

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

Bruno Chaves

**CARBONO-¹³C DE RAÍZES E PARTE AÉREA DE CULTURAS DE
VERÃO EM FRAÇÕES FÍSICAS DA MATÉRIA ORGÂNICA DE DOIS
SOLOS DE VÁRZEA**

**Santa Maria, RS
2017**

Bruno Chaves

**CARBONO-¹³C DE RAÍZES E PARTE AÉREA DE CULTURAS DE VERÃO EM
FRAÇÕES FÍSICAS DA MATÉRIA ORGÂNICA DE DOIS SOLOS DE VÁRZEA**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração Biodinâmica e Manejo do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do grau de **Mestre em Ciência do Solo**.

Orientador: Dr. Sandro José Giacomini

**Santa Maria, RS
2017**

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Chaves, Bruno
CARBONO-13C DE RAÍZES E PARTE AÉREA DE CULTURAS DE
VERÃO EM FRAÇÕES FÍSICAS DA MATÉRIA ORGÂNICA DE DOIS SOLOS
DE VÁRZEA / Bruno Chaves.- 2017.
53 p. ; 30 cm

Orientador: Sandro José Giacomini
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-
Graduação em Ciência do Solo, RS, 2017

1. carbono 2. isótopos estáveis 3. fracionamento físico
da MOS 4. qualidade de resíduos culturais 5. decomposição
I. Giacomini, Sandro José II. Título.

Bruno Chaves

**CARBONO-¹³C DE RAÍZES E PARTE AÉREA DE CULTURAS DE VERÃO EM
FRAÇÕES FÍSICAS DA MATÉRIA ORGÂNICA DE DOIS SOLOS DE VÁRZEA**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração Biodinâmica e Manejo do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do grau de **Mestre em Ciência do Solo**.

Aprovado em 31 de julho de 2017:

Sandro José Giacomini, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Eduardo Lorensi de Souza, Dr. (UERGS)

Douglas Adams Weiler, Dr. (UFSM)

**Santa Maria, RS
2017**

Dedico este trabalho
A meus pais, Dirlei e Roseli,
A minha irmã Monique!

Agradecimentos

Aos meus pais, Dirlei e Roseli, que sempre me apoiaram e incentivaram, não medindo esforços para tornar meu sonho possível.

A minha irmã Monique pelo auxílio e incentivo durante esta caminhada.

A Jéssica pelo apoio, amor, carinho, paciência e pelo incentivo para a conclusão desta etapa.

Ao professor Sandro José Giacomini pelos ensinamentos, amizade, conselhos e apoio na execução deste trabalho.

À Universidade Federal de Santa Maria pela oportunidade de estudo.

Ao CNPq pelo auxílio financeiro durante a realização deste trabalho.

A banca examinadora composta pelo Dr. Douglas Adams Weiler e Dr. Eduardo Lorensi de Souza, pela disponibilidade, considerações e contribuições.

Ao professor Marciel Redin pelos ensinamentos e auxílio na conclusão deste trabalho.

Aos colegas e amigos da pós-graduação, Guilherme, Getúlio, Raquel, Patrick, Lineu, Douglas, Janquieli, Alexandre, Stefen, Mariana, Lethícia, Rogério e Carolina.

Aos bolsistas de iniciação científica do LABCEN: Adriane, Heitor, Mathias, Roberta, Rafael, Cledir e Giovani pelo auxílio nas atividades e pela amizade.

Ao Fabiano e Elci pela amizade e pelas análises realizadas.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Muito Obrigado!

RESUMO

CARBONO-¹³C DE RAÍZES E PARTE AÉREA DE CULTURAS DE VERÃO EM FRAÇÕES FÍSICAS DA MATÉRIA ORGÂNICA DE DOIS SOLOS DE VÁRZEA

AUTOR: Bruno Chaves
ORIENTADOR: Sandro José Giacomini

A diversificação de culturas nas áreas de várzea no Rio Grande do Sul vem incorporando o sorgo (*Sorghum bicolor*) e a soja (*Glycinemax*) no sistema de rotação com o arroz irrigado (*Oryza sativa*). Pouco se sabe sobre o impacto da adição destes resíduos culturais sobre a estabilização do carbono (C) nas frações físicas da matéria orgânica do solo (MOS) em solos hidromórficos. O objetivo deste estudo foi compreender a contribuição de resíduos culturais (parte aérea e raízes) do arroz, soja e sorgo para o acúmulo de C nas diferentes frações físicas da MOS em dois solos de várzea com diferentes texturas. Durante 360 dias, uma incubação com resíduos culturais de parte aérea e raízes de arroz, sorgo e soja enriquecidos com ¹³C foi conduzida para avaliar a incorporação do C dos resíduos culturais na MOS. A incorporação e a estabilização do C nos dois solos hidromórficos (Planossolo Hidromórfico Eutrófico gleissólico e Planossolo Hidromórfico Eutrófico arênico) foi avaliada através do método do fracionamento físico da MOS, com base no tamanho (>250 µm, 250-53 µm e <53 µm). Os diferentes resíduos culturais, solos e frações influenciaram a estabilização de C no solo ao final de 360 dias. As maiores quantidades de C no solo nas frações >250 e <53 µm foram observados nos tratamentos com resíduos culturais da parte aérea do arroz. O Planossolo gleissólico foi mais eficiente na estabilização do C no solo em razão do maior conteúdo de silte e argila. A estabilização do C das raízes foi maior para as culturas da soja e sorgo do que nas raízes do arroz nas frações >250 µm e <53 µm. A textura do solo não influenciou a estabilização de C na fração >250 µm oriundo das raízes. Para a fração <53 µm, apenas as raízes de soja demonstraram influência da textura sobre a estabilização do C nesta fração, com maior quantidade de C estabilizado no Planossolo Gleissólico. Os resultados indicam que os resíduos culturais de parte aérea do arroz contribuem mais efetivamente na retenção de C em solos hidromórficos do que os resíduos de soja e sorgo, sobretudo na fração <53 µm. A inclusão das culturas de soja e sorgo no ambiente de várzea promove uma maior estabilização de C no solo proveniente das raízes, demonstrando ser uma importante alternativa para rotação de culturas com o arroz. O solo com maiores conteúdos de silte e argila apresenta maior efetividade de estabilização de C na fração <53 µm, principalmente a partir de resíduos de parte aérea.

Palavras-chave: Estabilização, textura, isótopo ¹³C

ABSTRACT

CARBON-¹³C OF ROOTS AND SHOOTS FROM SUMMER CROPS IN PHYSICAL FRACTIONS OF ORGANIC MATTER OF TWO LOWLAND SOILS

AUTHOR: Bruno Chaves

ADVISOR: Sandro José Giacomini

Crop diversification in lowland areas in Rio Grande do Sul is incorporating sorghum (*Sorghum bicolor*) and soybean (*Glycine max*) into rotation system with irrigated rice (*Oryza sativa*). Little is known about the impact of these crop residues additions on carbon (C) stabilization in physical fractions of soil organic matter (SOM) in hydromorphic soils. The objective of this study was to understand the contribution of rice, soybean and sorghum crop residues to C accumulation in different physical fractions of SOM in two soils, with different textures. During 360 days, an incubation with rice, sorghum and soybean shoots and roots ¹³C enriched was carried out to evaluate crop residues C incorporation into SOM. The C incorporation and stabilization in the hydromorphic soils (Planossolo Hidromórfico Eutrófico gleissólico e Planossolo Hidromórfico Eutrófico arênico) were evaluated through physical fractionation method, based on size (> 250 µm, 250-53 µm and <53 µm). The crop residues, soils and physical fractions of SOM influenced C stabilization in the soil at the end of 360 days. Higher amounts of C were observed in >250 and <53 µm fractions. Planossolo Gleissólico was more efficient on C stabilization due higher silt and clay content. C stabilization from roots was higher in soybean and sorghum crops than rice. Soil texture did not influence roots C stabilization in fraction > 250 µm. For the fraction <53 µm, only soybean roots showed influence of soil texture on C stabilization, with higher C stabilized in Planossolo Gleissólico. The results indicate that the rice crop residues are important for a high C retention in hydromorphic soils, especially in the fraction <53 µm. The inclusion of soybean and sorghum crops in the lowland environment promotes a higher roots C stabilization in soil, being an important alternative for crop rotation with rice. The soil with higher silt and clay content presents a higher effectiveness of C stabilization in the fraction <53 µm, mainly from shoots.

Keywords: Stabilization, texture, ¹³C isotope

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1- Percentagem do ^{13}C no solo em cada fração física granulométrica de resíduos culturais de arroz, sorgo e soja nos solos Planossolo Arênico (a, c, e) e Planossolo Gleissólico (b, d, f), oriundo da parte aérea ao longo de 360 dias de incubação.....46
- Figura 2- Percentagem do ^{13}C no solo em cada fração física granulométrica de resíduos culturais de arroz, sorgo e soja nos solos Planossolo Arênico (a, c, e) e Planossolo Gleissólico (b, d, f) oriundo das raízes ao longo de 360 dias de incubação.47
- Figura 3- Retenção de C-novo no solo (g m^{-2}) proveniente dos resíduos de parte aérea (a, b) e raízes (c, d) de arroz, sorgo e soja nos solos Planossolo Arênico (a, c) e Planossolo Gleissólico (b, d) ao longo de 360 dias de incubação.....48
- Figura 4– C-novo no solo (g m^{-2}) proveniente da parte aérea de arroz, sorgo e soja nas três frações físicas granulométricas nos solos Planossolo Arênico (a, c, e) e Planossolo Gleissólico (b, d, f) ao longo de 360 dias de incubação. Letras maiúsculas diferentes na mesma linha, e letras minúsculas na mesma coluna para cada tempo e cultura, diferem entre si pelo teste de tukey a 5%. As barras verticais representam o DMS entre as culturas para cada data.49
- Figura 5– C-novo no solo (g m^{-2}) proveniente das raízes de arroz, sorgo e soja nas três frações físicas granulométricas nos solos Planossolo Arênico (a, c, e) e Planossolo Gleissólico (b, d, f) ao longo de 360 dias de incubação. Letras maiúsculas diferentes na mesma linha, e letras minúsculas na mesma coluna para cada tempo e cultura, diferem entre si pelo teste de tukey a 5%. As barras verticais representam o DMS entre as culturas para cada data.50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características físicas e químicas dos solos utilizados no experimento de incubação.....	40
Tabela 2 - Composição química e excesso isotópico dos resíduos de arroz, sorgo e soja utilizados no experimento de incubação.....	41
Tabela 3 - Resultados da análise de variância para os fatores resíduos culturais (RC), Solos (S) e frações (F).	42
Tabela 4 - Percentagem de ^{13}C nos resíduos remanescentes de parte aérea, no solo e nas frações físicas granulométricas em dois solos hidromórficos ao longo dos 360 dias de incubação.	43
Tabela 5 - Percentagem de ^{13}C nos resíduos remanescentes das raízes, no solo e nas frações físicas granulométricas em dois solos hidromórficos ao longo dos 360 dias de incubação.....	44
Tabela 6 - Fator de contribuição relativa do C no solo proveniente das raízes vs resíduos de parte aérea (RCf).....	45

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	11
1.1 HIPÓTESE	13
1.2 OBJETIVO GERAL	13
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
2 CARBONO-¹³C DE RAÍZES E PARTE AÉREA DE CULTURAS DE VERÃO EM FRAÇÕES FÍSICAS DA MATÉRIA ORGÂNICA DE DOIS SOLOS DE VÁRZEA¹	15
2.1 ABSTRACT	15
2.2 INTRODUÇÃO	16
2.3 MATERIAL E MÉTODOS	17
2.3.1 Solos	17
2.3.2 Resíduos Culturais	18
2.3.3 Incubação	19
2.3.4 Avaliações	20
2.3.5 Cálculos	21
2.3.6 Análise estatística	23
2.4 RESULTADOS	23
2.4.1 ¹³C remanescente	23
2.4.2 ¹³C no solo	24
2.4.3 ¹³C frações físicas granulométricas do solo	24
2.4.4 C-novo no solo	26
2.4.5 C-novo nas frações físicas granulométricas do solo	26
2.4.5 Fator de contribuição relativa de carbono no solo de raízes vs parte aérea .	27
2.5 DISCUSSÃO	28
2.5.1 Qualidade de resíduos culturais e tipo de solo sobre a decomposição	28
2.5.2 Qualidade de resíduos e textura sobre a estabilização de carbono no solo .	30
2.5.3 Qualidade de resíduos e textura sobre a estabilização de carbono nas frações físicas granulométricas do solo	32
2.6 CONCLUSÕES	35
2.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36

1 INTRODUÇÃO GERAL

A dinâmica da matéria orgânica em solos de várzea (hidromórficos) difere dos solos de sequeiro devido as particularidades destes ambientes, onde a condição de anaerobiose do solo provoca alterações no pH, condutividade elétrica e difusividade do oxigênio, ocasionando mudanças das condições à população microbiana do solo (SAHRAWAT, 2012). No Rio Grande do Sul, os solos hidromórficos compreendem uma vasta área que corresponde a 5 milhões de hectares, representando cerca de 20% da área total do estado (GOMES et al., 2002). A utilização destes solos decorre do fato de suas características hídricas e declividade plana serem adequadas para o cultivo do arroz irrigado (*Oryza sativa*), onde mais de 1 milhão de hectares são utilizados para seu cultivo anualmente (IRGA, 2017). Visando o aumento da rentabilidade do sistema produtivo nestas áreas, conjugado ao controle de plantas invasoras, principalmente o arroz daninho (vermelho e preto) (GOMES et al., 2002), recentemente houve a inclusão de culturas de sequeiro nos solos de várzea. Dentre as culturas mais utilizadas, podemos destacar a soja (*Glycine max*) e o sorgo (*Sorghum bicolor*), as quais mostram-se importantes alternativas a cultura do arroz irrigado (SILVA e PARFITT, 2004).

