uma grande vantagem do sistema de ILP. Estudos prévios têm sugerido que o sistema radicular de espécies incluídas em SIPAs (e.g ILP) tem potencial para explorar eficientemente camadas mais profundas do perfil do solo (CARVALHO et al., 2010b, 2014; BIELUCZYK et al., 2017b), favorecendo a ciclagem dos nutrientes (CARVALHO et al., 2010b) oriundos da adubação da lavoura (SALTON et al., 2014), bem como, reciclando nutrientes lixiviados para camadas profundas, comumente pouco exploradas pelas culturas anuais.

Os resultados da distribuição radicular das raízes do milho no perfil do solo têm apresentado ampla variação na literatura. Alguns trabalhos mostraram que em que mais de 80% da biomassa das raízes (finas e grossas) do milho estão na camada de 0-0,25 m (HIRTE et al.,

2018), outros em que ocorreu incrementos na densidade das raízes até 0,25 m, decrescendo em maiores profundidades (LIEDGENS; RICHNER, 2001b), bem como maior densidade de raízes nas camadas de 0,08-0,16 m e 0,16-0,24 m quando comparada a superficial em solos de textura franco-arenosa com gotejamento e/ou irrigação reduzida (CHILUNDO et al., 2017).

A avaliação do crescimento radicular da cultura do milho utilizando a técnica do minirhizotron pode apresentar discrepância em relação aos resultados obtidos utilizando métodos destrutivos de amostragem de raízes (MAJDI; SMUCKER; PERSSON, 1992). Por vezes a quantidade e o comprimento de raízes em camadas superficiais são subestimadas em função do menor contato do solo com os tubos de acrílico, ou mesmo pelo distúrbio mais frequente nesses locais (BLACK et al., 2017). Entretanto, a dinâmica radicular do milho, e de outras gramíneas ao longo do perfil também pode estar sujeita as variações nos conteúdos de água (CHILUNDO et al., 2017) e nutrientes no perfil do solo (HIRTE et al., 2018), ou até mesmo resultante das ramificações das raízes axiais em profundidade. O alcance de camadas mais profundas pelo sistema radicular normalmente acontece abaixo da linha de semeadura do milho (LIEDGENS; RICHNER, 2001b). Nesse contexto as instalações horizontais (paralelas a superfície do solo) ou diagonais (45º) dos tubos de acrílico se tornam importantes para interceptar o crescimento das raízes, evitando crescimentos preferenciais de raízes ao longo da superfície do tubo, visto ao geotropismo positivo do sistema radicular (JOHNSON et al., 2001; LIEDGENS; RICHNER, 2001b).

No período total de avaliações desse ciclo (182 dias) o CTAP de raízes finas do milho + braquiária na ILP foi 2,8 vezes superior quando comparado ao da área de pastagem extensiva (Tabela 3.2). A produção média diária da ILP foi de 85 cm m^{-2} dia^{-1} durante o cultivo do milho (128 dias), enquanto nesse mesmo período a média da área de pastagem extensiva foi de 19 cm m^{-2} dia^{-1}. Portanto, mesmo que a metodologia por vezes subestime o comprimento radicular nas camadas superficiais, principalmente sob a disposição do tubo sob a linha do milho nesse estudo, ficou evidente que as espécies sob ILP desenvolveram sistema radicular mais profundo e com maior CTAP de raízes quando comparada a pastagem extensiva.

3.4.1.2 Adoção do sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF): alterações na qualidade física do solo e no crescimento radicular das plantas

A intensificação do sistema ILP com a introdução do componente arbóreo no ILPF resultou em menores conteúdos de água no solo (Figura 3.4) e menor produtividade de raízes finas no período de lavoura (Figura 3.5). No período avaliado a ILPF acumulou 59,3 m de raízes por m^2 de solo, valor bem inferior quando comparado a área de ILP, com 128,8 m m^{-2}. A espécie

arbórea do eucalipto, no arranjo de linhas simples de 15 x 2 m, além de reduzir os conteúdos de água no solo ao longo do tempo (Figura 3.4) e aumentar a densidade do solo em período anterior ao cultivo da lavoura (Figura 3.2), ocasionou também a redução da radiação fotossintética ativa para as plantas (PEZZOPANE et al., 2017). Exceto para a umidade do solo, os efeitos da ILPF nesses atributos físicos ocorreram principalmente em locais mais próximos às linhas do eucalipto, similar a redução da produtividade das culturas agrícolas e pastagem devido ao sombreamento, reportada por Pezzopane et al. (2017). Redução na produtividade das culturas anuais e da pastagem em sistemas silvipastoris e agrossilvipastoris que incluem o eucalipto, em diversos arranjos, também têm sido observadas sob diferentes condições edafoclimáticas (PRASAD et al., 2010; PAULA et al., 2013).

Os locais sombreados são preferidos dos bovinos para pastejo e movimentação, principalmente nas horas mais quentes do dia (MONTEIRO; WERNER, 1989) para manter seu conforto térmico. Antes do cultivo do milho o local esteve dois anos sob pastejo, e o pisoteio pelos bovinos, preferencial perto das linhas do eucalipto, pode ter incrementando os valores de densidade do solo, observados nessa pesquisa (Figura 3.2 e 3.3). As limitações físicas como o estresse frente a menor disponibilidade de água (BENGOUGH et al., 2011), os impedimentos causados pela maior densidade do solo (DEXTER, 2004; CHEN; WEIL, 2011), e principalmente, a limitação na fotossintética devido a menor entrada de radiação fotossintética ativa no sistema (RIGHI et al., 2015) são fatores que reduzem a biomassa aérea e radicular, bem como a produtividade das culturas agrícolas, como o milho.

A ILPF teve impactos maiores sobre a produtividade, quando comparada à ILP principalmente em ano sob forte déficit hídrico (PEZZOPANE et al., 2017) quando o eucalipto era mais jovem (3 anos). Devido à menor transmissão da radiação fotossintética ativa na ILPF, sob ILPF a biomassa da parte aérea da braquiária, nas entrelinhas do milho, apresentou menor germinação e desenvolvimento quando comparada a da área sob ILP. Fator esse que também pode ter desfavorecido maior crescimento radicular sob sistema de ILPF. Em paralelo, há evidencias que o eucalipto pode desencadear efeitos alelopáticos sobre a pastagem, sendo um dos principais a redução na germinação das sementes (SASIKUMAR; VIJAYALAKSHMI; PARTHIBAN, 2001; CARVALHO et al., 2015).

O acúmulo de raízes variou ao longo da entrelinha dos eucaliptos no sistema ILPF (Figura 3.5), reduzindo a PDRF e CTAP das raízes das gramíneas (milho+braquiária) próximo das linhas das árvores. O período de principal limitação no sistema foi justamente entre 30-65 dias da idade da cultura do milho (Figura 3.5D, Tabela 3.1) quando a cultura carece de maior absorção de água e nutrientes (MAGALHÃES; DURÃES, 2006). Embora com menor

crescimento radicular, ao longo do tempo na ILPF houve crescimentos similares à ILP, provavelmente relacionado com as fases fenológicas do ciclo de desenvolvimento determinado da cultura do milho.

Uma das vantagens de se adotar a ILPF sob área de ILP, e em relação à pastagem extensiva, foram os incrementos em diversidade biológica e radicular. Embora a grande maioria das raízes acumuladas na área de ILPF tenha sido oriunda das gramíneas (74 %) também foram observadas além das raízes do eucalipto (17 %), associações com ectomicorrizas (9 %) presentes nas três distâncias avaliadas na entrelinha do eucalipto. Nesse estudo o sistema radicular do eucalipto se desenvolveu principalmente em período inicial de avaliação (antes da semeadura do milho) o que ainda pode, em parte, estar relacionado com o período de acomodação da terra circundante aos tubos de acrílico dos minirhizotrons. A abertura dos orifícios no solo promove o corte das raízes ali presentes, havendo um estímulo inicial de crescimento, o que tende a se normalizar após alguns meses de instalação, dependendo do solo e clima (REWALD; EPHRATH, 2013). Como as gramíneas foram dessecadas nos sistemas integrados de produção, o corte dessas raízes não promoveu estímulos de crescimento das mesmas.

O CTAP de raízes do eucalipto foi maior para as distâncias de 7,5 e 1,9 m da linha do eucalipto. O mesmo padrão foi verificado para o CTAP das ectomicorrizas, que sempre estiveram associadas ao sistema radicular do eucalipto, não sendo observadas associações às gramíneas nas imagens produzidas. Embora desenvolva associações com ectomicorrizas, no arranjo espacial estudado na ILPF o eucalipto foi um fator limitante ao desenvolvimento radicular das gramíneas (milho e braquiária) (Tabela 3.1). Entretanto, considerando a dinâmica temporal, ao final do ciclo (66-128 dias) observou-se maior acúmulo de raízes próximo a linha do eucalipto (1,9 m). Nesse caso, este resultado pode associado ao menor porte vegetativo das plantas de milho (PEZZOPANE et al., 2017). A menor biomassa do milho próximo às árvores pode ter favorecido um melhor crescimento da braquiária nas suas entrelinhas. Em paralelo, o atraso no desenvolvimento do milho em função ao sombreamento pelo eucalipto também pode ter contribuído para um desenvolvimento mais tardio das raízes do milho.

Próximo à linha de eucalipto na ILPF não ocorreu crescimento preferencial das raízes nas camadas intermediárias dos tubos (Figura 3.6B), diferindo do padrão observado nas demais distâncias na ILPF e no sistema ILP. Isso indica que na distância de 1,9 m o sistema radicular do milho restringiu-se às camadas superficiais do solo. Embora durante o período de semeadura-colheita do milho o CTAP de raízes finas na ILPF (49 m m^{-2}) tenha sido maior que

a pastagem extensiva (24 m m^{-2}), durante todo o período avaliado dessecação da braquiária à colheita do milho o CTAP de raízes entre essas duas áreas não se diferiu estatisticamente.

3.4.2 Período de pastagem

3.4.2.1 Qualidade física do solo e os efeitos no crescimento radicular das plantas sob período de pastagem em sistema de integração lavoura-pecuária (ILP)

De forma geral o período de pastejo aumentou a densidade dos solos nesses sistemas na camada superficial (0-0,05 m), o que é comumente encontrado em trabalhos sobre sistemas integrados de produção em decorrência ao pisoteio dos animais sobre o solo (CARVALHO et al., 2010). Estes valores de densidade do solo observados nos tratamentos não limitaram o crescimento radicular da pastagem (braquiária), além disso, ao longo do tempo devido aos ciclos de umedecimento e secamento há intensivos processos de resiliência do solo, os quais recuperam naturalmente a densidade do solo (BONETTI et al., 2017), processo este comumente observado em sistemas integrados de produção agropecuária (CONTE et al., 2011).

O conteúdo de água em todo o perfil do solo (Figura 3.9), conforme esperado, variou ao longo do ciclo de cultivo devido aos processos de precipitação, evaporação do solo, drenagem profunda e transpiração pelas plantas (VAN DAM; FEDDES, 2000). A ILP e pastagem extensiva só se diferenciaram na distribuição e conteúdos médios de água no perfil do solo em períodos de déficit hídrico (estação seca). Dessa forma, entre os meses de abril a setembro de 2015 e de 2016 o solo da área de pastagem extensiva apresentou maior umidade que o da ILP (Figura 3.9 D, Tabela 3.3), provavelmente pela menor quantidade de raízes (Figura 3.11 A) ocorrendo uma menor absorção de água pelas plantas, principalmente nas camadas superficiais de 0-0,14 e 0,15-0,28 m (Figura 3.9 A, B).

A *Urochloa brizantha*, utilizada nos SIPAs avaliados, é uma das espécies de pastagens tropicais perenes que apresentam maior tolerância ao déficit hídrico (PEZZOPANE et al., 2015). Esta característica corrobora os resultados de maior produção de biomassa da parte aérea na ILP (PEZZOPANE et al., 2017), além de maior quantidade de raízes finas no início dos períodos secos de 2015 e 2016 dessa área, quando comparada a área de pastagem extensiva com *Urochloa decumbens* (Figura 3.12 C). Assim, na estação seca desses anos a ILP produziu mais raízes (Tabela 3.3), e conteve uma maior taxa de lotação animal, sendo todos esses fatores supracitados favoráveis à uma maior extração e evapotranspiração de água nesse sistema intensivo (YIMAM; OCHSNER; KAKANI, 2015; PEREYRA et al., 2017).

Os picos de produção de raízes na ILP foram entre os meses de abril e maio de 2015, outubro e novembro de 2015 e abril e maio de 2016, enquanto a pastagem extensiva produziu raízes de forma mais uniforme ao longo dos meses (Figura 3.12). Nos meses de abril e maio começou a haver a redução das chuvas (Figura 3.9i), e no mês de outubro e novembro foi quando se iniciaram incrementos da disponibilidade hídrica do solo nos sistemas estudados (Figura 3.9 A, B, C). Tais períodos de transição de estação chuvosa–seca e seca-chuvosa estiveram associados aos efeitos no desenvolvimento radicular da pastagem nos sistemas intensivos de produção agropecuária (ILP e ILPF).

A primeira transição no ano de 2015 coincidiu com o período de pós colheita do milho na ILP, onde o aumento da taxa de crescimento da braquiária deve estar associado à: (i) maior radiação fotossintética ativa interceptada pela pastagem (PEZZOPANI et al., 2017); (ii) ausência de competição interespecífica do milho com a braquiária; (iii) absorção e ciclagem de nutrientes disponíveis no solo provenientes da adubação previamente realizada no milho (SALTON et al., 2014), e (iv) adubação nitrogenada de cobertura realizada na primeira semana após a colheita do milho.

Entretanto, para as duas outras transições (seco-chuvoso em 2015, e chuvoso-seco em 2016) os efeitos nos picos de produção provavelmente sejam decorrentes da sazonalidade. Há uma relação com a melhor fertilidade do solo e/ou espécie de braquiária, já que na área de pastagem extensiva esse padrão não foi observado (Figura 3.12 A). Ao longo das estações ao mesmo tempo em que a disponibilidade hídrica foi parcialmente reduzida no solo, a produção radicular foi incrementada. Em alguns casos, condições parciais de estresse hídrico e nutricional podem favorecer gastos de carbono com o sistema radicular, principalmente em camadas profundas, de espécies com boa plasticidade fenotípica, tais como as braquiárias (GUENNI; BARUCH; MARIN, 2004; ZONTA et al., 2006). Porém, quando este déficit hídrico é elevado e associado às baixas temperaturas (e.g. junho a setembro), os processos de absorção e translocação de nutrientes se tornam menos ativos, reduzindo o metabolismo das plantas (DUPAS et al., 2010; PEDREIRA et al., 2011), sendo o crescimento radicular também fortemente reduzido (PEZZOPANE et al., 2015).

A temperatura do ar limitante para o desenvolvimento da *Urochloa brizantha* é de 10 ºC e o crescimento da biomassa praticamente nulo entre 10 e 15 ºC (COSTA et al., 2005), o que pode ter limitado o crescimento de raízes entre junho a agosto (Figura 3.12), meses que comumente apresentaram temperaturas abaixo de 15ºC (Figura 3.10i). Entretanto, após esse período de “dormência” das plantas as primeiras chuvas associadas às maiores temperaturas (a partir de setembro) restabeleceram as condições favoráveis ao desenvolvimento das plantas.

Assim a rebrota da parte aérea da pastagem foi acompanhada pelos incrementos na produção radicular.

Em ambas as estações o crescimento radicular em profundidade foi maior na ILP (Figura 3.13 A, B) e principalmente na estação seca a área de ILP produziu mais raízes que a pastagem extensiva (Figura 3.12 A, C), sendo essas diferenças reduzidas no período das chuvas. Ao final do ciclo a pastagem da ILP apresentou acúmulo de mais de 110 m m^{-2} de raízes finas em todas as camadas avaliadas (Figura 3.13 B), enquanto na pastagem extensiva o CTAP foi inferior a 60 m m^{-2} em camadas mais profundas a 0,42 m. Ao mesmo tempo, ao final do ciclo o comprimento total acumulado e decomposto de raízes finas foi cerca de 1,65 e 2,25 vezes superior na área de ILP (Tabela 3.4).

O efeito residual dos adubos da lavoura na pastagem associado a maior ciclagem de nutrientes (SALTON et al., 2014; ASSMANN et al., 2017), além das adubações nitrogenadas de cobertura sobre a pastagem são fatores que incrementam a produção de forragem nos sistemas integrados de produção (CARVALHO et al., 2010; SALTON et al., 2014; SOUSSANA; LEMAIRE, 2014; PEZZOPANE et al., 2017). Em paralelo na ILP os efeitos do manejo favorecem uma maior produção de raízes, pois o sistema produz mais biomassa que sustenta uma maior lotação de animais sob pastejo. Os animais atuam como catalisadores do sistema (ANGHINONI et al., 2013), e disponibilizam os nutrientes, estimulando desta maneira a renovação radicular da pastagem (SOUZA et al., 2009).

3.4.2.2 Qualidade física do solo e os efeitos no crescimento radicular das plantas sob período de pastagem em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF)

Considerando as distâncias na entrelinha do eucalipto, os menores teores de umidade foram observados mais distantes da linha de cultivo, ou seja, a 7,5 m do eucalipto (Figura 3.10 C). Este fato se dá à maior quantidade de raízes de eucalipto, ectomicorrizas e raízes de braquiária (Figura 3.11 B) absorvendo água e nutrientes em grandes quantidades.

De forma similar a todos os sistemas a densidade do solo da área de ILPF foi aumentada durante o período de pastejo na camada de 0-0,05 m, principalmente perto da linha do eucalipto onde os animais costumam pastejar e descansar com maior frequência (MONTEIRO; WERNER, 1989). A dinâmica da umidade do solo da ILPF ao longo do tempo (Figura 3.9 D) também seguiu o mesmo padrão ao verificado na área de ILP, já discutido anteriormente. Entretanto, a área de ILPF apresentou os menores conteúdos de água no solo entre as áreas avaliadas em todo o período avaliado, seja em estações secas, seja na estação chuvosa. Principalmente os períodos com baixo volume de chuvas (e.g. agosto e outubro de 2015, e maio,

julho e agosto de 2016) os valores de umidade do solo da ILPF foram inferiores a 0,20 m m^{-3} em todo o perfil avaliado. Na ILP e pastagem extensiva esse padrão ficou restrito até a profundidade de 0,42 m, com maior conteúdo de água do solo em camadas mais profundas. Estima-se que planta de eucalipto, dependendo da espécie, pode consumir uma quantidade variável de 17 a 285 kg dia^{-1} de água dependendo da idade, do manejo e da espécie (WULLSCHLEGER; MEINZER; VERTESSY, 1998).

Em revisão sobre o uso total do uso de água por plantas inteiras de eucalipto Wullschleger et al. (1998) verificaram que plantas de 23 m *Eucalyptus grandis* consumiram 94 kg dia^{-1} de água. Extrapolando para as 333 árvores por hectare desse estudo o consumo seria de 31302 kg ha^{-1}, ou seja, uma lâmina aproximada de 3,1 mm diários sob condição de boa disponibilidade hídrica. A substituição de pastagens por plantações de eucalipto, em locais com precipitação anual acima de 750 mm, incrementa o uso de água e, nessas condições, a maioria das relações evapotranspiração/precipitação em cultivos puros do eucalipto excede 0,90, o que demonstra elevado consumo por essa espécie (GONÇALVES et al., 2017). Tais valores podem ser ajustados para os cultivos do eucalipto em sistemas integrados de produção, entretanto antecipadamente, esse elevado uso da água pelo eucalipto explica os menores conteúdos de água sob ILPF em comparação a ILP, principalmente em camadas profundas.

O crescimento acumulado de raízes finas de eucalipto (≤ 5,1 m m^{-2}) e de raízes associadas aos mantos fúngicos das ectomicorrizas (≤ 4,1 m m^{-2}) foram muito baixos embora estiveram presentes em todas as distâncias na entrelinha do eucalipto (Figura 3.15 C, D). Ao final do ciclo de pastejo a soma do acumulado total desses dois grupos equivaleu a apenas 5 % do acumulado total das raízes, ou seja, 95 % do CTAP de raízes no período de pastejo nesse sistema foi de gramíneas. Sob período de pastejo a área de ILPF, embora com algumas variações temporais, o comprimento total acumulado e a produção diária de raízes finas (0-0,70 m) não foi alterado em comparação à ILP em todas as estações avaliadas (Tabela 3.3). Entretanto a distribuição das raízes no perfil se diferiu, sendo que a pastagem na ILP produziu e acumulou de raízes preferencialmente nas camadas superficiais (0-0,14 e 0,14-0,28 m) e a pastagem na ILPF teve seu sistema radicular mais homogeneamente distribuído ao longo de todo o perfil avaliado (0-0,70 m). Na ILPF as distâncias de 7,5 m e 4,3 m foram as que produziram e acumularam mais raízes, sendo o local mais próximo das árvores provavelmente impactado negativamente pela redução da radiação fotossintética ativa (PEZZOPANE et al., 2017) e sendo menos responsivo aos efeitos sazonais.