Em ecossistemas agrícolas, os estoques de C orgânico são resultado do balanço entre o aporte de C ao solo através de resíduos culturais, raízes e exsudatos radiculares e as perdas do C resultantes da decomposição da matéria orgânica do solo (MOS) pela população microbiana, aliado aos processos de erosão e lixiviação (SIX et al., 1999; BIRD et al., 2008; FUENTES et al., 2012). Os resíduos culturais depositados no solo após a colheita são a principal fonte de C para a população microbiana do solo, e conseqüente, formação da MOS (IQBAL et al., 2015).

A mineralização do C de resíduos vegetais e formação da MOS é resultado do processo de decomposição, mediado pelos microrganismos do solo (WHALEN et al., 2014). Diversos fatores controlam este processo, dentre eles podemos citar: 1) características físico químicas do solo (textura, pH, temperatura, aeração e umidade); 2) tamanho dos resíduos culturais e sua localização na matriz mineral do solo (contato solo-resíduo); 3) atividade e biodiversidade de microrganismos decompositores; e 4) características químicas dos materiais orgânicos (SIX et al., 2006; COTRUFO et al., 2013; REDIN et al., 2014).

Dentre os diversos fatores controladores do processo de decomposição, a composição química dos resíduos culturais é uma das mais importantes. Nos modelos de decomposição, a composição química dos resíduos é considerada um fator-chave, onde os resíduos vegetais variam quanto aos teores de nitrogênio, celulose, hemicelulose ou lignina (ABIVEN et al., 2005). Os componentes dos resíduos culturais estão associados à velocidade de decomposição, onde frações lábeis são rapidamente decompostas, e moléculas recalcitrantes são degradadas mais lentamente. A biomassa microbiana pode alterar a sua estrutura e variedade de acordo com a composição química dos resíduos vegetais, otimizando o acúmulo de MOS (SIX et al., 2006), sendo que resíduos vegetais com alto teor de compostos recalcitrantes permanecem no solo por um maior período em comparação a resíduos com baixos teores (YANNI et al., 2011).

Recentemente, Cotrufo et al. (2013) propuseram a integração do conceito de decomposição microbiana de resíduos e estabilização da MOS. Segundo esta abordagem, os constituintes mais lábeis dos resíduos culturais seriam rapidamente decompostos e formariam produtos microbianos passíveis de estabilização na matriz mineral do solo. Esta abordagem evidencia a importância da matriz mineral do solo para a estabilização da MOS, onde solos com alta matriz de estabilização seriam passíveis de maior acúmulo de C (COTRUFO et al., 2013). Logo, a estabilização do C orgânico depende da adição de resíduos culturais de alta qualidade (frações lábeis e baixa relação C/N) e solos com maior matriz de estabilização (textura fina, altos teores de silte e argila) (CHIVENGE et al., 2011).

A estabilização do C no solo se dá através de diferentes mecanismos, podendo ser relacionada com o tamanho das partículas minerais do solo, onde a disponibilidade de compostos a população microbiana do solo vai estar ligada a qualidade química do substrato e seu grau de proteção física (CAMBARDELLA e ELLIOTT, 1993). As interações entre os compostos orgânicos e as partículas minerais do solo estão associadas ao período de ciclagem do C no sistema solo-atmosfera (CHRISTENSEN, 2001). Vários modelos são utilizados para descrever o comportamento da MOS (GOLCHIN et al., 1994a, 1994b), onde os compartimentos de estabilização da MOS são definidos pelo procedimento utilizado para a sua extração (SOHI et al., 2001). A utilização do fracionamento físico granulométrico permite estudar o C em diferentes frações físicas do solo (ROSCOE, 2003), sendo muito difundida no estudo da natureza, localização e biodegradação da MOS (BALESDENT et al., 1991).

A separação das frações resulta em compartimentos que diferem quanto a acessibilidade, estrutura e associação da MOS, resultando em três níveis de complexidade estrutural e funcional: fração particulada ou leve livre (FLL), fração oclusa (FO) ou intra-agregado e fração pesada (FP) ou organomineral (GOLCHIN et al., 1994b). Em cada compartimento atuam um ou mais mecanismos de estabilização, resultando em diferentes períodos de ciclagem e disponibilidade à população microbiana do solo. Os mecanismos que atuam na retenção da MO no solo incluem a recalitrância química dos componentes orgânicos, a estabilização da MO através de reações químicas com as superfícies minerais do solo e a proteção dos compostos por meio da inacessibilidade física entre a população microbiana e os substratos (CHRISTENSEN, 2001). As diferentes frações da MOS são influenciadas pelo manejo, uso da terra e entrada de diferentes resíduos culturais (YAMASHITA et al., 2006), sendo que as frações menos estáveis (FLL e FO) podem ser mais sensíveis a estas alterações (ROSCOE, 2003).

A incorporação e retenção do C provenientes de diferentes resíduos culturais com composições químicas distintas na MOS em solos hidromórficos ainda é pouco relatada em estudos no Brasil, sobretudo com a inclusão de culturas de sequeiro, em alternativa ao arroz irrigado. Melhorar a compreensão sobre este processo é importante para a reestruturação e viabilidade do sistema produtivo em áreas de várzea. Com base no exposto, este trabalho tem como proposta compreender como a adição de resíduos culturais de diferentes culturas com composições químicas distintas influenciam na estabilização da MOS em dois solos hidromórficos com diferentes texturas.

1.1 HIPÓTESE

Resíduos culturais com maior fração lábil contribuem mais efetivamente na estabilização de C no solo, a qual é favorecida por maiores teores de silte e argila.

1.2 OBJETIVO GERAL

Compreender a incorporação e estabilização do C oriundo de resíduos culturais da parte aérea e raízes de arroz, soja e sorgo nas frações físicas granulométricas da matéria orgânica de dois solos de várzea com textura distinta.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Determinar o C remanescente de resíduos culturais da parte aérea e raízes de arroz, soja e sorgo em dois solos de várzea com diferentes conteúdos de silte e argila.

Avaliar a dinâmica de incorporação de C oriundo de resíduos de parte aérea e raízes de arroz, soja e sorgo nas frações granulométricas de solos com características contrastantes de silte e argila.

2 CARBONO-¹³C DE RAÍZES E PARTE AÉREA DE CULTURAS DE VERÃO EM FRAÇÕES FÍSICAS DA MATÉRIA ORGÂNICA DE DOIS SOLOS DE VÁRZEA¹

2.1 ABSTRACT

Crop diversification in lowland areas in Rio Grande do Sul is incorporating sorghum (*Sorghum bicolor*) and soybean (*Glycine max*) into rotation system with irrigated rice (*Oryza sativa*). Little is known about the impact of these crop residues additions on carbon (C) stabilization in physical fractions of soil organic matter (SOM) in hydromorphic soils. The objective of this study was to understand the contribution of rice, soybean and sorghum crop residues to C accumulation in different physical fractions of SOM in two soils, with different textures. During 360 days, an incubation with rice, sorghum and soybean shoots and roots ¹³C enriched was carried out to evaluate crop residues C incorporation into SOM. The C incorporation and stabilization in the hydromorphic soils (Planossolo Hidromórfico Eutrófico gleissólico e Planossolo Hidromórfico Eutrófico arênico) were evaluated through physical fractionation method, based on size (> 250 µm, 250-53 µm and <53 µm). The crop residues, soils and physical fractions of SOM influenced C stabilization in the soil at the end of 360 days. Higher amounts of C were observed in >250 and <53 µm fractions. Planossolo Gleissólico was more efficient on C stabilization due higher silt and clay content. C stabilization from roots was higher in soybean and sorghum crops than rice. Soil texture did not influence roots C stabilization in fraction > 250 µm. For the fraction <53 µm, only soybean roots showed influence of soil texture on C stabilization, with higher C stabilized in Planossolo Gleissólico. The results indicate that the rice crop residues are important for a high C retention in hydromorphic soils, especially in the fraction <53 µm. The inclusion of soybean and sorghum crops in the lowland environment promotes a higher roots C stabilization in soil, being an important alternative for crop rotation with rice. The soil with higher silt and clay content presents a higher effectiveness of C stabilization in the fraction <53 µm, mainly from shoots.

Keywords: Stabilization, texture, ¹³C isotope

¹ Artigo elaborado de acordo com as normas da Revista Brasileira de Ciência do Solo

2.2 INTRODUÇÃO

Os solos de várzea (hidromórficos) no Rio Grande do Sul ocupam uma vasta área, que corresponde a mais de 5 milhões de hectares (Gomes et al., 2002). Estes solos têm como principal utilização o cultivo do arroz irrigado (*Oryza sativa*). Recentemente, com o propósito de prover o aumento da rentabilidade destas áreas, devido a infestação de plantas daninhas (arroz vermelho) e patógenos, culturas de sequeiro como sorgo (*Sorghum bicolor*) e soja (*Glycine max*) têm sido cultivadas em áreas de várzea (Silva e Parfitt, 2004) em alternativa a cultura do arroz irrigado. A diversificação de culturas em áreas agrícolas implica na modificação da dinâmica do C no solo, uma vez que resíduos culturais com qualidade química distinta serão adicionados ao solo.

A qualidade química dos resíduos culturais é um dos principais fatores que governam as taxas de decomposição e entrada de C ao solo (Puttaso et al., 2011). As diferentes famílias de plantas (principalmente espécies de Fabaceae e Poaceae) apresentam constituições químicas distintas (Roumet et al., 2008; Redin et al., 2014), variando seus teores de N, fração solúvel, hemicelulose, celulose e lignina (Prescott, 2010). A decomposição de raízes e parte aérea também ocorre de forma diferenciada no solo devido as distintas composições químicas e a localização dos resíduos culturais, os quais exercem influência sobre a dinâmica da água, nutrientes e distribuição de C e N no solo, afetando diretamente a atividade microbiana (Coppens et al., 2006).

A estabilização da MOS se dá por diferentes mecanismos que conferem distintos períodos de ciclagem e permanência dos compostos de C no solo (Balesdent, 1996). O fracionamento físico da MOS de acordo com o tamanho das partículas do solo destaca a importância das associações entre os componentes orgânicos e inorgânicos para a estabilização da MOS (Christensen, 2001). As frações separadas por este método podem ser classificadas em diferentes graus de complexidade, onde as frações mais grosseiras, denominadas de particulada possuem um período de ciclagem menor, estando seu mecanismo de estabilização relacionado à recalitrância química das moléculas (Bird et al., 2008). A fração pesada, a qual se utiliza da associação organomineral na estabilização do C, possui um período de ciclagem superior e se mostra como principal mecanismo de estabilização do C no solo (Schulten e Leinweber, 2000).

O fracionamento físico da MOS é uma importante ferramenta para a compreensão das interações entre os componentes orgânicos e inorgânicos, sobre a ciclagem da MOS no sistema solo-atmosfera e sobre os processos de manejo e uso das terras (Balesdent et al., 1991; Diochon e Kellman, 2009; Diochon et al., 2016). Recentemente, Cotrufo et al. (2013) propuseram a união do conceito de decomposição e estabilização de C no solo, onde as frações de maior qualidade dos resíduos vegetais adicionados ao solo (maiores teores de N e frações solúveis) seriam rapidamente degradadas pela população microbiana, sendo que os produtos deste processo dominariam a estabilização do C na matriz mineral do solo através de associações organominerais, sendo favorecida em solos com maiores teores de silte e argila.

A influência da qualidade química dos resíduos vegetais sobre a decomposição e estabilização da MOS é um aspecto ainda pouco estudado (Bird et al., 2008), sobretudo em solos de várzea aliado a culturas alternativas ao arroz irrigado. O emprego de isótopos possibilita o conhecimento de como os diferentes componentes dos sistemas produtivos exercem influência nos processos de formação da MOS (Alves e Zotarelli, 2005). Dessa forma, o presente estudo tem como objetivo compreender como a utilização das culturas do arroz, soja e sorgo, com diferentes composições químicas podem afetar a incorporação e estabilização da MOS em solos hidromórficos com conteúdos distintos de silte e argila.

2.3 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo consistiu do fracionamento físico granulométrico da MOS de amostras de dois solos provenientes do trabalho realizado por Dossin (2016). A seguir são descritos brevemente os solos utilizados, os resíduos culturais e a incubação desenvolvida por Dossin (2016) que originou as amostras para o presente estudo.

2.3.1 Solos

Os dois solos hidromórficos utilizados no experimento foram coletados na camada de 0-20 cm de profundidade em áreas cultivadas com arroz irrigado. O Planossolo Hidromórfico Eutrófico gleissólico (Embrapa, 2013) foi coletado na área

experimental do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) em Santa Maria – RS e o Planossolo Hidromórfico Eutrófico arênico (Embrapa, 2013) foi coletado em uma propriedade rural no município de Faxinal do Soturno – RS. Após a coleta, os solos foram destorroados, peneirados em malha de 4mm, homogeneizados e os resíduos culturais remanescentes visíveis a olho nu foram removidos. Posteriormente, os solos foram secos a temperatura ambiente por sete dias, peneirados em malha 2 mm e armazenados em sacos escuros até o início da incubação. As características físicas e químicas dos solos são apresentadas na Tabela 1. Os dois solos, embora apresentem a mesma classe textural, diferem quanto a distribuição do tamanho de partículas, sendo que o Planossolo gleissólico apresenta 1,8 vezes mais argila + silte do que o Planossolo arênico.

2.3.2 Resíduos Culturais

Os resíduos culturais utilizados no estudo compreenderam a parte aérea (folhas + talos/colmos) e raízes de arroz, sorgo e soja enriquecidos e não enriquecidos com ^{13}C . O enriquecimento das plantas com o isótopo ^{13}C foi realizado em casa de vegetação através da aplicação de pulsos semanais de $^{13}\text{CO}_2$ desde a emergência até a maturação fisiológica das plantas. Durante o mesmo período e no mesmo local foram cultivadas plantas das mesmas espécies, porém, sem os pulsos de marcação (não enriquecidas). Ao final do ciclo de desenvolvimento as plantas foram colhidas e separadas em parte aérea (folhas e talos/colmos) e raízes e secas em estufa de ar forçado a uma temperatura de 45°C . Para a realização da incubação, os resíduos foram cortados manualmente em pedaços de aproximadamente 1 cm.