No período de pastagem na ILPF, embora permaneceram os efeitos do sombreamento na distância de 1,9 m, de forma geral, a *Urochloa brizantha* apresentou alta tolerância à

restrições na transmissão da radiação fotossintética ativa e/ou umidade do solo. Níveis de 30 % (DIAS-FILHO, 2002; ANDRADE et al., 2004) e de 50 % (ANDRADE et al., 2004; MARTUSCELLO et al., 2009) de sombreamento não promoveram efeitos negativos em estudos sobre as respostas fotossintéticas e/ou produção de biomassa da parte aérea da *Urochloa brizantha* sob sistemas silvipastoris. Entretanto, em locais mais próximos as árvores (≤ 2 m de distância) as copas das árvores reduzem fortemente a disponibilidade da luminosidade para as plantas causando alterações morfofisiológicas como reduções da parte aérea (PEZZOPANE et al., 2017) e radicular (PACIULLO et al., 2010) da pastagem.

Diante dos resultados obtidos, destaca-se que a *Urochloa brizantha,* cultivar Marandu é indicada para uso em sistema ILPF, visto as semelhanças de produção radicular com o sistema de integração sem o componente arbóreo (Tabela 3.4). Além disso, adiciona-se que o centro da entrelinha do eucalipto (distância de 7,5 m) acumulou 15 m m^{-2} a mais de raízes finas quando comparada ao sistema ILP (Tabela 3.4). Este resultado é uma evidência de que a interação do eucalipto com a braquiária pode ser positiva para a produção radicular total, desde que sob distância adequada das árvores e/ou ajuste do sombreamento no sistema, por práticas de poda e/ou desbaste. Finalmente salienta-se também que nas distâncias de 4,3 m e 7,5 m na ILPF o comprimento total decomposto radicular foi maior, acompanhando a produção das raízes também maiores nesses locais.

3.4.3 Dinâmica de decomposição das raízes

3.4.3.1 Adoção do sistema de integração lavoura-pecuária (ILP): alterações na dinâmica de decomposição das raízes

As raízes tipicamente contêm células mais lignificadas que os órgãos da parte aérea das plantas (REDIN et al., 2014), o que reduz a velocidade de decomposição (CAMIRÉ; CÔTÉ; BRULOTTE, 1991). Apesar disso, em sistemas conservacionistas, como no sistema plantio direto, as raízes de algumas espécies podem se decompor mais rapidamente que a palhada de cobertura do solo devido ao maior contato das raízes com o solo, bem como o microclima adjacente (i.e. maior umidade que na superfície) (TAHIR et al., 2016). Conhecer a taxa de decomposição das raízes é essencial para determinar o sequestro de C e a ciclagem de nutrientes no solo (SILVER; MIYA, 2001), e consequentemente, serve como um importante indicador para selecionar sistemas de uso e manejos que promovam incremento da matéria orgânica do solo.

A adoção do sistema ILP comparado à pastagem extensiva resultou em maior quantidade de raízes finas produzidas e decompostas (Figura 3.16 A), principalmente nas camadas mais profundas (Figura 3.18 A, B), reduzindo o tempo médio de residência destas raízes no solo em 10 dias (Tabela 3.6). Em ambos os sistemas somente foram observadas raízes de gramíneas, sem associações com ectomicorrizas, sendo sua taxa de ciclagem variável de 1,45 a 1,97 anos^{-1}, com maior tempo de permanência das raízes no solo de acordo com incremento nos diâmetros.

A decomposição de raízes geralmente é incrementada em sistemas com a adoção da rotação de culturas comparado com áreas anteriormente utilizadas para pastagem, pois há maior aporte de biomassa radicular bem como menor recalcitrância das raízes em função da introdução de novas espécies (CONG et al., 2015). Na ILP foi realizada a dessecação da pastagem com uso de herbicida para o cultivo do milho em 2014 e essa cultura foi colhida para a ensilagem em 2015, o que obrigatoriamente ocasionou a morte das raízes dessas espécies. A morte forçada do sistema radicular (e.g. por aplicação de glifosato em pastagens) é um fator que primeiramente acelera a decomposição das raízes e contribui para um acúmulo, com respostas em curto período, de carbono no solo (MCNALLY et al., 2017). A melhor fertilidade do solo verificada para a área de ILP desse estudo associada com a maior oferta energética (e.g. raízes mortas por dessecação da pastagem e/ou colheita do milho) e diversidade de culturas podem incrementar a atividade biológica (MCDANIEL; TIEMANN; GRANDY, 2014), favorecendo a decomposição do sistema radicular nesse sistema em detrimento à pastagem extensiva. Essa decomposição radicular desempenha um papel importante no sistema em reciclar os nutrientes pela mineralização e liberação para absorção pelas plantas ou uso pela biota do solo (CAMPOS; CRUZ; ROCHA, 2017).

Ambos os sistemas, pastagem extensiva e ILP incrementaram cerca de 1,8 vezes a decomposição diária das raízes no período chuvoso, em comparação com a média dos períodos secos. Essa decomposição segue um mesmo padrão para os conteúdos de água disponível no solo (Figura 3.17 A, C, E) e coincide também com os meses mais quentes do ano (outubro a março). Um estudo sobre padrões globais de decomposição de raízes verificou que a evapotranspiração real (que é uma função entre temperatura e precipitação) esteve fortemente correlacionada com a decomposição das gramíneas em geral (SILVER; MIYA, 2001). Efeitos correlatos de elevadas temperaturas (30-40ºC) e umidade do solo na capacidade de campo potencializaram a respiração microbiana e decomposição das raízes sob condições climáticas controladas (CHEN et al., 2000). Os microrganismos do solo quebram ou despolimerizam moléculas maiores da matéria orgânica (tais como raízes mortas) e transformam em

componentes de baixo peso molecular, para assimilar o carbono e nutrientes (CONANT et al., 2011). Além disso, as raízes de menor diâmetro têm maior área superficial exposta aos efeitos climáticos e biológicos, apresentando menor período de vida e maiores taxas de respiração, o que incrementa as taxas de ciclagem (MCCORMACK et al., 2015), resultado que também foi verificado nesse estudo.

3.4.3.2 Adoção do sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF): alterações na dinâmica de decomposição das raízes

A adoção da ILPF, sob área anteriormente utilizada para ILP, incrementou a diversidade de raízes (e.g. raízes do eucalipto e ectomicorrizas associadas), entretanto, reduziu a produção de raízes finas no período da lavoura, embora no período de pastagem não foram verificadas diferenças. Desta forma, somando ambos os períodos (lavoura e pastagem) o comprimento de raízes finas foi em média 27% menor na ILPF comparado a ILP. Por outro lado, a ILPF promoveu maior decomposição das raízes comparada à ILP, resultando em maior taxa de ciclagem e consequentemente menor tempo de resistência das raízes. No entanto devido à presença dos eucaliptos na ILPF há associação das raízes com ectomicorrizas, comumente observada em áreas florestais (LAMBAIS et al., 2017). Assim, neste sistema integrado (ILPF) há indícios de melhoria das condições do solo e incrementos na atividade biológica. As ecotomicorrizas promovem reduções dos estresses abióticos por incrementar o volume de solo explorado pelo sistema radicular das culturas (SCHNEPF et al., 2016), consequentemente incrementa a quantidade de água disponível e nutrientes para absorção pelo eucalipto (JANSA; SMITH; SMITH, 2008).

A maior ciclagem de raízes sob sistema ILPF pode estar atrelada a diferentes fatores e mecanismos, tais como: (i) uma maior atividade de microrganismos e fauna do solo (LAVELLE et al., 1993); (ii) maior restrição hídrica, especialmente sob períodos com menor volume de chuvas, na ILPF favorecendo a desidratação, murcha e morte de raízes (HUANG; FRY, 1998); (iii) a intensidade nos ciclos de umedecimento e secagem foi maior na ILPF, e tais ciclos, preferencialmente a secagem do solo após um período de elevada disponibilidade de água, promovem maior decomposição da matéria orgânica do solo e emissão de C em um processo denominado de “efeito Birch” (JARVIS et al., 2007).

A distância da linha de eucalipto da ILPF influenciou na dinâmica de decomposição radicular, sendo que em distância mais próxima aos eucaliptos verificou-se menor produção e decomposição das raízes finas em relação ao centro da entrelinha. Em locais mais próximos ao eucalipto a transmissão da radiação fotossintética ativa foi menor (PEZZOPANE et al., 2017),

o que pode reduzir a temperatura do solo e consequentemente a atividade microbiana e as taxas de decomposição das frações mais lábeis matéria orgânica do solo (CONANT et al., 2011), tais como as raízes mortas (CAMBARDELLA; ELLIOTT, 1992).

O diâmetro das raízes, as associações destas com fungos ectomicorrízicos, ou mesmo a procedência de diferentes espécies vegetais influencia diretamente nas taxas de ciclagem do sistema radicular (MCCORMACK et al., 2015) e consequentemente da matéria orgânica do solo. Esses fatores são importantes para estimativas da produtividade primária bruta e modelagens dos fluxos de carbono nos ecossistemas (LAMBAIS et al., 2017).

Raízes com maior diâmetro apresentam canais com xilema secundário desenvolvido (HISHI, 2007), com maior capacidade de transporte e concentração de lignina e celulose (MCCORMACK et al., 2015) e consequentemente maior período de vida e menores taxas de ciclagem (FRESCHET; ROUMET, 2017), como também foi verificado nesse estudo. Entretanto, as raízes do eucalipto de diâmetros de 0,5-1,0 mm e 1,0-2,0 mm, apresentaram tempo de residência maior comparado ao tempo das gramíneas. As raízes do eucalipto podem ter menor taxa de ciclagem em decorrência da sua relação C:N que foi aproximadamente 103 enquanto as raízes da braquiária e de milho apresentaram relações C:N de 71 e 34, respectivamente. As raízes do eucalipto também se caracterizam por conter maiores teores de lignina quando comparada ao das gramíneas (WILSON; PETERSON, 1983) fator que juntamente com as menores concentrações de N nas raízes aumentam o período de vida das raízes (MCCORMACK et al., 2015).

Por outro lado, as raízes de eucalipto associadas com mantos fúngicos ectomicorrízicos (Figura S4), predominantemente menores à 0,5 mm (Figura 3.20 E) apresentaram elevado período de residência, maiores que todas as classes de diâmetro das gramíneas e que as raízes de eucalipto menores que 0,5 mm (Tabela 3.7). Incrementos no período de vida de raízes de eucalipto associadas às ectomicorrizas têm sido reportados por estudo em plantações de *Eucalyptus urograndis* cultivado em monocultura, em condição de clima similar a este experimento (LAMBAIS et al., 2017). Nas raízes finas com colonização ectomicorrízica os autores verificaram um período de vida de 497 dias, valor bem superior ao verificado nesse estudo de 279 dias, muito provavelmente devido às práticas de agricultura que aceleram a dinâmica radicular. A presença dessas ectomicorrizas, entretanto, é um benefício ao sistema, pois aumentam potencialmente o sequestro de carbono no solo e a absorção de nutrientes pelas plantas, especialmente aqueles pouco móveis no solo como P e Zn e (MCCORMACK et al., 2015; SCHNEPF et al., 2016).

3.5 Conclusões

A substituição do pastejo extensivo pelo cultivo de milho consorciado com a braquiária incrementou a produção diária de raízes finas e o aprofundamento do sistema radicular, principalmente entre as fases fisiológicas V7 e o pendoamento das plantas do milho. O eucalipto com quatro anos de idade, com espaçamento em linhas simples de 15 x 2 m na integração lavoura-pecuária-floresta, foi um fator limitante ao desenvolvimento radicular das gramíneas (milho e braquiária) sob período de lavoura, principalmente em pontos mais próximos à espécie arbórea. No período da lavoura os parâmetros físicos como a menor umidade do solo e radiação fotossintética ativa, bem como maiores valores de densidade do solo podem ter sido limitantes à produção total de raízes na integração lavoura-pecuária-floresta.

Sob período de pastejo a produção diária de raízes finas foi incrementada por ambos os sistemas intensivos em integração de produção agropecuária. Quando cultivada a pastagem, no quarto e quinto ano de idade do eucalipto espaçado em linhas simples de 15 x 2 m, a integração lavoura-pecuária-floresta produziu a mesma quantidade de raízes finas que a integração-lavoura-pecuária. Durante o ciclo de pastejo o manejo de adubação tanto da fase agrícola quando da pastagem contribuíram para um maior crescimento e aprofundamento do sistema radicular da braquiária. No período de pastagem a intensificação em integração lavoura-pecuária e integração lavoura-pecuária floresta beneficiou o crescimento a aprofundamento radicular com ressalvas para locais mais próximos as linhas dos eucaliptos na integração lavoura-pecuária-floresta.

A colonização ectomicorrízica pode cumprir um papel importante na estocagem do carbono e ciclagem de nutrientes no solo na integração lavoura-pecuária-floresta, único sistema onde foram verificadas tais associações simbióticas. Devido aos incrementos no crescimento e profundidade radicular mais ao centro das entrelinhas do eucalipto, sugere-se o uso de práticas de desbaste e poda das árvores, para otimizar a transmissão da radiação fotossintética ativa, e consequentemente o crescimento das plantas em ambos ciclos de lavoura e pastagem.

A intensificação do sistema de produção, passando de uma pastagem extensiva para sistema ILP e posteriormente para sistema ILPF associou-se à maior taxa de ciclagem do sistema radicular das plantas. A decomposição do sistema radicular das plantas foi mais intensa nas camadas superficiais do solo, entretanto a decomposição das raízes nas camadas mais profundas (0,28-0,70m) permitiu diferenciar os sistemas de produção. Os locais mais próximos aos eucaliptos na integração lavoura-pecuária-floresta reduzem tanto o crescimento quanto a

decomposição de raízes. Ao final dos ciclos de cultivo, o manejo mais promissor em termos de estocagem de C ao solo foi a ILP, pois as raízes das plantas se distribuíram melhor ao longo do perfil do solo avaliado e suas taxas de ciclagem foram intermediárias entre pastagem extensiva e integração lavoura-pecuária floresta.

Referências

ALVES, B. J. R.; MADARI, B. E.; BODDEY, R. M. Integrated crop–livestock–forestry systems: prospects for a sustainable agricultural intensification. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Heidelberg, v. 108, n. 1, p. 1–4, 2017.

ANDRADE, C. M. S.; VALENTIM, J. F.; CARNEIRO, J. D. C.; VAZ, F. A. Crescimento de gramíneas e leguminosas forrageiras tropicais sob sombreamento. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 39, n. 3, p. 263–270, 2004.

ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. D. F.; VALADÃO, S. E.; COSTA, G. de A. Abordagem sistêmica do solo em Sistemas Integrados de Produção Agrícola e Pecuária no Subtrópico Brasileiro. **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa, v. 8, p. 325–380, 2013.

ASSMANN, J. M.; MARTINS, A. P.; ANGHINONI, I.; DE OLIVEIRA DENARDIN, L. G.; DE HOLANDA NICHEL, G.; DE ANDRADE COSTA, S. E. V. G.; PEREIRA E SILVA, R. A.; BALERINI, F.; DE FACCIO CARVALHO, P. C.; FRANZLUEBBERS, A. J. Phosphorus and potassium cycling in a long-term no-till integrated soybean-beef cattle production system under different grazing intensities insubtropics. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Heidelberg, v. 108, n. 1, p. 21–33, 2017.

AULER, A. C.; PIRES, L. F.; DOS SANTOS, J. A. B.; CAIRES, E. F.; BORGES, J. A. R.; GIAROLA, N. F. B. Effects of surface-applied and soil-incorporated lime on some physical attributes of a Dystrudept soil. **Soil Use and Management**, Wallingford, v. 33, n. 1, p. 129–140, 2017.

BAUDRON, F.; JALETA, M.; OKITOI, O.; TEGEGN, A. Conservation agriculture in African mixed crop-livestock systems: Expanding the niche. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 187, p. 171–182, 2014.

BELL, L. W.; KIRKEGAARD, J. A.; SWAN, A.; HUNT, J. R.; HUTH, N. I.; FETTELL, N. A. Impacts of soil damage by grazing livestock on crop productivity. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 113, n. 1, p. 19–29, 2011.

BELL, L. W.; MOORE, A. D. Integrated crop–livestock systems in Australian agriculture: Trends, drivers and implications. **Agricultural Systems**, Amsterdam, v. 111, p. 1–12, 2012.

BENGOUGH, A. G.; MCKENZIE, B. M.; HALLETT, P. D.; VALENTINE, T. A. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: A review of limiting stresses and beneficial root tip traits. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 62, n. 1, p. 59–68, 2011.

BENJAMIN, J. G.; NIELSEN, D. C. Water deficit effects on root distribution of soybean, field pea and chickpea. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 97, n. 2–3, p. 248–253, 2006.

BETIOLI JUNIOR, E.; TORMENA, C. A.; MOREIRA, W. H.; BALL, B. C.; FIGUEIREDO, G. C.; SILVA, Á. P. da; GIAROLA, N. F. B. Aeration condition of a clayey oxisol under long-term no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 3, p. 990–999, 2014.

BIELUCZYK, W.; PEREIRA, M. G.; GUARESCHI, R. F.; DE ANDRADE BONETTI, J.; DA SILVA, G. N.; DA SILVA NETO, E. C. Soil carbon and nitrogen stocks, light organic matter, and remaining phosphorus under a crop-livestock integration system. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 38, n. 4, p. 1825–1840, 2017.

BLACK, C. K.; MASTERS, M. D.; LEBAUER, D. S.; ANDERSON-TEIXEIRA, K. J.; DELUCIA, E. H. Root volume distribution of maturing perennial grasses revealed by correcting for minirhizotron surface effects. **Plant and Soil**, The Hague, v. 419, n. 1–2, p. 391–404, 2017.

BODNER, G.; LEITNER, D.; NAKHFOROOSH, A.; SOBOTIK, M.; MODER, K.; KAUL, H.-P. A statistical approach to root system classification. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 4, n. 292, p. 1–16, 2013.

BONETTI, J. D. A.; ANGHINONI, I.; ZULPO, L. Temperatura e umidade do solo em sistema de integração soja-bovinos de corte com diferentes manejos da altura do pasto. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 18, n. 2, p. 11-21, 2017.

BONETTI, J. de A.; ANGHINONI, I.; MORAES, M. T. de; FINK, J. R.; DE ANDRADE BONETTI, J.; ANGHINONI, I.; DE MORAES, M. T.; FINK, J. R.; BONETTI, J. de A.; ANGHINONI, I.; MORAES, M. T. de; FINK, J. R. Resilience of soils with different texture, mineralogy and organic matter under long-term conservation systems. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 174, p. 104–112, 2017.

BONETTI, J. de A.; PAULINO, H. B.; SOUZA, E. D. de; CARNEIRO, M. A. C.; SILVA, G. N. da. Influência do sistema integrado de produção agropecuária no solo e na produtividade de soja e braquiária. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 45, n. 1, p. 104-112, 2015.

BUSARI, M. A.; KUKAL, S. S.; KAUR, A.; BHATT, R.; DULAZI, a. a. Conservation tillage impacts on soil, crop and the environment. **International Soil and Water Conservation Research**, Amsterdam, v. 3, n. 2, p. 1–11, 2015.

CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, n. 3, p. 777–783, 1992.

CAMIRÉ, C.; CÔTÉ, B.; BRULOTTE, S. Decomposition of roots of black alder and hybrid poplar in short-rotation plantings: Nitrogen and lignin control. **Plant and Soil**, The Hague, v. 138, n. 1, p. 123–132, 1991.

CAMPOS, A.; CRUZ, L.; ROCHA, S. Mass, nutrient pool, and mineralization of litter and fine roots in a tropical mountain cloud forest. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 575, p. 876–886, 2017.

CARDINAEL, R.; MAO, Z.; PRIETO, I.; STOKES, A.; DUPRAZ, C.; KIM, J. H.; JOURDAN, C. Competition with winter crops induces deeper rooting of walnut trees in a Mediterranean alley cropping agroforestry system. **Plant and Soil**, The Hague, v. 391, n. 1–2, p. 219–235, 2015.

CARVALHO, F. P.; MELO, C. A. D.; MACHADO, M. S.; DIAS, D. C. F. S.; ALVARENGA, E. M. The allelopathic effect of eucalyptus leaf extract on grass forage seed. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 33, n. 2, p. 193–201, 2015.

CARVALHO, J. L. N.; RAUCCI, G. S.; FRAZÃO, L. A.; CERRI, C. E. P.; BERNOUX, M.; CERRI, C. C. Crop-pasture rotation: A strategy to reduce soil greenhouse gas emissions in the Brazilian Cerrado. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 183, p. 167–175, 2014.