Os resíduos culturais secos a 45°C foram moídos em moinho tipo Willey para determinação da composição química dos resíduos culturais. A fração solúvel (FS), e o conteúdo de hemicelulose (Hem), celulose (Cel) e lignina (Lig) dos resíduos foram determinadas pelo método adaptado de Van Soest (1963), conforme descrito por Redin et al. (2014). Uma subamostra dos resíduos culturais moídos foi seca a 65°C para determinação da matéria seca (MS). Em seguida a subamostra foi finamente moída para determinação dos teores de C, N e abundância isotópica de ^{13}C ($\delta^{13}\text{C}$). O C e o N total foram determinadas em analisador elementar (Flash EA 1112, Thermo Finnigan, Milan, Italy). A abundância isotópica de ^{13}C foi determinada em um espectrômetro de massas de razão isotópica (DELTA V Advantage, Thermo Fisher

Scientific, Bremen, Germany) acoplado a um analisador elementar (Flash 2000 IRMS, Thermo Fisher Scientific, Bremen, Germany). As características dos resíduos estão mostradas na tabela 2.

2.3.3 Incubação

A incubação foi conduzida em casa de vegetação, em delineamento inteiramente casualizado com três repetições. Os tratamentos foram compostos pela combinação de resíduos de parte aérea e raízes enriquecidas e não enriquecidas com o isótopo ^{13}C , afim de rastrear a contribuição de cada resíduo (parte aérea e raízes) para o C das frações granulométricas do solo. Os tratamentos avaliados foram os seguintes:

T1 – Solo Planossolo Arênico (SPLA)

T2 – SPLA + parte aérea (PA) arroz ^{13}C em superfície + raízes ^{13}C

T3 – SPLA + (PA) arroz ^{13}C em superfície + raízes ^{12}C

T4 – SPLA + (PA) sorgo ^{13}C em superfície + raízes ^{13}C

T5 - SPLA + (PA) sorgo ^{13}C em superfície + raízes ^{12}C

T6 – SPLA + (PA) soja ^{13}C em superfície + raízes ^{13}C

T7 – SPLA + (PA) soja ^{13}C em superfície + raízes ^{12}C

T8 – Solo Planossolo Gleissólico (SPLG)

T9 – SPLG + (PA) arroz ^{13}C em superfície + raízes ^{13}C

T10 – SPLG + (PA) arroz ^{13}C em superfície + raízes ^{12}C

T11 – SPLG + (PA) sorgo ^{13}C em superfície + raízes ^{13}C

T12 – SPLG + (PA) sorgo ^{13}C em superfície + raízes ^{12}C

T13 – SPLG + (PA) soja ^{13}C em superfície + raízes ^{13}C

T14 – SPLG + (PA) soja ^{13}C em superfície + raízes ^{12}C

A contribuição dos resíduos da parte aérea para o C no solo foi quantificada nos tratamentos com os resíduos da parte aérea enriquecida com ^{13}C e raízes não enriquecidas. A contribuição das raízes para o C no solo foi determinada subtraindo-se os valores de ^{13}C no solo dos tratamentos com palha e raízes enriquecidas com ^{13}C daqueles em que apenas a parte área foi enriquecida com ^{13}C .

Cada unidade experimental foi composta de um tubo de PVC com diâmetro de 50 mm e altura de 14 cm. Os tubos foram fechados na extremidade inferior com tecido

tipo “voil” para permitir a drenagem da água no período de incubação e evitar a perda de solo. Em cada cilindro foram adicionados 235,6 g de solo seco, seguidas de uma leve compactação para obtenção de densidade de 1,15 g cm³. As raízes foram previamente misturadas ao solo seco e adicionadas aos cilindros de PVC. Em seguida foram adicionados 70 e 50 ml de H₂O para os tratamentos com SPLA e SPLG. Esse volume de água foi utilizado para que ocorresse um umedecimento uniforme da coluna de solo das unidades experimentais. Os resíduos da parte aérea foram umedecidos com água antes da disposição sobre o solo nos cilindros de PVC. A quantidade de resíduo utilizada nos tratamentos foi definida com base na produção das plantas, equivalente a 7 Mg ha⁻¹ de resíduos de parte aérea (folhas + talo/colmos) e a 2 Mg ha⁻¹ de raízes. A proporção de folhas e talos utilizada foi determinada no momento da colheita, e foi de 79% e 21% na cultura do arroz, 23% e 77% no sorgo e 58% e 42% na soja, respectivamente.

A umidade do solo nas unidades experimentais nos primeiros 180 dias não foi mantida constante, sendo variável em função das perdas de água via percolação e evaporação. O solo era umedecido em intervalos de aproximadamente duas semanas através da adição de 50 ml de água, simulando precipitações equivalentes a 25 mm. Após 180 dias do início do estudo, cada unidade experimental teve sua extremidade inferior lacrada com uma tampa de PVC para evitar a percolação da água. Assim, todas as unidades experimentais foram saturadas com água, mantendo-se uma lâmina de cerca de 2 cm até os 360 dias, data final do estudo. Este processo foi realizado com a finalidade de representar o período do cultivo de arroz irrigado por alagamento.

2.3.4 Avaliações

2.3.4.1 Fracionamento físico granulométrico da matéria orgânica do solo

O solo utilizado na incubação descrita anteriormente foi seco ao ar e peneirado em malha de 2 mm. O fracionamento físico granulométrico adotado neste estudo foi descrito por Balesdent et al. (1991), o qual permite a separação da MOS em três frações: > 250 µm, correspondente à fração associada à areia grossa; 53 – 250 µm, denominada de areia fina; e < 53 µm, representada pelos minerais de silte e argila. Para isso, 10 g de solo foram adicionados em frasco de vidro snap-cap de 150 ml com

10 pérolas de vidro de 3 mm de diâmetro e 50 ml de água destilada. As amostras foram agitadas em mesa agitadora horizontal (120 oscilações por minuto) por um período de 16 horas com a finalidade de destruir os agregados e dispersar os minerais de silte e argila. Após a agitação, as amostras de solo foram passadas pelas peneiras de malha 250 e 53 μm e lavadas com água destilada até a água da lavagem estar translúcida, com a finalidade de separar as três frações descritas acima. As frações isoladas em cada peneira e o material que foi transpassado por estas foram secas em estufa a 60°C. Posteriormente, as amostras foram pesadas, homogeneizadas e moídas em almofariz para a determinação dos teores de C total e abundância isotópica de ^{13}C conforme descrito na caracterização dos resíduos vegetais.

2.3.4.2 ^{13}C remanescente nos resíduos culturais e ^{13}C no solo

A quantidade de ^{13}C remanescente nos resíduos e no solo foram determinadas aos 30, 180 e 360 dias após o início do estudo. Em cada data de avaliação, as raízes e os resíduos culturais do solo foram previamente removidos, secos em estufa a 65°C e pesados para a determinação da matéria seca remanescente. Em seguida, os resíduos remanescentes foram moídos finamente em moinho do tipo “rolos” para posterior determinação dos teores de C total e abundância isotópica de ^{13}C . Após a remoção dos resíduos das unidades experimentais, o solo foi homogeneizado, seco ao ar e moído em moinho do tipo “rolos”. A determinação dos teores de C total e abundância isotópica de ^{13}C nos resíduos remanescentes e no solo foi realizada conforme descrito na caracterização dos resíduos vegetais.

2.3.5 Cálculos

2.3.5.1 Estimativa das transformações do ^{13}C

Os valores isotópicos foram expressos em relação ao padrão internacional Vienna-Pee Dee Belemnite (V-PDB):

$$^{13}\text{C}_{\text{excesso}} (\text{átomo}\%) = ^{13}\text{C}_{\text{Amostra}} (\text{atom}\%) - ^{13}\text{C}_{\text{Abundância natural}} (\text{atom}\%) \quad (1)$$

Onde, $^{13}\text{C}_{\text{excesso}}$ representa o excesso isotópico de ^{13}C da amostra em atom%; $^{13}\text{C}_{\text{amostra}}$ é a abundância isotópica de ^{13}C da amostra em atom%; e $^{13}\text{C}_{\text{abundância natural}}$ é a abundância isotópica de ^{13}C em atom% do padrão internacional Vienna-Pee Dee Belemnite (V-PDB).

A quantidade de ^{13}C adicionada ao solo ($^{13}\text{C}_{\text{ad}}$, mg kg^{-1}) com os resíduos culturais foi calculada através da seguinte equação:

$$^{13}\text{C}_{\text{ad}} = \text{C}_{\text{ad}} \times (e^{13}\text{C}_{\text{rc}} - e^{13}\text{C}_{\text{s}}) \quad (2)$$

Onde, C_{ad} é a quantidade de C adicionada com os resíduos culturais (mg kg^{-1}); $e^{13}\text{C}_{\text{rc}}$ e $e^{13}\text{C}_{\text{s}}$ é o excesso isotópico (atom%) dos resíduos e do solo.

2.3.5.2 ^{13}C remanescente nos resíduos culturais e no solo

A quantificação do ^{13}C remanescente nos resíduos e no solo foram realizados aos 30, 180 e 360 dias após a instalação da incubação. Para o cálculo do C remanescente nos resíduos foram utilizadas as seguintes equações:

$$^{13}\text{C}_{\text{rem}} = \text{QMS}_{\text{rc}} \times \% \text{C} \times e^{13}\text{C}_{\text{rc}} \quad (3)$$

$$^{13}\text{C}_{\text{rem}}\% = \left(\frac{^{13}\text{C}_{\text{rem}}}{^{13}\text{C}_{\text{ad}}} \right) \times 100 \quad (4)$$

Onde, $^{13}\text{C}_{\text{rem}}$ e $^{13}\text{C}_{\text{rem}}\%$ representam a quantidade de ^{13}C remanescente nos resíduos em mg kg^{-1} e % do C adicionado; QMS_{rc} refere-se a quantidade de matéria seca (MS) remanescente dos resíduos culturais (mg kg^{-1}); $\% \text{C}_{\text{rc}}$ é a concentração de C na MS dos resíduos remanescentes (mg kg^{-1}); $e^{13}\text{C}_{\text{rc}}$ é o excesso isotópico de ^{13}C (atom%) nos resíduos remanescentes.

Para o cálculo do ^{13}C no solo (C-novo), utilizou-se das seguintes equações:

$$^{13}\text{C}_{\text{solo}} = \text{QCs} \times (e^{13}\text{C}_{\text{src}} - e^{13}\text{C}_{\text{s}}) \quad (5)$$

$$^{13}\text{C}_{\text{solo}}\% = (^{13}\text{C}_{\text{solo}} / ^{13}\text{C}_{\text{ad}}) \times 100 \quad (6)$$

Sendo, $^{13}\text{C}_{\text{solo}}$ e $^{13}\text{C}_{\text{solo}} \%$ a quantidade de ^{13}C no solo em mg kg^{-1} e % do C adicionado, respectivamente; QC_s é a quantidade de C no solo (mg); e $^{13}\text{C}_{\text{src}}$ e $e^{13}\text{C}_s$ é o excesso isotópico em ^{13}C do solo nos tratamentos com resíduos e naqueles com somente solo, respectivamente.

O fator de contribuição relativa (RCf) do C no solo das raízes vs parte aérea foi calculado pela seguinte equação, proposta por (Rasse et al., 2005):

$$\text{RCf} = \frac{\frac{\text{C no solo derivado raízes}}{\text{total de C adicionado raízes}}}{\frac{\text{C no solo derivado parte aérea}}{\text{total de C adicionado parte aérea}}} \quad (7)$$

2.3.6 Análise estatística

Os resultados de ^{13}C remanescente das raízes e parte aérea de todas as culturas, ^{13}C e C-novo no solo foram submetidos à análise de variância, sendo analisada a interação entre os fatores resíduos culturais (RC), tipo de solo (S) e frações granulométricas (F). As médias dos tratamentos foram comparadas através do uso do teste de Tukey ($P < 0,05$). Todos os dados foram analisados utilizando o programa estatístico SISVAR (Ferreira, 2011).

2.4 RESULTADOS

2.4.1 ^{13}C remanescente

A quantidade de ^{13}C remanescente nos resíduos da parte aérea nas três datas avaliadas foi influenciada apenas pelo tipo de resíduo cultural, não demonstrando efeito do solo sobre o ^{13}C remanescente (Tabela 3). Aos 30 dias de incubação, menores quantidades de ^{13}C remanescentes foram observadas para os resíduos culturais de parte aérea de soja e sorgo (Tabela 4). Aos 180 dias de incubação, o conteúdo de ^{13}C remanescente nos resíduos culturais da parte aérea da soja e do arroz foram menores do que o ^{13}C remanescente na parte aérea do sorgo. As quantidades de ^{13}C dos resíduos culturais decresceram ao longo da incubação, aos

360 dias as menores quantidades de ^{13}C remanescente foram quantificadas para o tratamento contendo os resíduos da parte aérea do arroz (Tabela 4).

Para as raízes, as quantidades de ^{13}C remanescente não foram influenciadas pelas culturas e os solos estudados (Tabela 4). Aos 360 dias de incubação, as raízes das três culturas haviam sido totalmente incorporadas nas frações granulométricas do solo, não restando raízes com uma granulometria superior a 2 mm (Tabela 5).

2.4.2 ^{13}C no solo

As quantidades de ^{13}C no solo provenientes dos resíduos culturais da parte aérea de arroz, sorgo e soja foram significativas para interação entre solo e resíduo cultural aos 30, 180 e 360 dias de avaliação (Tabela 3). O Planossolo Gleissólico foi o solo que apresentou maiores quantidades de ^{13}C oriundo dos resíduos culturais avaliados aos 30 dias de incubação (Tabela 4). Dentre as culturas, o tratamento com resíduos de soja apresentou maior quantidades de ^{13}C em ambos os solos neste período, 2,1 e 0,8 % do ^{13}C adicionado para o Planossolo Gleissólico e Planossolo Arênico, respectivamente. Aos 360 dias, as maiores quantidades de ^{13}C no solo foram quantificados no Planossolo Gleissólico, onde a cultura do arroz apresentou maiores quantidades de ^{13}C no solo que a culturas do sorgo e soja.