CARVALHO, P. C. F.; ANGHINONI, I.; DE MORAES, A.; DE SOUZA, E. D.; SULC, R. M.; LANG, C. R.; FLORES, J. P. C.; TERRA LOPES, M. L.; DA SILVA, J. L. S.; CONTE, O.; DE LIMA WESP, C.; LEVIEN, R.; FONTANELI, R. S.; BAYER, C. Managing grazing animals to achieve nutrient cycling and soil improvement in no-till integrated systems. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Heidelberg, v. 88, n. 2, p. 259–273, 2010.

CECAGNO, D.; COSTA, S. E. V. G. A.; KUNRATH, T. R.; MARTINS, A. P.; ANGHINONI, I.; REICHERT, J. M.; DILLENBURG, L. R.; CARVALHO, P. C. F. Soil and pasture water status in a long term integrated crop-livestock system perspective. **Revista Brasileira de Tecnologia Agropecuária**, Frederico Westphalen, RS, v. 1, n. 1, p. 24–34, 2017.

CHEN, G.; WEIL, R. R. Root growth and yield of maize as affected by soil compaction and cover crops. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 117, p. 17–27, 2011.

CHEN, H.; HARMON, M. E.; GRIFFITHS, R. P.; HICKS, W. Effects of temperature and moisture on carbon respired from decomposing woody roots. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 138, n. 1–3, p. 51–64, 2000.

CHILUNDO, M.; JOEL, A.; WESSTRÖM, I.; BRITO, R.; MESSING, I. Response of maize root growth to irrigation and nitrogen management strategies in semi-arid loamy sandy soil. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 200, p. 143–162, 2017.

CONANT, R. T.; RYAN, M. G.; ÅGREN, G. I.; BIRGE, H. E.; DAVIDSON, E. A.; ELIASSON, P. E.; EVANS, S. E.; FREY, S. D.; GIARDINA, C. P.; HOPKINS, F. M.; HYVÖNEN, R.; KIRSCHBAUM, M. U. F.; LAVALLEE, J. M.; LEIFELD, J.; PARTON, W. J.; MEGAN STEINWEG, J.; WALLENSTEIN, M. D.; MARTIN WETTERSTEDT, J. Å.; BRADFORD, M. A. Temperature and soil organic matter decomposition rates - synthesis of current knowledge and a way forward. **Global Change Biology**, Oxford, v. 17, n. 11, p. 3392–3404, 2011.

CONCEIÇÃO, M. C. G.; MATOS, E. S.; BIDONE, E. D.; RODRIGUES, R. A. R.; CORDEIRO, R. C. Changes in Soil Carbon Stocks under Integrated Crop-Livestock-Forest System in the Brazilian Amazon Region. **Agricultural Sciences**, v. 8, n. 9, p. 904–913, 2017.

CONG, W. F.; HOFFLAND, E.; LI, L.; JANSSEN, B. H.; VAN DER WERF, W. Intercropping affects the rate of decomposition of soil organic matter and root litter. **Plant and Soil**, The Hague, v. 391, n. 1–2, p. 399–411, 2015.

CONTE, O.; FLORES, J. P. C.; CASSOL, L. C.; DE FACCIO CARVALHO, P. C.; LEVIEN, R.; DE LIMA WESP, C. Evolução de atributos físicos de solo em sistema de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 46, n. 10, p. 1301–1309, 2011.

CONTE, O.; LEVIEN, R.; TREIN, C. R.; MAZURANA, M.; DEBIASI, H. Mechanical resistance of soil and tractor force by planter chisel type openers in crop-livestock system. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 4, p. 730–739, 2008.

COSTA, K. A. D. P.; ROSA, B.; OLIVEIRA, I. P. De; CUSTÓDIO, D. P.; SILVA, D. C. E. Efeito da estacionalidade na produção de matéria seca e composição bromatológica da *Brachiaria brizantha* cv. Marandu. **Ciência Animal Brasileira**, Goiânia, v. 6, n. 3, p. 187–193, 2005.

COSTA, S. E. V. G. A.; SOUZA, E. D.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. F.; MARTINS, A. P.; KUNRATH, T. R.; CECAGNO, D.; BALERINI, F. Impact of an integrated no-till crop-livestock system on phosphorus distribution, availability and stock. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 190, p. 43–51, 2014.

DE JONG VAN LIER, Q.; VAN DAM, J. C.; METSELAAR, K.; DE JONG, R.; DUIJNISVELD, W. H. M. Macroscopic root water uptake distribution using a matric flux potential approach. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 7, n. 3, p. 1065-1078, 2008.

DEXTER, A. R. Soil physical quality Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic mailer, and effects on root growth. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, p. 201–214, 2004.

DIAS-FILHO, M. B. Photosynthetic light response of the C4 grasses Brachiaria brizantha and B. humidicola under shade. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 59, n. 1, p. 65–68, 2002.

DUPAS, E.; BUZETTI, S.; SARTO, A. L.; HERNANDEZ, F. B. T.; BERGAMASCHINE, A. F. Dry matter yield and nutritional value of Marandu grass under nitrogen fertilization and irrigation in Cerrado in São Paulo. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 39, n. 12, p. 2598–2603, 2010.

FRESCHET, G. T.; ROUMET, C. Sampling roots to capture plant and soil functions. **Functional Ecology**, Oxford, v. 31, n. 8, p. 1506–1518, 2017.

GONÇALVES, J. L. M.; ALVARES, C. A.; ROCHA, J. H. T.; BRANDANI, C. B.; HAKAMADA, R. Eucalypt plantation management in regions with water stress. **Southern Forests**, Grahamstown, v. 79, n. 3, p. 169–183, 2017.

GREGORY, P. J.; BENGOUGH, A. G.; GEORGE, T. S.; HALLETT, P. D.; TIMLIN, D.; AHUJA, L. R. Rhizosphere engineering by plants: quantifying soil–root interactions. In: TIMLIN, D.; AHUJA, L. R. (Ed.). **Enhancing understanding and quantification of soil–root growth interactions**. Madison: American Society of Agronomy, 2013. p. 1–30. (Advances in Agricultural Systems Modeling Transdisciplinary Research, Synthesis, and Applications, 4).

GUENNI, O.; BARUCH, Z.; MARIN, D. Responses to drought of five Brachiaria species. II. Water relations and leaf gas exchange. **Plant and Soil**, The Hague, v. 258, n. 1, p. 249–260, 2004.

HIRTE, J.; LEIFELD, J.; ABIVEN, S.; MAYER, J. Maize and wheat root biomass, vertical distribution, and size class as affected by fertilization intensity in two long-term field trials. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 216, p. 197–208, 2018.

HISHI, T. Heterogeneity of individual roots within the fine root architecture: causal links between physiological and ecosystem functions. **Journal of Forest Research**, Los Angeles, v. 12, n. 2, p. 126–133, 2007.

HUANG, B.; FRY, J. D. Root anatomical, physiological, and morphological responses to drought stress for tall fescue cultivars. **Crop Science**, Madison, v. 38, n. 4, p. 1017–1022, 1998.

HUBER, K.; VANDERBORGHT, J.; JAVAUX, M.; SCHRÖDER, N.; DODD, I. C.; VEREECKEN, H. Modelling the impact of heterogeneous rootzone water distribution on the regulation of transpiration by hormone transport and/or hydraulic pressures. **Plant and Soil**, The Hague, v. 384, n. 1–2, p. 93–112, 2014.

HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M. A.; ARAUJO, R. S. Inoculation of Brachiaria spp. with the plant growth-promoting bacterium *Azospirillum brasilense*: An environment-friendly component in the reclamation of degraded pastures in the tropics. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 221, p. 125–131, 2016.

JANSA, J.; SMITH, F. A.; SMITH, S. E. Are there benefits of simultaneous root colonization by different arbuscular mycorrhizal fungi? **New Phytologist**, London, v. 177, n. 3, p. 779–789, 2008.

JARVIS, P.; REY, A.; PETSIKOS, C.; WINGATE, L.; RAYMENT, M.; PEREIRA, J.; BANZA, J.; DAVID, J.; MIGLIETTA, F.; BORGHETTI, M.; MANCA, G.; VALENTINI, R. Drying and wetting of Mediterranean soils stimulates decomposition and carbon dioxide emission: The “Birch effect”. **Tree Physiology**, Victoria, v. 27, n. 7, p. 929–940, 2007.

JIN, K.; SHEN, J.; ASHTON, R. W.; WHITE, R. P.; DODD, I. C.; PHILLIPS, A. L.; PARRY, M. A. J.; WHALLEY, W. R. The effect of impedance to root growth on plant architecture in wheat. **Plant and Soil**, The Hague, v. 392, n. 1–2, p. 323–332, 2015.

JOHNSON, M. G.; TINGEY, D. T.; PHILLIPS, D. L.; STORM, M. J. Advancing fine root research with minirhizotrons. **Environmental and Experimental Botany**, Oxford, v. 45, n. 3, p. 263–289, 2001.

LACLAU, J.-P.; SILVA, E. A.; LAMBAIS, G. R.; BERNOUX, M.; LE MAIRE, G.; STAPE, J. L.; BOUILLET, J.-P.; GONÇALVES, J. L. de M.; JOURDAN, C.; NOUVELLON, Y. Dynamics of soil exploration by fine roots down to a depth of 10 m throughout the entire rotation in *Eucalyptus grandis* plantations. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 4, p. 1–12, 2013.

LAMBAIS, G. R.; JOURDAN, C.; DE CÁSSIA PICCOLO, M.; GERMON, A.; PINHEIRO, R. C.; NOUVELLON, Y.; STAPE, J. L.; CAMPOE, O. C.; ROBIN, A.; BOUILLET, J. P.; LE MAIRE, G.; LACLAU, J. P. Contrasting phenology of *Eucalyptus grandis* fine roots in upper and very deep soil layers in Brazil. **Plant and Soil**, The Hague, v. 421, n. 1–2, p. 301–318, 2017.

LAVELLE, P.; BLANCHART, E.; MARTIN, A.; MARTIN, S.; SPAIN, A. A Hierarchical model for decomposition in terrestrial ecosystems: application to soils of the humid tropics. **Biotropica**, Washington, DC, v. 25, n. 2, p. 130-150, 1993.

LEMAIRE, G.; FRANZLUEBBERS, A.; CARVALHO, P. C. de F.; DEDIEU, B. Integrated crop-livestock systems: Strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 190, p. 4–8, 2014.

LIEDGENS, M.; RICHNER, W. Minirhizotron observations of the spatial distribution of the maize root system. **Agronomy Journal**, Madison, v. 93, n. 5, p. 1097–1104, 2001b.

LIEDGENS, M.; RICHNER, W. Relation between maize (Zea mays L.) leaf area and root density observed with minirhizotrons. **European Journal of Agronomy**, Montrouge Cedex, v. 15, n. 2, p. 131–141, 2001a.

LYNCH, J. P. Steep, cheap and deep: an ideotype to optimize water and N acquisition by maize root systems. **Annals of Botany**, Oxford, v. 112, n. 2, p. 347–357, 2013.

MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M. **Fisiologia da produção de milho**. 1. ed. Sete Lagoas, MG: Embrapa Milho e Sorgo, 2006.

MAJDI, H.; SMUCKER, A.-J. M.; PERSSON, H. A comparison between minirhizotron and monolith sampling methods for measuring root growth of maize (*Zea mays* L.). **Plant and Soil**, The Hague, v. 147, p. 127–134, 1992.

MARTINS, A. P.; COSTA, S. E. V. G. de A.; ANGHINONI, I.; KUNRATH, T. R.; CECAGNO, D.; REICHERT, J. M.; BALERINI, F.; DILLENBURG, L. R.; CARVALHO, P. C. de F. Soil moisture and soybean physiology affected by drought in an integrated crop-livestock system. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 51, n. 8, p. 978–989, 2016.

MARTINS, J. D.; RODRIGUES, G. C.; PAREDES, P.; CARLESSO, R.; OLIVEIRA, Z. B.; KNIES, A. E.; PETRY, M. T.; PEREIRA, L. S. Dual crop coefficients for maize in southern Brazil: Model testing for sprinkler and drip irrigation and mulched soil. **Biosystems Engineering**, London, v. 115, n. 3, p. 291–310, 2013.

MARTUSCELLO, J. A.; JANK, L.; GONTIJO NETO, M. M.; LAURA, V. A.; CUNHA, D. de N. F. V. Genus Brachiaria grass yields under different shade levels. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 38, n. 7, p. 1183–1190, 2009.

MCCORMACK, M. L.; DICKIE, I. A.; EISSENSTAT, D. M.; FAHEY, T. J.; FERNANDEZ, C. W.; GUO, D.; HELMISAARI, H. S.; HOBBIE, E. A.; IVERSEN, C. M.; JACKSON, R. B.; LEPPÄLAMMI-KUJANSUU, J.; NORBY, R. J.; PHILLIPS, R. P.; PREGITZER, K. S.; PRITCHARD, S. G.; REWALD, B.; ZADWORNY, M. Redefining fine roots improves understanding of below-ground contributions to terrestrial biosphere processes. **New Phytologist**, London, v. 207, n. 3, p. 505–518, 2015.

MCDANIEL, M. D.; TIEMANN, L. K.; GRANDY, A. S. Does agricultural crop diversity enhance soil microbial biomass and organic matter dynamics ? A meta-analysis. **Ecological Applications**, Washington, DC, v. 24, n. 3, p. 560–570, 2014.

MCNALLY, S. R.; LAUGHLIN, D. C.; RUTLEDGE, S.; DODD, M. B.; SIX, J.; SCHIPPER, L. A. Herbicide application during pasture renewal initially increases root turnover and carbon input to soil in perennial ryegrass and white clover pasture. **Plant and Soil**, The Hague, v. 412, n. 1–2, p. 133–142, 2017.

MONTEIRO, F. A.; WERNER, J. C. Ciclagem de nutrientes minerais em pastagens. In: SIMPÓSIO SOBRE ECOSSISTEMA DE PASTAGENS, 1989, Jaboticabal. **Anais**... Jaboticabal: FUNEP, 1989. p. 149-192.

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

MORAES, M. T. de; BENGOUGH, A. G.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; LEVIEN, R.; SCHNEPF, A.; LEITNER, D. Mechanistic framework to link root growth models with weather and soil physical properties, including example applications to soybean growth in Brazil. **Plant and Soil**, The Hague, p. in press, 2018.

MORAES, M. T. de; DEBIASI, H.; CARLESSO, R.; FRANCHINI, J. C.; SILVA, V. R. da; LUZ, F. B. da. Soil physical quality on tillage and cropping systems after two decades in the subtropical region of Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 155, n. 1, p. 351–362, 2016.

MÜLLER, A. G.; BERGAMASCHI, H. Eficiências de interceptação, absorção e uso da radiação fotossinteticamente ativa pelo milho (*Zea mays* L.), em diferentes disponibilidades hídricas e verificação do modelo energético de estimativa da massa seca acumulada. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 13, n. 1, p. 27-33, 2005.

MUNKHOLM, L. J.; HECK, R. J.; DEEN, B. Long-term rotation and tillage effects on soil structure and crop yield. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 127, p. 85–91, 2013.

OLIVER, M. A.; WEBSTER, R. Kriging: a method of interpolation for geographical information systems. **International Journal of Geographical Information Systems**, London, v. 4, n. 3, p. 313–332, 1990.

PACIULLO, D. S. C.; CASTRO, C. R. T.; GOMIDE, C. A. M.; FERNANDES, P. B.; ROCHA, W. S. D.; MULLER, M. D.; ROSSIELO, R. O. P. Soil bulk density and biomass partitioning of Brachiaria decumbens in a silvopastoral system. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 67, n. 5, p. 598–603, 2010.

PARIZ, C. M.; ANDREOTTI, M.; AZENHA, M. V.; BERGAMASCHINE, A. F.; MELLO, L. M. M. de; LIMA, R. C. Corn grain yield and dry mass of Brachiaria intercrops in the crop-livestock integration system. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 41, n. 5, p. 875–882, 2011.

PAULA, R. R.; REIS, G. G.; REIS, M. G. F.; OLIVEIRA NETO, S. N.; LEITE, H. G.; MELIDO, R. C. N.; LOPES, H. N. S.; SOUZA, F. C. Eucalypt growth in monoculture and silvopastoral systems with varied tree initial densities and spatial arrangements. **Agroforestry Systems**, Heidelberg, v. 87, n. 6, p. 1295–1307, 2013.

PEDREIRA, B. C.; PEDREIRA, C. G. S.; BOOTE, K. J.; LARA, M. A. S.; ALDERMAN, P. D. Adapting the CROPGRO perennial forage model to predict growth of Brachiaria brizantha. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 120, n. 3, p. 370–379, 2011.

PEREYRA, D. A.; BUCCI, S. J.; ARIAS, N. S.; CIANO, N.; CRISTIANO, P. M.; GOLDSTEIN, G.; SCHOLZ, F. G. Grazing increases evapotranspiration without the cost of lowering soil water storages in arid ecosystems. **Ecohydrology**, Chichester, v. 10, n. 6, p. 1–12, 2017.

PEYRAUD, J.-L.; TABOADA, M.; DELABY, L. Integrated crop and livestock systems in Western Europe and South America: A review. **European Journal of Agronomy**, Montrouge Cedex, v. 57, p. 31–42, 2014.

PEZZOPANE, C. de G.; SANTOS, P. M.; CRUZ, P. G. da; ALTOÉ, J.; RIBEIRO, F. A.; VALLE, C. B. do. Estresse por deficiência hídrica em genótipos de Brachiaria brizantha. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 45, n. 5, p. 871–876, 2015.

PEZZOPANE, J. R. M.; BERNARDI, A. carlos C.; BOSI, C.; OLIVEIRA, P. P. A.; MARCONATO, M. H.; PEDROSO, A. de F.; ESTEVES, S. N. Forage productivity and nutritive value during pasture renovation in integrated systems. **Agroforestry Systems**, Heidelberg, v. 1, p. 1–11, 2017.

PIANO, J. T.; OLIVEIRA, P. S. R. De; DA, C. P. F.; TAFFAREL, L. E.; EGEWARTH, J. F.; SEIDEL, E. P.; CASTAGNARA, D. D.; BORSOI, A.; EGEWARTH, V. A. Soil physical attributes under different grazing management of winter forage crops in crop-livestock system at Southern Brazil. **African Journal of Agricultural Research**, Nairobi, v. 10, n. 3, p. 146–153, 2015.

POFFENBARGER, H.; ARTZ, G.; DAHLKE, G.; EDWARDS, W.; HANNA, M.; RUSSELL, J.; SELLERS, H.; LIEBMAN, M. An economic analysis of integrated crop-livestock systems in Iowa, U.S.A. **Agricultural Systems**, Amsterdam, v. 157, p. 51–69, 2017.

PORTES, T. de A.; ISABEL, S.; CARVALHO, C. D. E. Análise do crescimento de uma cultivar de braquiária em cultivo solteiro e consorciado com cereais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 35, n. 7, p. 1349–1358, 2000.

PRASAD, J. V. N. S.; KORWAR, G. R.; RAO, K. V.; MANDAL, U. K.; RAO, C. A. R.; RAO, G. R.; RAMAKRISHNA, Y. S.; VENKATESWARLU, B.; RAO, S. N.; KULKARNI, H. D.; RAO, M. R. Tree row spacing affected agronomic and economic performance of Eucalyptus-based agroforestry in Andhra Pradesh, Southern India. **Agroforestry Systems**, Heidelberg, v. 78, n. 3, p. 253–267, 2010.

REDIN, M.; GUÉNON, R.; RECOUS, S.; SCHMATZ, R.; DE FREITAS, L. L.; AITA, C.; GIACOMINI, S. J. Carbon mineralization in soil of roots from twenty crop species, as affected by their chemical composition and botanical family. **Plant and Soil**, The Hague, v. 378, n. 1–2, p. 205–214, 2014.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência & Ambiente**, Santa Maria, v. 27, p. 29–48, 2003.

REYNOLDS, W. D.; BOWMAN, B. T.; DRURY, C. F.; TAN, C. S.; LU, X. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. **Geoderma**, Amsterdam, v. 110, n. 1–2, p. 131–146, 2002.

RIGHI, C. A.; COUDERC, V.; PEREIRA, C. R.; COUTO, H. T. Z. Responses of Eucalyptus camaldulensis sprouts to shade: an evaluation of canopy plasticity. **Experimental Agriculture**, Cambridge, v. 52, n. 3, p. 346–358, 2015.

RUSSELLE, M. P.; ENTZ, M. H.; FRANZLUEBBERS, A. J. Reconsidering integrated crop–livestock systems in North America. **Agronomy Journal**, Madison, v. 99, n. 2, p. 325-334, 2007.

SALTON, J. C.; MERCANTE, F. M.; TOMAZI, M.; ZANATTA, J. A.; CONCENÇO, G.; SILVA, W. M.; RETORE, M. Integrated crop-livestock system in tropical Brazil: Toward a sustainable production system. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 190, p. 70–79, 2014.