A quantidade de ^{13}C no solo oriundo das raízes foi significativa para a interação entre resíduo cultural e solo aos 30, 180 e 360 dias de avaliação (Tabela 3). Inicialmente, a maior quantidade de ^{13}C oriundo das raízes foi quantificada no tratamento com raízes de soja, independentemente do solo (Tabela 5). Aos 180 dias de incubação, o tratamento com as raízes de soja apresentou maior quantidade de ^{13}C no solo. O Planossolo Gleissólico não influenciou a estabilização de ^{13}C proveniente das raízes, exceto para raízes de sorgo. Aos 360 dias de incubação, os tratamentos com raízes de soja e sorgo apresentaram maiores quantidades de ^{13}C no solo.

2.4.3 ^{13}C frações físicas granulométricas do solo

Em todos os tratamentos avaliados, a incorporação de ^{13}C nas frações físicas granulométricas do solo aumentou ao longo das avaliações (Tabela 4, 5). As quantidades de ^{13}C incorporadas oriundas da parte aérea de soja, arroz e sorgo foram

significativas para a interação entre solo, resíduo cultural e frações, aos 30, 180 e 360 dias de avaliação (Tabela 3). No período inicial, as frações que apresentaram maiores conteúdos de ^{13}C no solo foram as mais grosseiras ($>250\ \mu\text{m}$ e $250-53\ \mu\text{m}$), exceto para o tratamento com resíduos da parte aérea de soja no Planossolo Gleissólico (Tabela 4). O ^{13}C presente na fração $>250\ \mu\text{m}$ oriundo da parte aérea das culturas de arroz, soja e sorgo, apresentou tendência de diminuição ao longo dos 180 dias de incubação (Figura 1). O maior incremento de ^{13}C na fração $>250\ \mu\text{m}$ ao final da incubação foi observado para a cultura do arroz, com 56,7% do ^{13}C total presente no solo nesta fração. Para a fração areia fina ($250-53\ \mu\text{m}$) o ^{13}C oriundo dos resíduos culturais da parte aérea aumentou ao longo da incubação (Tabela 4). Dentre os solos, o Planossolo Gleissólico apresentou maiores quantidades de ^{13}C na fração areia fina.

Os conteúdos de ^{13}C na menor fração avaliada ($<53\ \mu\text{m}$), denominada fração organomineral, aumentaram no decorrer das avaliações (Tabela 4). Inicialmente, a cultura da soja apresentou maiores quantidades de ^{13}C nesta fração em ambos os solos. Aos 360 dias, o tratamento com resíduos de parte aérea de arroz apresentaram a maior quantidade de ^{13}C retido nesta fração em ambos os solos (5,3% do ^{13}C para o Planossolo Arênico e 12,3% para o Planossolo Gleissólico), mantendo este comportamento nas avaliações subsequentes.

O ^{13}C no solo oriundo das raízes de arroz, soja e sorgo foi significativa para a interação entre solo, resíduo cultural e fração em todas datas avaliadas (Tabela 3). As frações mais grosseiras incorporaram maiores quantidades de ^{13}C no solo no período inicial de avaliação, mantendo maior proporção que o ^{13}C estabilizado na fração organomineral até os 180 dias (Tabela 4, Figura 2). Dentre os resíduos, as maiores quantidades de ^{13}C presente na fração areia grossa neste período foram observadas no tratamento com raízes de soja. Ao final de 360 dias de incubação, as maiores quantidades de ^{13}C na fração areia grossa foram oriundas das raízes de soja e sorgo. Os conteúdos de ^{13}C na fração organomineral foram maiores para as raízes de soja aos 30 dias, mantendo este comportamento até os 180 dias de avaliação, superando as quantidades de ^{13}C nos tratamentos com raízes de sorgo e arroz neste período. Ao final do estudo, os tratamentos com as raízes de soja e sorgo apresentaram maiores quantidades de ^{13}C na fração organomineral.

2.4.4 C-novo no solo

Os conteúdos de C-novo no solo aumentaram ao longo do período de incubação (Figura 3). Houve interação entre solo e resíduo cultural nas três datas de avaliação para o C-novo no solo oriundo da parte aérea (Tabela 3). Os resíduos culturais de parte aérea apresentaram baixos conteúdos de C-novo no solo no período inicial, sendo a soja, a cultura com os maiores valores de C-novo neste período (Figura 3a, b). Ao final de 360 dias de avaliação, as maiores quantidades de C-novo no solo foram oriundas dos resíduos culturais de arroz, chegando a 72,41 g m⁻². Dentre os solos, as quantidades de C-novo foram significativamente maiores no Planossolo Gleissólico.

A cinética de retenção de C-novo no solo proveniente das raízes foi influenciada pela interação entre os fatores resíduos culturais e solo (Tabela 3). O C-novo no solo oriundo das raízes de soja atingiu 24,45 g m⁻² no início da incubação, chegando a 39,27 g m⁻² ao final do estudo (Figura 3c, d).

2.4.5 C-novo nas frações físicas granulométricas do solo

O conteúdo de C-novo no solo presente nas diferentes frações físicas granulométricas foi significativo para interação entre solo, resíduos culturais e fração aos 30, 180 e 360 dias de avaliação (Figuras 4). No período inicial de incubação, o C-novo presente nas frações mais grosseiras (>250 e 250-53 µm) foi maior que na fração pesada nos tratamentos com resíduos culturais de arroz e sorgo. Com o decorrer da incubação, aos 180 dias, os conteúdos de C-novo na fração >250 diminuíram, sendo observado um aumento na fração 250-53 µm para o C-novo no solo oriundo da parte aérea. Ao final da incubação, foi quantificado para a cultura do arroz maiores conteúdos de C-novo na fração mais grosseira, com elevado incremento de C-novo a partir dos 180 dias. Os conteúdos de C-novo na fração 250-53 µm aumentaram a partir dos 30 dias, sendo mais representativos para os resíduos de parte aérea da soja aos 180 dias de avaliação (Figura 4c, d). Ao final das avaliações, dentre os solos, o Planossolo Gleissólico havia retirado maiores quantidades de C-novo na fração areia fina.

Para as quantidades de C-novo oriundo dos resíduos culturais de parte aérea presente no compartimento com a menor granulometria, associado aos minerais de

silte e argila, houve acréscimo de C-novo ao longo do tempo (Figuras 4 e 5e, f). A partir da decomposição inicial, aos 30 dias, os resíduos culturais da parte aérea da soja apresentaram as maiores quantidades de C-novo na fração organomineral (93,5 g m⁻²). Ao final do estudo, as maiores quantidades de C-novo no solo nesta fração foram quantificadas para o tratamento com resíduos de parte aérea de arroz (32 g m⁻²).

O C-novo presente nas diferentes frações físicas granulométricas do solo oriundo das raízes das três culturas foi significativo para a interação entre solo, resíduo cultural e frações ao longo da incubação (Tabela 3). Dentre as frações, a fração > 250 µm apresentou maior representatividade ao longo do processo de decomposição e incorporação de C-novo no solo, tendo as raízes de soja maiores quantidades de C-novo nesta fração aos 30 dias de incubação (Figura 5). Neste período de estudo, maiores quantidades de C-novo na fração organomineral do solo foram quantificadas para as raízes da soja em ambos os solos, 5,5 e 8,06 g m⁻² para o Planossolo Arênico e Gleissólico, respectivamente (Figura 5e, f). Ao final da incubação, as raízes de soja e sorgo apresentaram as maiores quantidades de C-novo no solo na fração organomineral.

2.4.5 Fator de contribuição relativa de carbono no solo de raízes vs parte aérea

O fator de contribuição relativa (RCf) refere-se à incorporação de C no solo proveniente dos resíduos culturais de raízes vs parte aérea. A análise estatística demonstrou significância dos fatores solo, resíduo cultural e fração sobre o RCf das culturas avaliadas, sendo significativa aos, 30, 180 e 360 dias de avaliação (Tabela 3). No início da incubação, o valor do fator RCf para os conteúdos de C-novo no solo chegaram a 31,2, decrescendo com o avanço do estudo (Tabela 6). Com o decorrer da incubação houve uma diminuição no RCf para as culturas e solos avaliados.

Dentre as frações físicas granulométricas, ao final de 360 dias a fração >250 µm apresentou os maiores índices para o tratamento com resíduos culturais da soja, atingindo 19,8 e 5,7 para Planossolo Arênico e Planossolo Gleissólico, respectivamente. Os valores de RCf para o C presente na fração 250-53 µm decresceu ao longo das avaliações (Tabela 6).

Aos 180 dias os valores do RCf para o C no compartimento organomineral foi maior para o tratamento com resíduos culturais de sorgo, 9,1 e 4,5 aos 30 e 180 dias

de avaliação, respectivamente. Ao final da incubação a cultura da soja apresentou a maior contribuição relativa sobre a retenção de C pelas raízes vs parte aérea.

2.5 DISCUSSÃO

2.5.1 Qualidade de resíduos culturais e tipo de solo sobre a decomposição

A adição de resíduos culturais ao solo estimula a atividade microbiana, resultando na diminuição dos conteúdos de C dos resíduos culturais adicionados ao solo (Cotrufo et al., 2013). Esta condição é caracterizada por uma rápida diminuição dos teores iniciais de C e compostos lábeis presentes nos resíduos culturais recém adicionados ao solo (Angers e Recous, 1997; Abiven et al., 2005), devido ao ataque microbiano a estes compostos facilmente decomponíveis (Zhu et al., 2016). Inicialmente os distintos teores de lignina parecem não regular a taxa de decomposição e mineralização do C no solo (Abiven et al., 2005; Redin et al., 2014). O esgotamento dos compostos mais lábeis resulta em uma diminuição da velocidade da decomposição, onde predominam frações mais recalcitrantes dos resíduos culturais, caracterizados por uma elevada relação C/N, lignina e complexos insolúveis (Lu et al., 2003). A diminuição das quantidades residuais de C após a adição ao solo são observadas tanto para resíduos de raízes incorporados ao solo, quanto para os resíduos de parte aérea depositados sobre a superfície (Lian et al., 2016), como observado no presente estudo.

Os menores conteúdos de ^{13}C remanescente para os resíduos culturais no tratamento da soja no período inicial de incubação pode estar relacionado aos maiores conteúdos de N presentes nos resíduos desta cultura. A composição química dos resíduos culturais (N, lignina, hemicelulose) é um importante fator, influenciando o processo microbiano e as taxas de decomposição (Lian et al., 2016). A distinta composição química das culturas estudadas pode ter governado o processo de decomposição. Diferentes culturas apresentam composições químicas distintas, as quais variam seus teores de lignina, celulose, hemicelulose e N nos resíduos vegetais (Trinsoutrot et al., 2000; Redin et al., 2014), influenciando as taxas de decomposição (Roberta Gentile, Vanlauwe e Six, 2011). Durante todo período de incubação, o solo não apresentou efeito sobre o processo de decomposição da parte aérea e raízes.

Assim, é possível inferir que as diferenças observadas quanto a decomposição dos resíduos culturais seja relacionada a composição química dos mesmos.

O alagamento das unidades experimentais ocorreu aos 180 dias de incubação, visando representar a condição que ocorre no período de implantação da cultura do arroz. O alagamento do solo reduz a disponibilidade de oxigênio e modifica a eficiência microbiana sobre a degradação dos resíduos vegetais, tornando o processo de decomposição menos eficiente e incompleto nesta condição (Sahrawat, 2005). Ao final da incubação, os resíduos da parte aérea de soja apresentaram os maiores teores de ^{13}C remanescente. Os maiores teores de lignina presentes nos resíduos culturais de soja, podem limitar sua degradação pela população microbiana do solo em função de sua recalcitrância química e anatomia do tecido, afetando a acessibilidade enzimática (Abiven et al., 2005). Inicialmente o ataque microbiano é mais intenso devido as maiores quantidades de N presentes nos resíduos culturais da soja, e a partir da exaustão destes compostos ocorre limitação no processo de decomposição em razão da predominância de compostos mais recalcitrantes, como a lignina.

Os conteúdos de C dos resíduos remanescentes da parte aérea do arroz foram significativamente menores que das demais culturas avaliadas após o alagamento do solo, possivelmente devido ao menor conteúdo de lignina nos resíduos culturais do arroz. A decomposição de resíduos culturais com baixo conteúdo de lignina pode não ser limitada, mesmo em condições anaeróbicas (Sahrawat, 2005). Puttaso et al. (2011), ao estudarem a decomposição da palha de arroz e outras culturas, verificaram que a relação C/N não é um indicador preciso do processo de decomposição, uma vez que resíduos com relação C/N menores decompuseram mais lentamente que a palha de arroz. Os autores associaram a maior decomposição dos resíduos de arroz aos menores conteúdos de lignina. Da mesma forma, Koger et al. (2013), estudando o efeito da inundação sobre a decomposição da palha de arroz, obtiveram maiores reduções do C dos resíduos culturais após o alagamento, associando esta diminuição ao aumento da atividade bacteriana fermentativa e redução na atividade fúngica. Tais resultados poderiam explicar a elevada decomposição dos resíduos culturais de arroz após o alagamento.

Aos 180 dias de incubação, as raízes das três culturas apresentaram baixas quantidades de C remanescente, sendo que ao final do estudo não foram recuperados resíduos remanescentes maiores que 2 mm para as raízes das três culturas, havendo

a total incorporação do C das raízes na matriz do solo. A incorporação das raízes ao solo favoreceu a decomposição destes resíduos culturais no período inicial da incubação, resultando em baixa recuperação de C das raízes aos 180 dias de avaliação. Diversos estudos relatam um maior período de permanência do C oriundo das raízes no solo (Gale e Cambardella, 2000; Puget e Drinkwater, 2001; Rasse et al., 2005; Kong e Six, 2010) sendo estas as principais responsáveis pelo acúmulo de C na MOS (Rasse et al., 2006). No presente estudo as raízes foram cortadas em pedaços de cerca de 1 cm de comprimento e incorporadas ao solo nas unidades experimentais na montagem da incubação. Este processo pode ter favorecido a decomposição das raízes. A incorporação de resíduos culturais ao solo aumenta sua área de contato com a matriz mineral do solo, favorecendo o processo de decomposição pela população microbiana do solo (Puget e Drinkwater, 2001).

Apesar da distinta composição química das raízes das culturas avaliadas, este não foi um fator determinante sobre o processo de decomposição. Aos 180 dias, as raízes de soja, sorgo e arroz apresentaram decomposição semelhante em ambos os solos, onde os diferentes conteúdos de silte e argila dos solos utilizados neste estudo não influenciaram no processo de decomposição. O maior contato solo-resíduo e fácil acesso pela população microbiana, além de melhores condições de umidade e temperatura, favorecem o processo de decomposição dos resíduos culturais das raízes, independentemente de sua composição química (Coppens et al., 2006).

2.5.2 Qualidade de resíduos e textura sobre a estabilização de carbono no solo

Com o avanço da decomposição dos resíduos culturais, as taxas de incorporação de C no solo aumentaram. Segundo a hipótese do presente estudo, esperava-se uma maior estabilização do C oriundo dos resíduos culturais da parte aérea de soja, tanto no início como nos estágios mais avançados da decomposição. Tal condição era esperada devido a hipótese estar embasada no trabalho de Cotrufo et al. (2013), no qual os autores propõem a abordagem Eficiência Microbiana Matriz de Estabilização, sugerindo que as frações mais lábeis dos resíduos culturais recém adicionados ao solo são a principal fonte de produtos microbianos passíveis de estabilização nos solos com maiores teores de silte e argila. Esta condição foi observada nos 180 dias iniciais de incubação para os resíduos culturais da parte aérea de soja, e até o final para as raízes, tendo sido quantificados os maiores conteúdos

de C no Planossolo Gleissólico, sugerindo que a qualidade química é um fator importante sobre a estabilização de C no solo.

As maiores quantidades de C encontradas no Planossolo Gleissólico possivelmente resultam dos maiores teores de silte e argila neste solo. A elevada superfície reativa dos minerais de silte e argila promovem o aumento na estabilidade da matéria orgânica (Chivenge et al., 2011). As características de mineralogia do solo, em função da natureza química da fração mineral, carga superficial, precipitação de óxidos de Fe e Al e presença de cátions multivalentes, proporcionam a capacidade de adsorver materiais orgânicos, formando um mecanismo contra o ataque microbiano (Baldock e Skjemstad, 2000). A recalcitrância química (concentração de polifenóis e lignina) é o principal mecanismo de estabilização de C em solos arenosos, contribuindo para o acúmulo da MOS nas frações mais grosseiras em um curto período de tempo (Chivenge et al., 2011).

No período inicial de incubação os maiores conteúdos de C no solo foram observados no tratamento com raízes de soja. Este resultado pode estar relacionado a maior qualidade química dos resíduos culturais de soja (baixa C/N, alta fração solúvel), passíveis de estabilização num curto período de tempo, uma vez que são rapidamente decompostos pela população microbiana após a adição ao solo. O elevado contato dos resíduos culturais com a matriz mineral do solo resulta na aceleração do processo de decomposição pela população microbiana do solo, resultado da elevada troca de nutrientes e água, e conseqüente aumento da estabilização de C através da proteção física do solo e formação de agregados (Angers e Recous, 1997).

A decomposição parcial dos resíduos culturais de parte aérea de soja e sorgo a partir dos 180 dias de incubação podem explicar os maiores conteúdos de C no solo provenientes do tratamento com resíduos culturais de arroz ao final do estudo. As características químicas dos resíduos culturais do arroz, devido aos seus elevados teores de celulose e baixo conteúdo de lignina, pode não oferecer uma barreira à decomposição microbiana mesmo com elevada relação C/N (Puttaso et al., 2011).

2.5.3 Qualidade de resíduos e textura sobre a estabilização de carbono nas frações físicas granulométricas do solo

O fracionamento físico granulométrico permite a separação do C presente na MOS em diferentes compartimentos com distintas associações com a matriz mineral do solo (Roscoe, 2003). Inicialmente, os maiores conteúdos de C oriundo dos resíduos culturais das culturas em estudo encontravam-se na fração mais grosseira ($>250 \mu\text{m}$), sendo menores os teores de C oriundo dos resíduos culturais na fração areia fina ($250-53 \mu\text{m}$) e fração organomineral ($<53 \mu\text{m}$). Esta condição pode estar relacionada ao processo inicial de decomposição dos resíduos culturais pela população microbiana do solo. Após a adição de resíduos culturais ao solo ocorre a ação dos microrganismos do solo, tal processo resulta na diminuição da granulometria dos resíduos culturais, tanto de parte aérea quanto raízes, ocorrendo a incorporação do C ao solo (Aita et al., 1997). Os resultados do presente estudo corroboram com os obtidos por Diochon et al. (2016), ao estudarem a incorporação de C pelos resíduos culturais de cevada na MOS os autores verificaram que as frações mais grosseiras eram os principais compartimentos de incorporação de C após a adição de resíduos culturais ao solo, tendo uma rápida diminuição com o decorrer do estudo, indicando uma alta atividade biológica e transformação destas frações.

Aos 180 dias, os conteúdos de C derivados da parte aérea presentes na fração mais grosseira decresceu. Com o avanço do processo de decomposição ocorre a transferência do C para frações mais finas da MOS (Aita et al., 1997; Puget e Drinkwater, 2001). O C orgânico particulado, representado pelas frações grosseiras, é um compartimento dinâmico de C no solo, composto por fragmentos parcialmente decompostos de resíduos de plantas variando em curtos períodos de tempo (Cambardella e Elliott, 1993). Com a saturação do solo com água a partir dos 180 dias, as frações mais grosseiras apresentaram um novo aumento. Após o alagamento do solo ocorre degradação incompleta dos compostos orgânicos resultando na diminuição do processo de humificação, predominando nesta condição as frações de maior granulometria (Sahrawat, 2012).

As raízes apresentaram conteúdos de C no solo constantes para a fração areia fina. A fração associada a areia fina apresenta características de menor granulometria, associado a um estágio mais avançado de decomposição, onde os microrganismos atuam fragmentando os compostos presentes na fração mais grosseira, resultando

em moléculas menores incorporadas nas frações do solo associados a minerais de menor granulometria (Aita et al., 1997). O processo de transferência do C entre frações maiores e organominerais durante as avaliações das raízes possivelmente resultou da atuação mais efetiva das enzimas microbianas no processo de decomposição, devido ao maior contato com a matriz mineral do solo. A partir do processo de decomposição, ocorre a incorporação e transferência do C entre as frações físicas do solo (Aita et al., 1997).

A associação organomineral que ocorre nos minerais de silte e argila são assumidas como um dos principais mecanismos de estabilização do C no solo, estando em um estágio de decomposição mais avançado (Christensen, 2001; Cotrufo et al., 2013). Os maiores conteúdos de C presentes na fração argila no período inicial de incubação foram provenientes dos resíduos culturais da soja, tendo o Planossolo Gleissólico maior conteúdo de C que o Planossolo Arênico. Tais resultados podem ser correlacionados aos maiores conteúdos de N desta cultura. A fração organomineral pode ser um importante compartimento para a entrada inicial de C proveniente dos metabólitos microbianos (Castellano et al., 2015; Cotrufo et al., 2015). Os resultados obtidos corroboram com os estudos de Cotrufo et al. (2013) e estão de acordo com a hipótese do presente estudo, de que resíduos culturais com maior qualidade química promovem maior estabilização em solos com elevada matriz mineral. Contudo, este comportamento não se manteve ao longo da incubação, sendo observado apenas para as raízes de soja no Planossolo Gleissólico. A fração argila pode representar um compartimento dinâmico de C, o qual pode circular em curto período de tempo devido a remineralização de seus compostos (Diochon et al., 2016). Esta condição pode ser relacionada com a diminuição do C adicionado pelas raízes de soja no Planossolo Arênico, ocorrendo uma diminuição após uma elevada estabilização inicial.

Ao final da incubação, as maiores quantidades estabilizadas de C na fração organomineral do solo foram oriundas de resíduos culturais da parte aérea do arroz. Estes resultados contrariam a hipótese do presente estudo, onde esperava-se maiores quantidades de C na fração organomineral oriundo do tratamento com a parte aérea da soja. Possivelmente devido a maior decomposição ocorrida nos resíduos culturais de arroz a partir do período de alagamento, tenha resultado em maiores conteúdos de C presentes nesta fração. Os resultados de Gao et al. (2016) demonstraram sinais de compostos humificados mais elevados em resíduos de trigo

sob decomposição anaeróbica e menores sob decomposição aeróbica, tendo os grupos funcionais variado em diferentes condições de decomposição.

O fator RCf representa a contribuição relativa a incorporação e estabilização de C no solo oriundo de resíduos culturais de raízes e parte aérea, uma vez que a adição destes resíduos culturais ao solo é distinta (7 Mg ha⁻¹ e 2 Mg ha⁻¹, para parte aérea e raízes no presente estudo), sendo normalmente mais elevados para a parte aérea das culturas (Rasse et al., 2005). Os maiores valores de RCf designam uma maior incorporação de C ao solo pelas raízes em relação a promovida pela parte aérea sobre o aporte total ao solo. Inicialmente, o valor do RCf foi mais elevado, possivelmente devido a maior decomposição das raízes e incorporação do C ao solo.

Esta condição pode ser explicada devido à localização das raízes no interior do solo, promovendo um maior contato e interação destas com a matriz mineral do solo, facilitando o ataque microbiano e proporcionando melhores condições de umidade e temperatura para o processo de decomposição. As raízes são consideradas o principal constituinte da fração grosseira da MOS, onde os principais mecanismos atuantes para a estabilização são a recalitrância bioquímica (alta lignina) e proteção física em agregados do solo (Puget e Drinkwater, 2001). Ao final do estudo o RCf referente ao tratamento com as raízes de soja foi superior as demais culturas, tendo sido significativamente maior tanto para o solo, frações grosseiras e associada aos minerais. Ao estudar a influência de diferentes resíduos culturais de soja (raízes, talos e folhas) incorporados ao solo sob a decomposição, Lian et al. (2016) verificaram uma maior contribuição no C do solo proveniente das raízes, relacionando a natureza mais recalitrante dos resíduos à maior taxa de incorporação do C no solo. Tais resultados estão de acordo com os obtidos no presente estudo, onde ao final de 360 dias verificou-se uma maior contribuição relativa ao ¹³C adicionado pelas raízes na cultura da soja.

A média encontrada por Rasse et al. (2005) para o fator RCf foi de 2,4 para culturas *in situ*, 1,3 para incubações misturadas ao solo e 1,29 para experimentos de incubação com bolsas (*mesh bag*) de decomposição. Os resultados do presente estudo foram superiores aos encontrados por Rasse et al. (2005), possivelmente o curto período de avaliação aliado ao alagamento a partir dos 180 dias de incubação podem ter resultado nas distintas taxas de incorporação de C ao solo. Diversos estudos relatam uma maior representatividade na retenção de C ao solo promovido pelas raízes (Gale e Cambardella, 2000; Rasse et al., 2005; Kong e Six, 2010).

2.6 CONCLUSÕES

Os resíduos culturais de parte aérea de arroz foram decompostos em maiores quantidades que das culturas de sorgo e soja, tendo a diferente qualidade química dos resíduos influenciado o processo de decomposição. O tipo de solo não afetou a decomposição da parte aérea e raízes.

Os resíduos culturais da parte aérea do arroz foram mais eficientes na incorporação de C em solos hidromórficos em um curto período de tempo, favorecendo a estabilização do C na fração organomineral, considerada a mais importante na retenção de C no solo.

As frações físicas granulométricas mais grosseiras (>250 e 250-53 μm) são o principal compartimento de C formado no solo logo após a adição de resíduos culturais, sendo passíveis de alteração em um curto período de tempo.

A inclusão das culturas de sorgo e soja em solos hidromórficos promove uma maior estabilização de C no solo proveniente das raízes, demonstrando que estas culturas são uma importante alternativa a rotação de culturas com o arroz irrigado.

O Planossolo Gleissólico, com maiores conteúdos de silte e argila demonstra maior capacidade de estabilização de C na fração organomineral, principalmente a partir de resíduos culturais de parte aérea.

2.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abiven S, Recous S, Reyes V, Oliver R. Mineralisation of C and N from root, stem and leaf residues in soil and role of their biochemical quality. *Biol Fertil Soils*. 2005;42:119–128.

Aita C, Recous S, Angers DA. Short-term kinetics of residual wheat straw C and N under field conditions: characterization by C13-N15 tracing and soil particle size fractionation. *Eur J Soil Sci*. 1997;48:283–294.

Alves B, Zotarelli L. Emprego de isótopos estáveis para o estudo do carbono e do nitrogênio no sistema solo-planta. ... *No Sist Solo-* 2005;343–368. Angers DA, Recous S. *No Title*. *Plant Soil*. 1997;189:197–203.

Baldock JA, Skjemstad JO. Baldock, J. A., & Skjemstad, J. O. (2000). Role of the soil matrix and minerals in protecting natural organic materials against biological attack. *Organic Geochemistry*, 31, 697–710. *Org Geochem*. 2000;31:697–710.

Balesdent J. The significance of organic separates to carbon dynamics and its modelling in some cultivated soils. *Eur J Soil Sci*. 1996;47:485–493.

Balesdent J, Pétraud J-P, Feller C. Effets des ultrasons sur la distribution granulométrique des matières organique des sols. *Sci du Sol*. 1991;29:95–106.

Bird JA, Kleber M, Torn MS. 13C and 15N stabilization dynamics in soil organic matter fractions during needle and fine root decomposition. *Org Geochem*. 2008;39:465–477.

Cambardella CA, Elliott ET. Methods for physical separation and characterization of soil organic matter fractions. *Geoderma*. 1993;56:449–457.

Castellano MJ, Mueller KE, Oik DC, Sawyer JE, Six J. Integrating plant litter quality, soil organic matter stabilization, and the carbon saturation concept. *Glob Chang Biol*. 2015;21:3200–3209.