SASIKUMAR, K.; VIJAYALAKSHMI, C.; PARTHIBAN, K. T. Allelopathic effects of four eucalyptus species on redgram (*Cajanus cajan* L.). **Journal of Tropical Agriculture**, Kerala, India, v. 39, n. 2, p. 134–138, 2001.

SCHNEPF, A.; LEITNER, D.; SCHWEIGER, P. F.; SCHOLL, P.; JANSA, J. L-System model for the growth of arbuscular mycorrhizal fungi, both within and outside of their host roots. **Journal of the Royal Society. Interface**, London, v. 13, n. 117, p. 1–11, 2016.

SILVER, W. L.; MIYA, R. K. Global patterns in root decomposition: Comparisons of climate and litter quality effects. **Oecologia**, Berlin, v. 129, n. 3, p. 407–419, 2001.

SOUSSANA, J. F.; LEMAIRE, G. Coupling carbon and nitrogen cycles for environmentally sustainable intensification of grasslands and crop-livestock systems. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 190, p. 9–17, 2014.

SOUZA, E. D. de; COSTA, S. E. V. G. de A.; ANGHINONI, I.; LIMA, C. V. S. de; CARVALHO, P. C. de F.; MARTINS, A. P. Soil microbial biomass in a no-tillage integrated crop-livestock system under different grazing intensities. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 1, p. 79–88, 2010.

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

TAHIR, M. M.; RECOUS, S.; AITA, C.; SCHMATZ, R.; PILECCO, G. E.; GIACOMINI, S. J. In situ roots decompose faster than shoots left on the soil surface under subtropical no-till conditions. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 52, n. 6, p. 853–865, 2016.

VALENTINE, T. A.; HALLETT, P. D.; BINNIE, K.; YOUNG, M. W.; SQUIRE, G. R.; HAWES, C.; BENGOUGH, A. G. Soil strength and macropore volume limit root elongation rates in many UK agricultural soils. **Annals of Botany**, Oxford, v. 110, n. 2, p. 259–270, 2012.

VAN DAM, J. C.; FEDDES, R. A. Numerical simulation of infiltration, evaporation and shallow groundwater levels with the Richards equation. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 233, n. 1–4, p. 72–85, 2000.

VAN DUIVENBOODEN, N.; PALA, M.; STUDER, C.; BIELDERS, C. L.; BEUKES, D. J. Cropping systems and crop complementarity in dryland agriculture to increase soil water use efficiency: a review. **NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences**, Wageningen, v. 48, n. 3, p. 213–236, 2000.

WILSON, C. A.; PETERSON, C. A. Chemical composition of the epidermal, hypodermal, endodermal and intervening cortical cell walls of various plant roots. **Annals of Botany**, Oxford, v. 51, p. 759–769, 1983.

WULLSCHLEGER, S. D.; MEINZER, F. C.; VERTESSY, R. A. A review of whole-plant water use studies in tree. **Tree Physiology**, Victoria, v. 18, n. 8–9, p. 499–512, 1998.

YIMAM, Y. T.; OCHSNER, T. E.; KAKANI, V. G. Evapotranspiration partitioning and water use efficiency of switchgrass and biomass sorghum managed for biofuel. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 155, p. 40–47, 2015.

ZONTA, E.; BRASIL, F. C.; GOI, S. R.; ROSA, M. M. T. O sistema radicular e suas interações com o ambiente edáfico. In: FERNANDES, M. S. (Ed.). **Nutrição mineral das plantas**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p. 7–52.

APÊNDICES

Figura S3 – Imagem e processamento pelo software WhinRhizo Tron MF 2013, com a separação de raízes do eucalipto (A), do grupo das gramíneas (B) e colonizadas por ectomicorrizas (C) em área de sistema de integração lavoura-pecuária-floresta

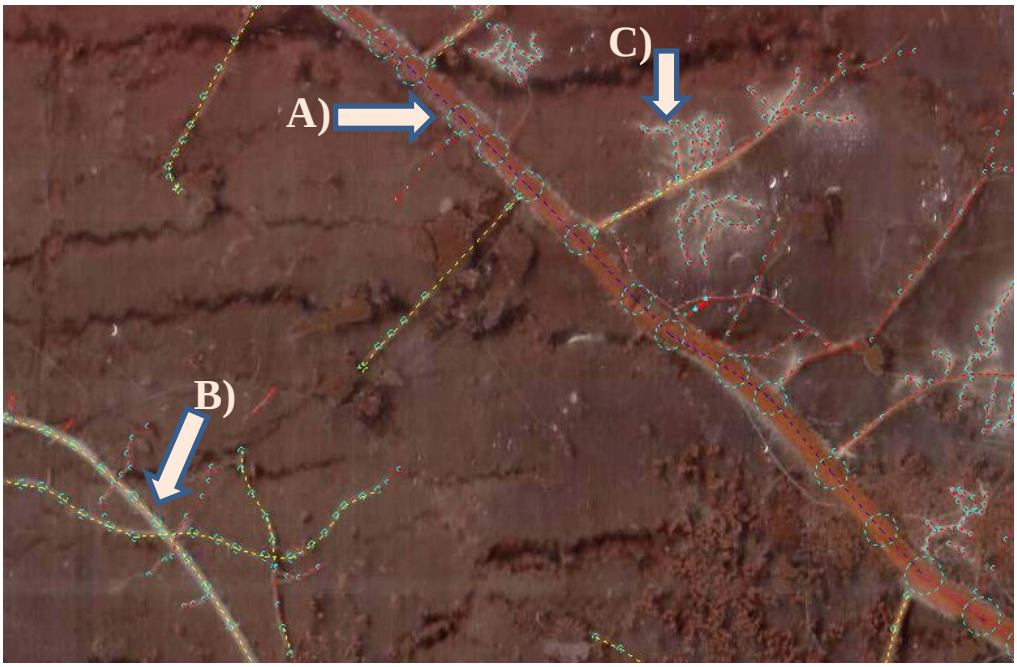
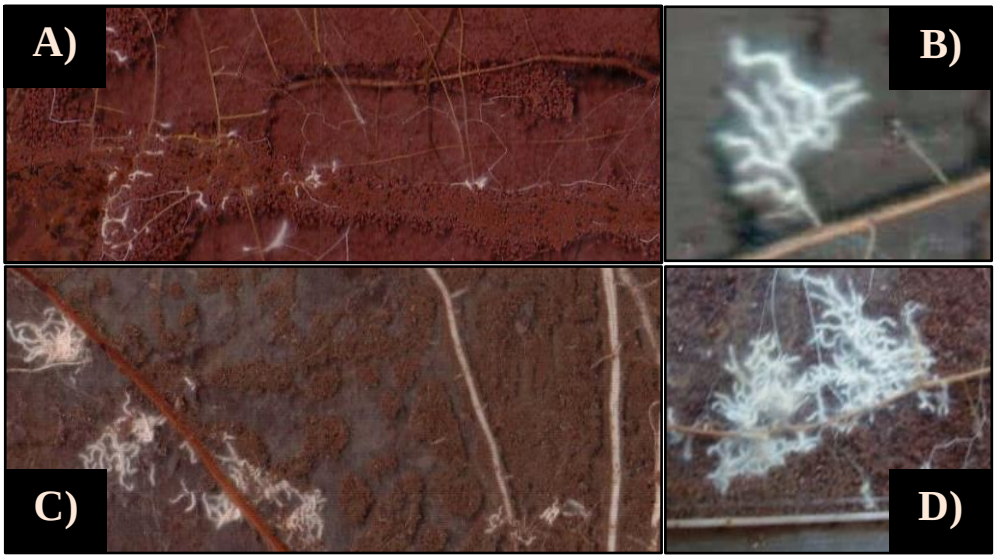


Figura S4 - Imagens produzidas pela técnica do minirhizotron, contendo associações de ectomicorrizas com raízes de *Eucalyptus urograndis* no estudo de George Lambais (2014) e neste estudo (B e C), e ectomicorrizas observadas em raízes de eucalipto após inoculação de pelo método de Óptodes (D)



4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

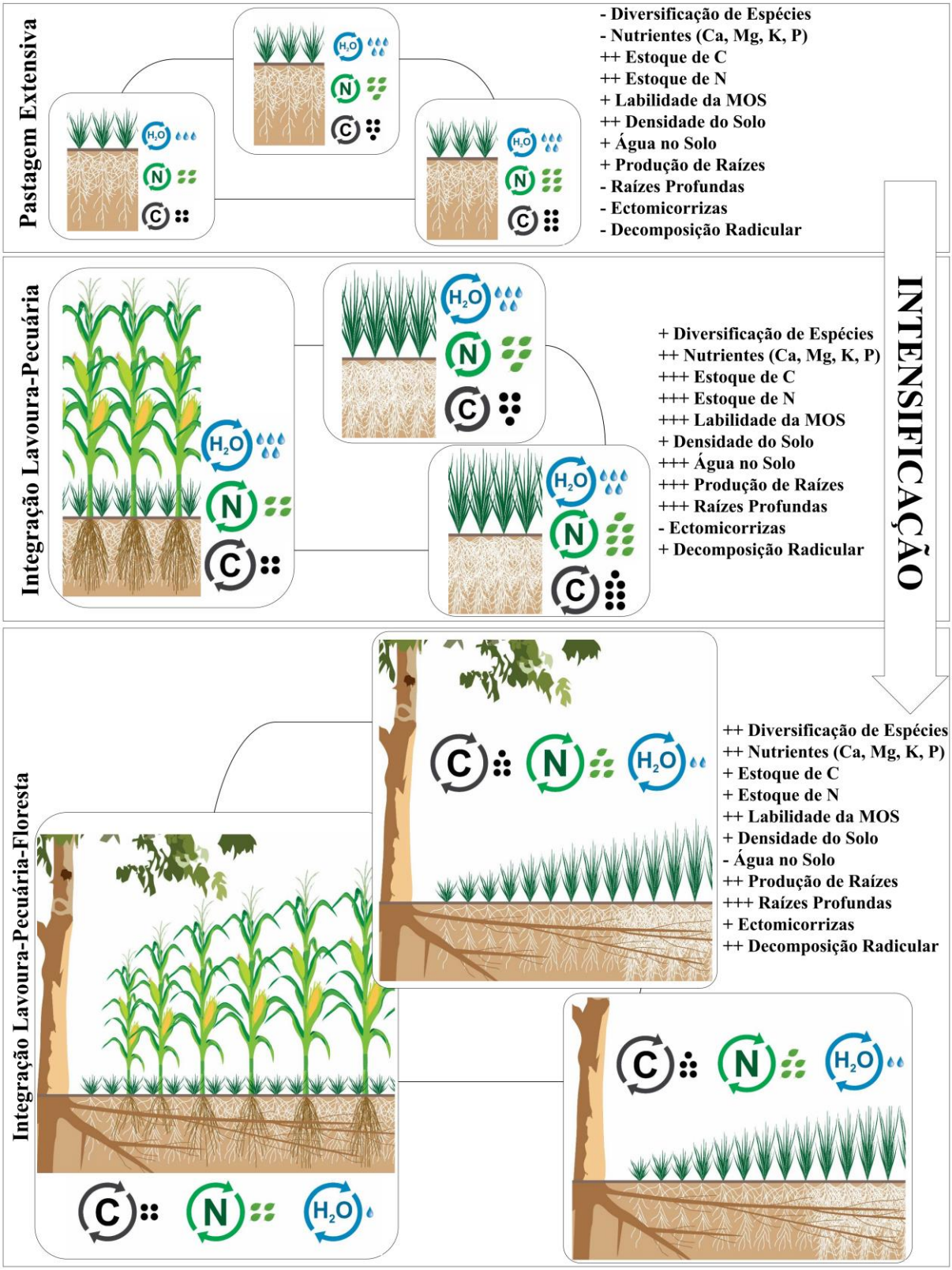
A hipótese geral deste estudo de que o uso de sistemas integrados de produção agropecuária mais intensivos incrementa a produção total de raízes finas aprofundando o sistema radicular das culturas, e proporciona maior sequestro de C e qualidade da matéria orgânica do solo foi confirmada parcialmente. A síntese dos principais resultados que suportam o teste da hipótese sobre a dinâmica radicular, do C, do N e da água no solo ao longo dos ciclos de cultivo nos sistemas avaliados está esquematizada na Figura 4.1. Tal síntese da dinâmica nos sistemas, bem como inferências para um próximo ano de pastagem, foram baseadas nos resultados verificados no Capítulo 2 intitulado "Efeitos dos sistemas agrícolas integrados na matéria orgânica do solo no sudeste do Brasil" e no Capítulo 3 intitulado "Dinâmica da umidade do solo e crescimento e decomposição das raízes finas em sistemas integrados de produção agropecuária".