Chivenge P, Vanlauwe B, Gentile R, Six J. Comparison of organic versus mineral resource effects on short-term aggregate carbon and nitrogen dynamics in a sandy soil versus a fine textured soil. *Agric Ecosyst Environ*. 2011;140:361–371.

Christensen BT. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover. *Eur J Soil Sci*. 2001;52:345–353.

Coppens F, Garnier P, De Gryze S, Merckx R, Recous S. Soil moisture, carbon and nitrogen dynamics following incorporation and surface application of labelled crop residues in soil columns. *Eur J Soil Sci*. 2006;57:894–905.

Cotrufo MF, Soong JL, Horton AJ, Campbell EE, Haddix ML, Wall DH, Parton WJ. Formation of soil organic matter via biochemical and physical pathways of litter mass loss. *Nat Geosci*. 2015;8:776–779.

- Cotrufo MF, Wallenstein MD, Boot CM, Deneff K, Paul E. The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter? *Glob Chang Biol.* 2013;19:988–995.
- Diochon A, Gillespie AW, Ellert BH, Janzen HH, Gregorich EG. Recovery and dynamics of decomposing plant residue in soil: an evaluation of three fractionation methods. *Eur J Soil Sci.* 2016;67:196–205.
- Diochon AC, Kellman L. Physical fractionation of soil organic matter: Destabilization of deep soil carbon following harvesting of a temperate coniferous forest. *J Geophys Res.* 2009;114:G01016.
- Dossin, M. F., 2010. Dinâmica do carbono- ¹³C de raízes e parte aérea de culturas de verão em dois solos de várzea. Dissertação [mestrado]. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2016.
- Embrapa - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3.ed. Rio de Janeiro, 353 p., 2013.
- Ferreira DF. Sisvar: a computer statistical analysis system. *Ciência e Agrotecnologia.* 2011;35:1039–1042.
- Gale WJ, Cambardella CA. Carbon Dynamics of Surface Residue– and Root-derived Organic Matter under Simulated No-till. *Soil Sci Soc Am J.* 2000;64:190.
- Gao H, Chen X, Wei J, Zhang Y, Zhang L, Chang J, Thompson ML. Decomposition dynamics and changes in chemical composition of wheat straw residue under anaerobic and aerobic conditions. *PLoS One.* 2016;11:1–17.
- Gomes a S, Porto MP, Parfitt JMB, Silva C a S, Souza RO, Pauletto E a. Rotação de Culturas em Áreas de Várzea e Plantio Direto de Arroz. *Embrapa clima temperado série Doc.* 2002;89:9–36.
- Koger CH, Zablotowicz RM, Weaver MA, Tucker-Patterson MR, Krutz JL, Walker TW, Street JE. Effect of Winter Flooding on Weeds, Soybean Yield, Straw Degradation, and Soil Chemical and Biochemical Characteristics. *Am J Plant Sci.* 2013;4:10–18.
- Kong AYY, Six J. Tracing Root vs. Residue Carbon into Soils from Conventional and Alternative Cropping Systems. *Soil Sci Soc Am J.* 2010;74:1201.
- Lian T, Wang G, Yu Z, Li Y, Liu X, Jin J. Carbon input from ¹³C-labelled soybean residues in particulate organic carbon fractions in a Mollisol. *Biol Fertil Soils.* 2016;52:331–339.
- Lu Y, Watanabe A, Kimura M. Carbon dynamics of rhizodeposits, root- and shoot-residues in a rice soil. *Soil Biol Biochem.* 2003;35:1223–1230.

Prescott CE. Litter decomposition: what controls it and how can we alter it to sequester more carbon in forest soils? *Biogeochemistry*. 2010;101:133–149.

Puget P, Drinkwater LE. Short-Term Dynamics of Root- and Shoot-Derived Carbon from a Leguminous Green Manure. *Soil Sci Soc Am J*. 2001;65:771.

Puttaso A, Vityakon P, Saenjan P, Trelo-ges V, Cadisch G. Relationship between residue quality, decomposition patterns, and soil organic matter accumulation in a tropical sandy soil after 13 years. *Nutr Cycl Agroecosystems*. 2011;89:159–174.

Rasse DP, Dignac MF, Bahri H, Rumpel C, Mariotti A, Chenu C. Lignin turnover in an agricultural field: From plant residues to soil-protected fractions. *Eur J Soil Sci*. 2006;57:530–538.

Rasse DP, Rumpel C, Dignac MF. Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation. *Plant Soil*. 2005;269:341–356.

Redin M, Recous S, Aita C, Dietrich G, Skolaude AC, Ludke WH, Schmatz R, Giacomini SJ. How the chemical composition and heterogeneity of crop residue mixtures decomposing at the soil surface affects C and N mineralization. *Soil Biol Biochem*. Elsevier Ltd; 2014;78:65–75.

Roberta Gentile, Vanlauwe B, Six J. Litter quality impacts short- but not long-term soil carbon dynamics in soil aggregate fractions. *Ecol Appl*. 2011;21:695–703.

Roscoe R. Tillage effects on soil organic matter in density fractions of a Cerrado Oxisol. *Soil Tillage Res*. 2003;70:107–119.

Roumet C, Lafont F, Sari M, Warembourg F, Garnier E. Root traits and taxonomic affiliation of nine herbaceous species grown in glasshouse conditions. *Plant Soil*. 2008;312:69–83.

Sahrawat KL. Fertility and organic matter in submerged rice soils. *Curr Sci*. 2005;88:735–739.

Sahrawat KL. Soil fertility in flooded and non-flooded irrigated rice systems. *Arch Agron Soil Sci*. 2012;58:423–436.

Schulten H-R, Leinweber P. New insights into organic-mineral particles: composition, properties and models of molecular structure. *Biol Fertil Soils*. 2000;30:399–432.

Silva, CAS. da; Parfitt, JMB. Drenagem superficial para diversificação do uso dos solos de várzea do Rio Grande do Sul. Pelotas: Embrapa ClimaTemperado. 2004 (Circular técnica, 40).

Trinsoutrot I, Recous S, Mary B, Nicolardot B. C and N fluxes of decomposing 13 C and 15 N Brassica napus L.: Effects of residue composition and N content. *Soil Biol Biochem*. 2000;32:1717–1730.

Van Soest, P. J. Use of detergents in the analysis of fibrous feeds. II. A rapid method for the determination of fiber and lignin. *Journal of the Association of Official Agricultural Chemists*, v. 46, p. 829-835, 1963.

Zhu Z, Zeng G, Ge T, Hu Y, Tong C, Shibistova O, He X, Wang J, Guggenberger G, Wu J. Fate of rice shoot and root residues, rhizodeposits, and microbe-assimilated carbon in paddy soil - Part 1: Decomposition and priming effect. *Biogeosciences*. 2016;13:4481–4489.

Tabela 1 - Características físicas e químicas dos solos utilizados no experimento de incubação.

Solo	Textura	Argila	Silte	Areia	C	N	Nmin	$\delta^{13}\text{C}$	pH
		-----g kg ⁻¹ -----					mg kg ⁻¹	‰	
Planossolo Arênico	Franco arenosa	99	155	746	9,4	0,9	6	-27,8	4,2
Planossolo Gleissólico	Franco arenosa	173	287	540	9,7	0,9	14	-20,1	4,5

C: carbono total no solo; N: nitrogênio total no solo; Nmin: N mineral inicial. $\delta^{13}\text{C}$: deltas de C no solo; pH em H₂O.

Tabela 2 - Composição química e excesso isotópico dos resíduos de arroz, sorgo e soja utilizados no experimento de incubação.

Resíduos	C	N	FS	Cel	Hem	Lig	C/N	¹³ C
	-----g kg ⁻¹ -----							% átomos excesso
	Parte Aérea							
Arroz	375,7	9,1	282	369	309	036	41,3	357
Sorgo	411,6	7,3	265	351	336	047	56,4	428
Soja	419,4	13,1	281	431	155	135	32,0	437
	Raízes							
Arroz	446,2	8,7	246	394	282	066	51,2	373
Sorgo	455,3	11,0	261	351	291	074	41,4	380
Soja	459,1	20,2	277	357	205	157	22,7	316

C: carbono; N: nitrogênio; FS: fração solúvel; Cel: celulose; Hem: hemicelulose; Lig: lignina; ¹³C: excesso isotópico nos resíduos após enriquecimento.

Tabela 3 - Resultados da análise de variância para os fatores resíduos culturais (RC), Solos (S) e frações (F).

Variáveis	RC ^a	S ^b	F ^c	S x RC	S x F	RC x F	S x RC x F	CV ^d
30 dias								
Raízes								
¹³ C remanescente (% do ¹³ C adicionado)	-	-	-	-	-	-	-	-
¹³ C no solo (% do ¹³ C adicionado)	*	*	*	*	*	*	*	16,11
C novo no solo (g m ⁻²)	*	*	*	*	ns	*	*	16,56
Parte Aérea								
¹³ C remanescente (% do ¹³ C adicionado)	*	ns	-	ns	-	-	-	09,69
¹³ C no solo (% do ¹³ C adicionado)	*	*	*	*	*	*	*	11,51
C novo no solo (g m ⁻²)	*	*	*	*	*	*	*	11,52
RCf	*	*	*	*	*	*	*	22,79
180 dias								
Raízes								
¹³ C remanescente (% do ¹³ C adicionado)	ns	ns	-	ns	-	-	-	26,70
¹³ C no solo (% do ¹³ C adicionado)	*	*	*	*	*	*	*	31,66
C novo no solo (g m ⁻²)	*	*	*	*	*	*	*	17,42
Parte Aérea								
¹³ C remanescente (% do ¹³ C adicionado)	*	ns	-	ns	-	-	-	05,56
¹³ C no solo (% do ¹³ C adicionado)	*	ns	*	*	*	*	*	11,71
C novo no solo (g m ⁻²)	*	ns	*	*	*	*	*	11,49
RCf	*	*	*	*	ns	*	*	48,24
360 dias								
Raízes								
¹³ C remanescente (% do ¹³ C adicionado)	-	-	-	-	-	-	-	-
¹³ C no solo (% do ¹³ C adicionado)	*	*	*	*	*	*	*	30,86
C novo no solo (g m ⁻²)	*	*	*	*	*	*	*	31,42
Parte Aérea								
¹³ C remanescente (% do ¹³ C adicionado)	*	ns	-	ns	-	-	-	10,85
¹³ C no solo (% do ¹³ C adicionado)	*	*	*	*	ns	*	*	11,97
C novo no solo (g m ⁻²)	*	*	*	*	*	*	*	11,72
RCf	*	*	*	ns	*	*	*	41,52

^aArroz, sorgo e soja. ^bPlanossolo Arênico e Planossolo Gleissólico. ^cFração >250 µm, fração 250-53 µm e fração <54 µm. ^dCoeficiente de variação (%). * P < 0,05. ns = Não significativo

Tabela 4 - Percentagem de ^{13}C nos resíduos remanescentes de parte aérea, no solo e nas frações físicas granulométricas em dois solos hidromórficos ao longo dos 360 dias de incubação.

Parte Aérea		Planossolo Arênico				Planossolo Gleissólico			
Fração		Tempo (dias)				Tempo (dias)			
		0	30	180	360	0	30	180	360
^{13}C (% ^{13}C adicionado)									
Arroz	Resíduo	100	83,7 Aa	43,9 Ab	10,4 Ab	100	77,9 Aa	51,6 Aab	5,3 Ab
	Solo	-	0,4 Bc	3,5 Ab	10,4 Bab	-	0,5 Ab	3,9 Aa	27,4 Aa
	> 250 μm	-	0,2 Bb	0,5 Aa	2,5 Bb	-	0,3 Ab	0,3 Ba	9,6 Aa
	250-53 μm	-	0,3 Aa	1,1 Ab	2,3 Bb	-	0,2 Ba	1,1 Ab	5,5 Aa
	< 53 μm	-	0 Ab	1,9 Ba	5,3 Ba	-	0 Ab	2,5 Aa	12,3 Aa
	*DMS	-	0,02	0,53	1,17	-	0,02	0,23	2,61
Sorgo	Resíduo	100	68,8 Ab	54,3 Aa	41,3 Aa	100	72,4 Ab	63,7 Aa	35,0 Aa
	Solo	-	0,6 Ab	1,8 Ac	11,4 Ba	-	0,6 Ab	1,7 Ab	17,7 Ab
	> 250 μm	-	0,5 Aa	0,2 Bc	6,5 Aa	-	0,4 Bb	0,3 Aa	6,7 Ab
	250-53 μm	-	0,1 Ab	0,9 Ab	1,3 Bc	-	0,1 Aa	0,4 Bc	3,3 Ab
	< 53 μm	-	0 Bb	0,7 Ab	3,6 Bb	-	0,1 Ab	1,0 Ac	7,7 Ab
	DMS	-	0,04	0,30	0,38	-	0,06	0,09	1,17
Soja	Resíduo	100	68,7 Ab	41,6 Ab	31,4 Aa	100	63,7 Ab	40,0 Ab	31,9 Aa
	Solo	-	0,8 Ba	4,3 Aa	8,9 Bb	-	2,1 Aa	3,9 Aa	11,8 Ac
	> 250 μm	-	0,5 Ba	0,3 Ab	1,1 Bc	-	0,7 Aa	0,2 Bb	3,8 Ac
	250-53 μm	-	0,1 Bb	2,4 Aa	3,1 Ba	-	0,2 Aa	2,0 Ba	4,6 Aab
	< 53 μm	-	0,2 Ba	1,6 Aa	4,7 Aab	-	1,2 Aa	1,7 Ab	3,4 Bc
	DMS	-	0,04	0,30	0,37	-	0,13	0,21	1,39

Médias seguidas de letras maiúsculas diferentes na mesma linha, e letras minúsculas na mesma coluna para cada tempo, fração, diferem entre si pelo teste de tukey a 5%. *Diferença mínima significativa.

Tabela 5 - Percentagem de ^{13}C nos resíduos remanescentes das raízes, no solo e nas frações físicas granulométricas em dois solos hidromórficos ao longo dos 360 dias de incubação.

Raízes		Planossolo Arênico				Planossolo Gleissólico			
Fração		Tempo (dias)				Tempo (dias)			
		0	30	180	360	0	30	180	360
^{13}C (% ^{13}C adicionado)									
Arroz	Resíduo	100	-	17,8 Aa	0	100	-	14,5 Aa	0
	Solo	-	11,8 Ab	8,4 Bb	22,3 Aa	-	13,4 Ab	12,5 Ac	21,2 Ab
	> 250 μm	-	8,2 Ab	4,1 Ab	6,6 Ab	-	7,3 Ab	3,9 Ab	8,0 Ab
	250-53 μm	-	1,6 Aa	1,9 Aa	3,8 Aa	-	1,2 Bb	1,6 Ac	2,2 Aa
	< 53 μm	-	2,0 Bc	2,4 Bb	11,9 Aa	-	4,8 Ab	7,0 Ab	11,0 Aa
	*DMS	-	1,23	3,14	6,99	-	1,97	0,61	8,42
Sorgo	Resíduo	100	-	16,0 Aa	0	100	-	18,6 Aa	0
	Solo	-	14,1 Ab	22,6 Aa	32,9 Aa	-	15,6 Ab	28,6 Ab	38,9 Aa
	> 250 μm	-	9,3 Ab	15,6 Aa	8,0 Ab	-	10,9 Ab	15,9 Aa	17,8 Aab
	250-53 μm	-	0,6 Ac	0,8 Ba	8,3 Aa	-	0,8 Ab	3,9 Ab	1,6 Ba
	< 53 μm	-	4,2 Ab	6,2 Aa	16,6 Aa	-	3,9 Ab	8,8 Ab	19,5 Aa
	DMS	-	4,02	3,66	5,31	-	1,35	4,57	12,02
Soja	Resíduo	100	-	14,4 Aa	0	100	-	18,4 Aa	0
	Solo	-	24,2 Ba	17,4 Ba	29,0 Ba	-	30,8 Aa	41,1 Aa	48,3 Aa
	> 250 μm	-	16,0 Aa	13,4 Aa	21,4 Aa	-	15,8 Aa	15,6 Aa	20,9 Aa
	250-53 μm	-	1,3 Bb	1,5 Ba	4,5 Aa	-	4,8 Aa	11,0 Aa	7,9 Aa
	< 53 μm	-	6,9 Ba	2,5 Bb	3,1 Bb	-	10,2 Aa	14,5 Aa	19,5 Aa
	DMS	-	4,01	3,66	5,31	-	3,24	3,29	10,86

Médias seguidas de letras maiúsculas diferentes na mesma linha, e letras minúsculas na mesma coluna para cada tempo, fração, diferem entre si pelo teste de tukey a 5%. * Diferença mínima significativa.

Tabela 6 - Fator de contribuição relativa do C no solo proveniente das raízes vs resíduos de parte aérea (RCf).

RCf	Planossolo Arênico			Planossolo Gleissólico		
	30	180	360	30	180	360
Solo						
Arroz	26,6 Aa	2,4 Ab	2,2 Aa	28,5 Aa	3,2 Ac	0,8 Bb
Sorgo	22,4 Aa	12,8 Aa	2,9 Aa	27,8 Aa	16,8 Aa	2,2 Ab
Soja	31,2 Aa	4,0 Bb	3,2 Aa	14,8 Bb	10,6 Ab	4,2 Aa
> 250 µm						
Arroz	50,1 Aa	8,3 Bb	2,7 Ab	22,8 Ba	14,6 Ab	0,9 Ab
Sorgo	18,5 Bb	99,5 Aa	1,3 Ab	30,6 Aa	61,7 Ab	2,7 Ab
Soja	33,0 Ab	44,6 Bb	19,8 Aa	23,3 Aa	130,3 Aa	5,7 Ba
250-53 µm						
Arroz	5,7 Bb	1,8 Aa	1,7 Ab	8,2 Ab	1,4 Ab	0,5 Aa
Sorgo	5,4 Ab	0,9 Ba	6,4 Aa	5,5 Ab	10,0 Aa	0,5 Ba
Soja	11,3 Ba	0,6 Ba	1,4 Ab	29,3 Aa	5,4 Ab	1,7 Aa
< 53 µm						
Arroz	-	1,4 Ab	2,3 Ab	-	2,8 Ab	0,9 Ab
Sorgo	0 Bb	9,1 Aa	4,5 Aa	69,3 Aa	8,4 Aa	2,6 Bb
Soja	39,4 Aa	1,7 Bb	0,7 Bc	8,3 Bb	8,5 Aa	5,8 Aa
DMS Frações						
Arroz	10,80	5,05	2,41	4,90	1,49	1,23
Sorgo	7,44	33,57	1,47	16,82	20,17	1,87
Soja	11,70	18,08	7,24	12,98	51,74	3,38

Médias seguidas de letras maiúsculas diferentes na mesma linha, e letras minúsculas na mesma coluna para cada tempo, fração e espécie, diferem entre si pelo teste de tukey a 5%. * Diferença mínima significativa.

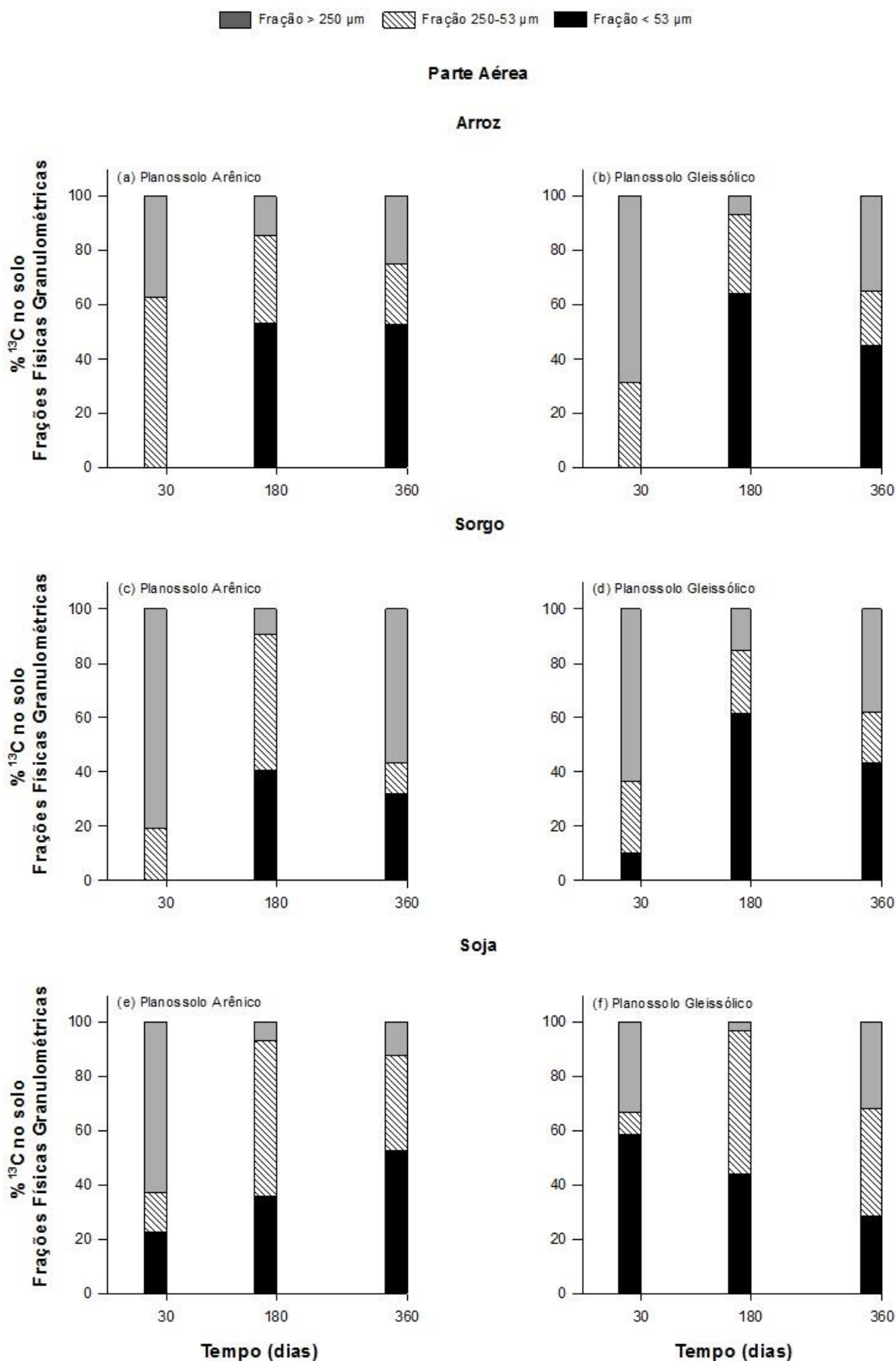


Figura 1- Percentagem do ^{13}C no solo em cada fração física granulométrica de resíduos culturais de arroz, sorgo e soja nos solos Planossolo Arênico (a, c, e) e Planossolo Gleissólico (b, d, f), oriundo da parte aérea ao longo de 360 dias de incubação.

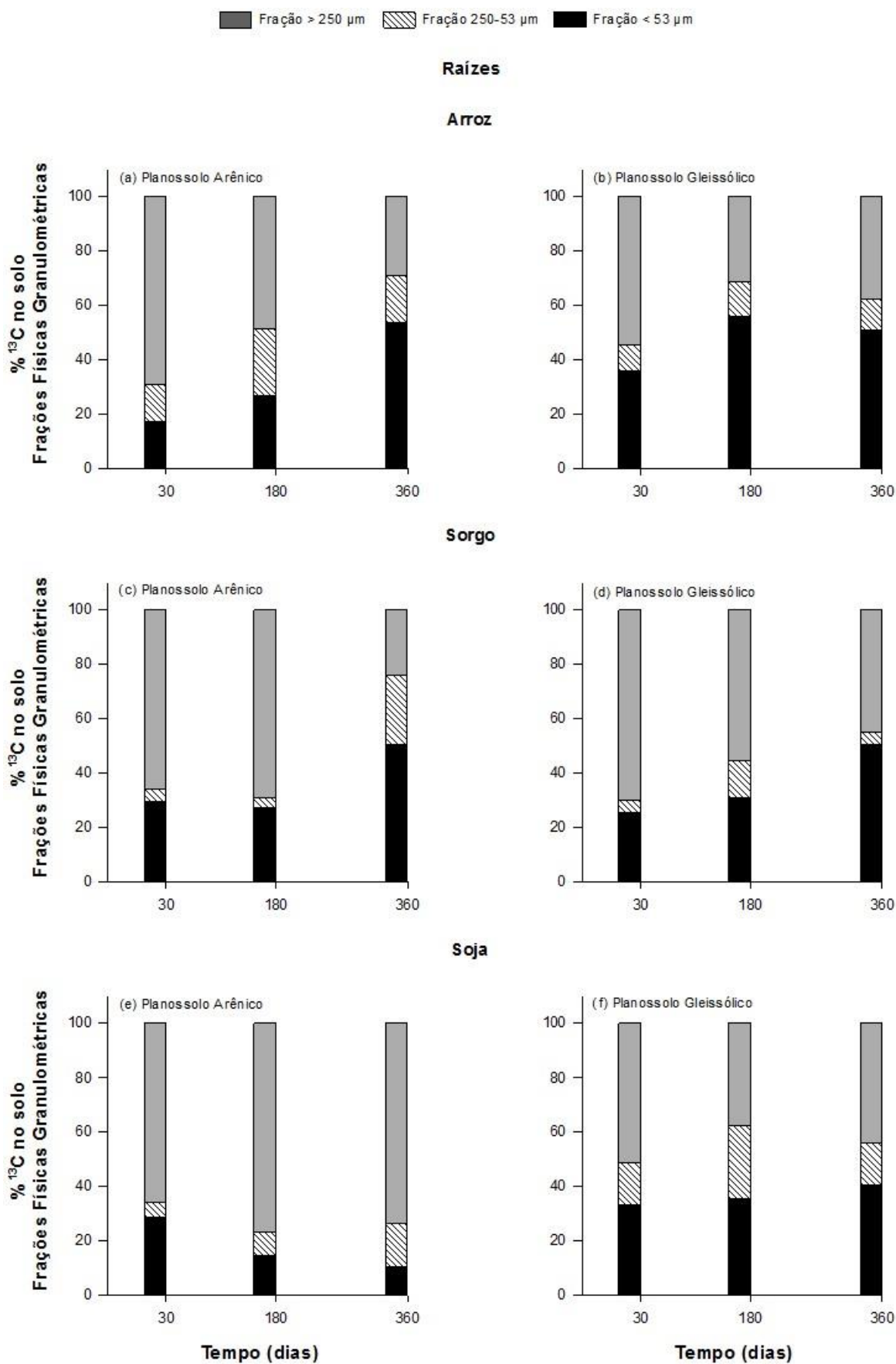


Figura 2- Percentagem do ^{13}C no solo em cada fração física granulométrica de resíduos culturais de arroz, sorgo e soja nos solos Planossolo Arênico (a, c, e) e Planossolo Gleissólico (b, d, f) oriundo das raízes ao longo de 360 dias de incubação.