Os efeitos da conversão de uma pastagem extensiva, com baixa lotação de animais no pasto e ausência de fertilizações, para um sistema de integração lavoura-pecuária (ILP), com calagens e reposição de nutrientes no cultivo da lavoura, em suma foram: (i) aumento da disponibilidade de nutrientes (Ca, Mg, K e P) no solo; (ii) incrementos nos estoques de C e N, bem como de frações lábeis da MOS; (iii) manutenção de maiores conteúdos de água no solo; (iv) ciclagem do C e N, com maiores produção e decomposição de raízes, inclusive em camadas mais profundas do solo.

A implementação da integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), com três a cinco anos de idade do *Eucalyptus urograndis* em linhas simples de 15 x 2 m, em área anteriormente utilizada para ILP, promoveu os seguintes efeitos: (i) redução nos conteúdos de água no solo; (ii) perdas nos teores das frações lábeis da MOS (iii) limitações na produção de raízes no período de lavoura e incrementos na decomposição radicular, acarretando em maiores taxas de ciclagem das raízes no solo; (iv) aumentos na ciclagem do C e N; e, (v) ocorrências de associações simbióticas nas raízes, tais como os fungos ectomicorrízicos, perceptíveis pela técnica de análises radiculares com uso de minirhizotron.

A matéria orgânica aportada por sistemas integrados (ILP e ILPF) via decomposição das raízes e restos culturais/liteira, foi incrementada quando comparada a área de pastagem extensiva. Entretanto este aumento, nem sempre resultou em maior sequestro de C no solo.

Figura 4.1 Relações esquemáticas dos fatores solo-planta devido à intensificação dos sistemas integrados de produção agropecuária



Quanto mais intensivo e diversificado foi o sistema, mais acelerada foi a ciclagem das raízes, da água, da matéria orgânica e dos nutrientes. Quando comparada à ILP, a ILPF limitou o aporte de MOS, especialmente via raízes das gramíneas e também da parte aérea, principalmente em locais mais próximos às linhas do eucalipto. Além do menor aporte, o manejo e diversidade do sistema de ILPF acelerou a decomposição radicular, e, portanto, tendeu a reduzir o potencial de sequestro de C no solo, em comparação à ILP.

Dentre os ciclos de cultivo avaliados, o período da lavoura promoveu incrementos nas frações lábeis da matéria orgânica do solo (MOS) na ILP e ILPF, bem como uma elevada produção de raízes e aprofundamento do sistema radicular no perfil do solo (0-0,70 m). Esses resultados associados indicam que o cultivo consorciado do milho com a braquiária foi um fator chave para aumentar o aporte de MOS nos sistemas integrados de produção.

Os resultados desse estudo indicam que o uso ao longo do tempo de ILPF promoverá reduções de C e N no solo em comparação à ILP. Entretanto, é importante que seja considerado que os estoques de C e N então sendo incrementados ao longo das avaliações em todos os sistemas de manejo avaliados. O sistema ILPF além de diversificar a produção, foi o único que possibilitou associações das raízes do eucalipto com fungos ectomicorrízicos, indicando que, intrinsicamente, esse sistema incrementa as funções no solo relacionadas à atividade biológica. A ciclagem da água no sistema ILPF foi incrementada, devido ao uso pelo eucalipto, em comparação com os outros sistemas avaliados. Ao centro das entrelinhas do eucalipto, comparada com a ILP, houve produções de quantidades iguais de biomassa aérea do milho (lavoura) e de braquiária (pastagem). Entretanto, devido à presença associada de ectomicorrizas e raízes de eucalipto, houve maior consumo de água, o qual favoreceu reduções no conteúdo de água do solo naquelas posições em relação à ILP.

Durante o período de pastagem a produção radicular total das espécies (gramíneas + eucalipto + raízes associadas às ectomicorrizas) na ILPF foi igual a produção total de raízes na ILP, havendo reduções na ILPF apenas em locais próximos às linhas do eucalipto (1,9 m de distância). Assim, o período que limitou a produção radicular na ILPF foi o da lavoura, pois consiste em maior grau de intensificação, com cultivo consorciado de milho e braquiária. No Capítulo 2 foi discutido também que o milho é menos tolerante às condições de sombreamento e reduções nos conteúdos de água quando comparado à braquiária, a qual demostra ser mais plástica essas variações (e.g. especialmente da espécie *Urochloa decumbens*).

Diante da dinâmica radicular observada, alguns manejos culturais, tais como as podas e ou desbaste (colheita de árvores de eucalipto), poderiam reduzir o sombreamento e/ou a densidade das árvores na ILPF, o que possibilitaria a manutenção de maiores conteúdos de água

no solo e também melhor desenvolvimento das plantas, principalmente da cultura agrícola. Dessa forma, na ILPF tais práticas culturais também consistem em alternativas para incrementar o aporte de raízes e da matéria orgânica, como ocorreu preferencialmente em locais mais distantes aos eucaliptos.

Por fim, este estudo contribui como base científica para o aprimoramento da tecnologia de intensificação das áreas agrícolas através da integração da agricultura com a pecuária e/ou floresta. Uma quantidade consistente de resultados e interpretações geradas por esse estudo poderá ser utilizada de apoio para entender os fluxos do carbono, bem como da ciclagem dos nutrientes e da água em arranjos similares aos dos sistemas avaliados.

O uso de técnicas não destrutivas para avaliação do crescimento radicular das culturas, em condições de campo, ainda necessita adaptações e avanços. Assim, algumas dificuldades, principalmente relacionadas às avaliações da dinâmica radicular pela técnica do minirhizotron, devem ser esclarecidas ao final deste trabalho visando orientar futuras pesquisas científicas. Dentre elas, as principais foram:

(i) Nos sistemas integrados de produção o crescimento e a decomposição de raízes finas foram elevados. O comprimento e o diâmetro das raízes individuais por meio do programa WinRHIZO Tron MF 2013c são traçados manualmente na tela do computador para cada imagem. Neste trabalho, o processamento das quatro mil imagens, com elevada densidade radicular, demandou de cerca de 18 meses de trabalhos diários (dias úteis) de uma pessoa. Para agilizar esse processo, algoritmos para traçar automaticamente as raízes, com prévias calibrações e automatização deste processo deveriam ser realizados para melhorar a eficiência de obtenção dos resultados.

(ii) A colonização ectomicorrízica foi identificada e quantificada quando estruturas dicotômicas e/ou manto fúngico estiveram presentes associados as raízes. As hifas das ectomicorrizas entretanto, apresentaram diâmetro bem menor e por vezes não foi possível identificá-las individualmente com apoio do programa WinRHIZO Tron MF 2013c. O crescimento foi bastante irregular havendo em grande parte das vezes sobreposição entre as mesmas, com uma coloração branca generalizada sobre o solo. Técnicas digitais para quantificar ao menos a área dessas estruturas, no processamento das imagens obtidas pelo minirhizotron, poderiam ser desenvolvidas.

(ii) Ao longo do ciclo da lavoura entre 10 a 30 % das raízes produzidas foram cobertas por movimentação de solo e desaparecido das imagens. Estas raízes foram identificadas no

programa como "*raiz coberta por terra*", seu comprimento contabilizado e desprezado nas avaliações de taxas de ciclagem. É possível que essa ocorrência seja pelo tempo de instalação dos tubos (5 meses) ou mesmo pela perturbação do solo comum em cultivos agrícolas. Estudos com minirhizotrons têm sido predominantemente utilizados em florestas ou cultivos perenes com um menor grau de perturbação. Na avaliação das taxas de ciclagem é obrigatório distinguir as raízes que foram cobertas por terra daquelas que realmente se decompuseram. No período da pastagem essa movimentação de terra reduziu substancialmente com menos de 4 % das raízes cobertas por solo.

Para melhor avaliar e caracterizar o sistema radicular da cultura do milho com minirhizotrons sugere-se que sejam amostrados ao menos três pontos na entrelinha, similarmente ao que foi feito para o eucalipto. Dessa maneira a distribuição em profundidade das raízes será caracterizada com maior acurácia. Finalmente, este estudo foi realizado para entender a dinâmica de crescimento radicular em sistemas integrados de produção, nos quais ainda carecem de muitos avanços e detalhamento dos processos e mecanismos envolvidos na relação solo-planta-atmosfera.