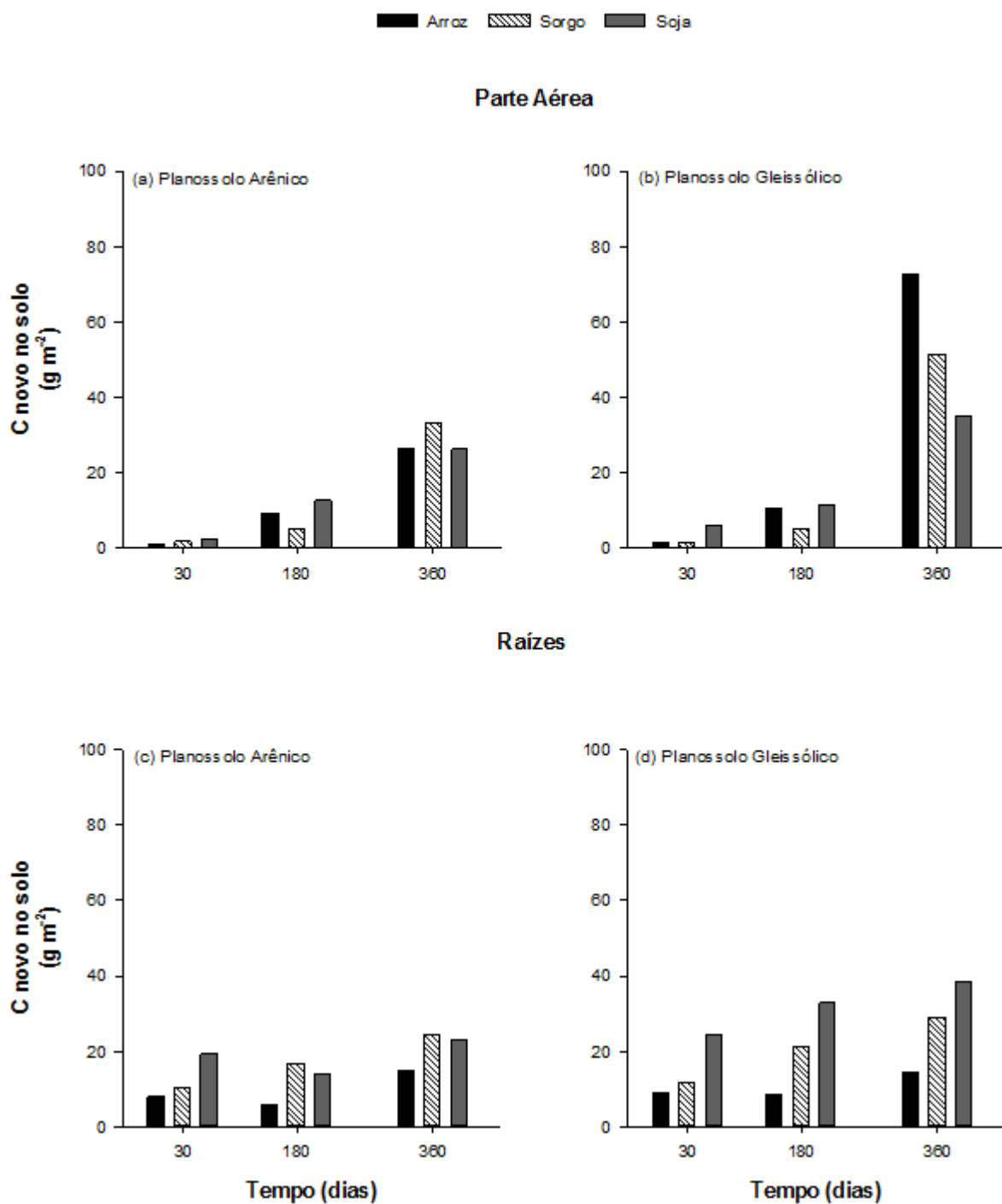


Figura 3- Retenção de C-novo no solo (g m^{-2}) proveniente dos resíduos de parte aérea (a, b) e raízes (c, d) de arroz, sorgo e soja nos solos Planossolo Arênico (a, c) e Planossolo Gleissólico (b, d) ao longo de 360 dias de incubação.

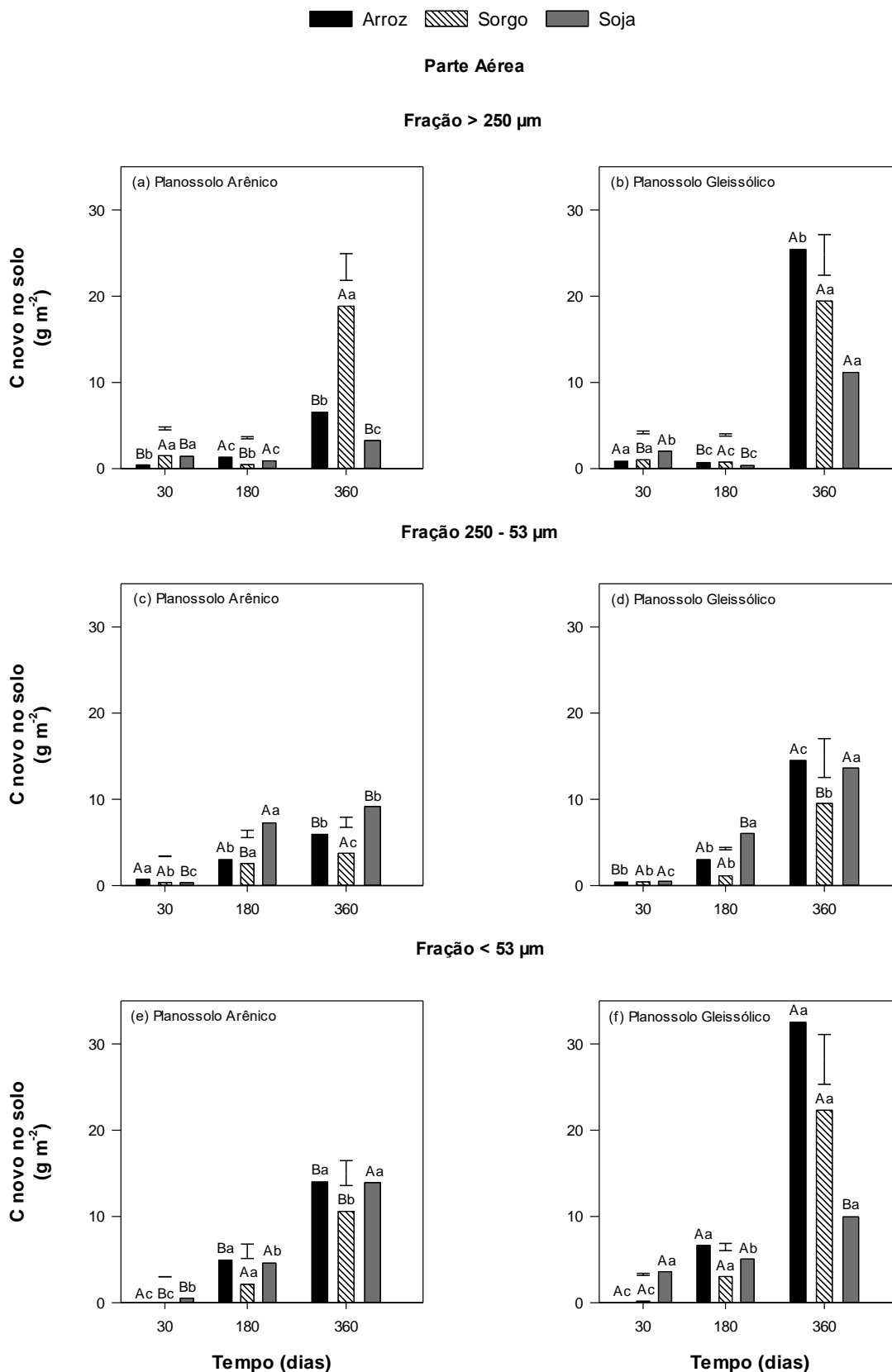


Figura 4– C-novo no solo (g m^{-2}) proveniente da parte aérea de arroz, sorgo e soja nas três frações físicas granulométricas nos solos Planossolo Arênico (a, c, e) e Planossolo Gleissólico (b, d, f) ao longo de 360 dias de incubação. Letras maiúsculas diferentes na mesma linha, e letras minúsculas na mesma coluna para cada tempo e cultura, diferem entre si pelo teste de tukey a 5%. As barras verticais representam o DMS entre as culturas para cada data.

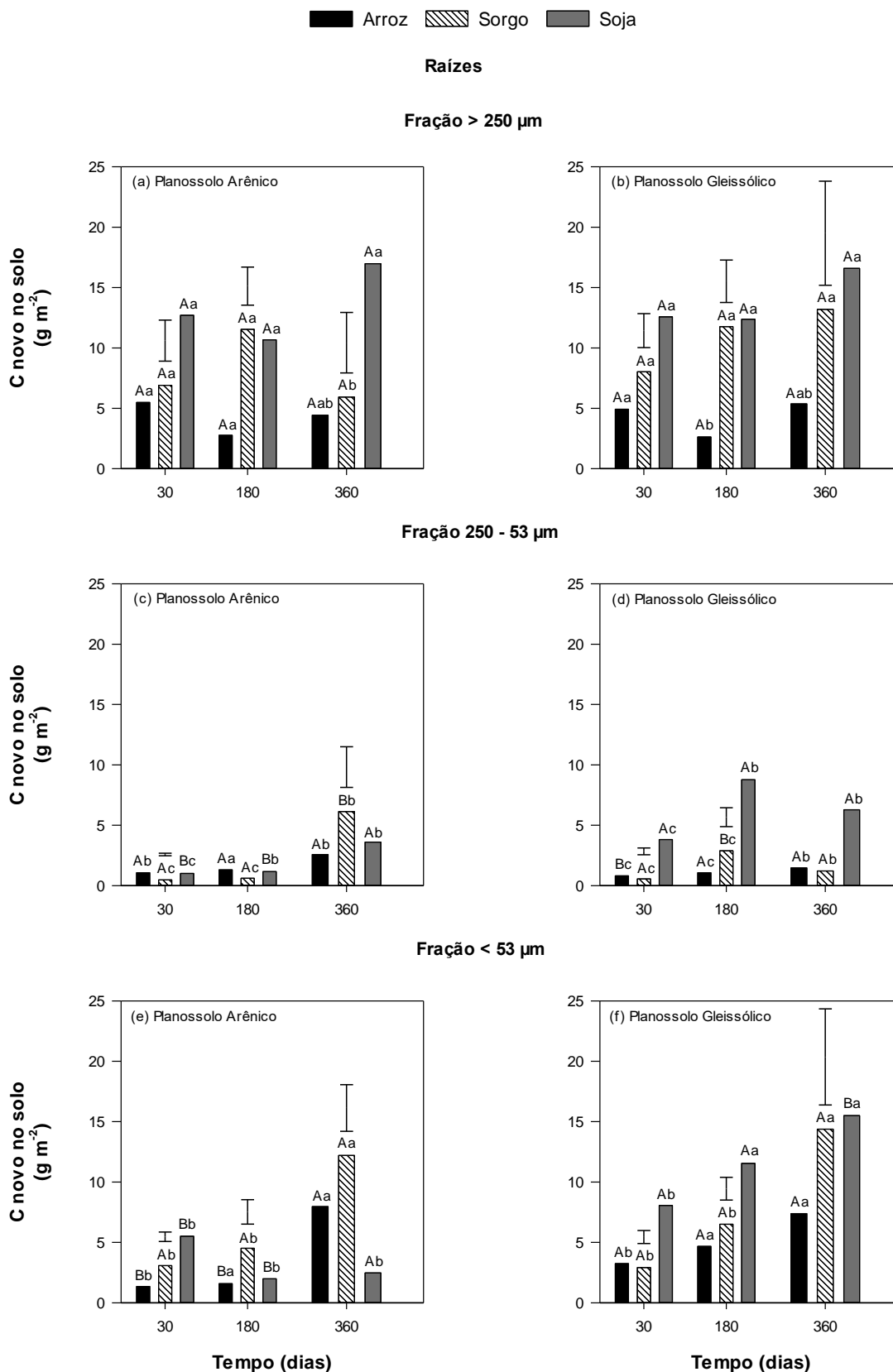


Figura 5– C-novo no solo (g m^{-2}) proveniente das raízes de arroz, sorgo e soja nas três frações físicas granulométricas nos solos Planossolo Arênico (a, c, e) e Planossolo Gleissólico (b, d, f) ao longo de 360 dias de incubação. Letras maiúsculas diferentes na mesma linha, e letras minúsculas na mesma coluna para cada tempo e cultura, diferem entre si pelo teste de tukey a 5%. As barras verticais representam o DMS entre as culturas para cada data.

Referências Bibliográficas

ABIVEN, S. et al. Mineralisation of C and N from root, stem and leaf residues in soil and role of their biochemical quality. **Biology and Fertility of Soils**, v. 42, n. 2, p. 119, 2005.

BALESDENT, J.; PÉTRAUD, J. P.; FELLER, C. Effets des ultrasons sur la distribution granulométrique des matières organiques des sols. **Science du sol**, v. 29, n. 2, p. 95-106, 1991.

BIRD, J. A.; KLEBER, M.; TORN, M. S. 13 C and 15 N stabilization dynamics in soil organic matter fractions during needle and fine root decomposition. **Organic Geochemistry**, v. 39, n. 4, p. 465-477, 2008.

CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Methods for physical separation and characterization of soil organic matter fractions. **Geoderma**, v. 56, n. 1-4, p. 449-457, 1993.

CHIVENGE, P. et al. Comparison of organic versus mineral resource effects on short-term aggregate carbon and nitrogen dynamics in a sandy soil versus a fine textured soil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 140, p. 361-371, 2011.

CHRISTENSEN, B. T. et al. Organic matter in soil-structure, function and turnover. **Organic matter in soil-structure, function and turnover**, n. 30, 2000.

COTRUFO, M. F. et al. The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter? **Global Change Biology**, v. 19, p. 988-995, 2013.

DIOCHON, A. et al. Recovery and dynamics of decomposing plant residue in soil: an evaluation of three fractionation methods. **European Journal of Soil Science**, v. 67, n. 2, p. 196-205, 2016.

FUENTES, J.; EASTER, M.; PAUSTIAN, K. Climate change effects on organic carbon storage in agricultural soils of northeastern Spain. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 155, p. 87-94, 2012.

GOLCHIN, A. et al. Soil structure and carbon cycling. **Soil Research**, v. 32, n. 5, p. 1043-1068, 1994a.

GOLCHIN, A. et al. Study of free and occluded particulate organic matter in soils by solid state ¹³C Cp/MAS NMR spectroscopy and scanning electron microscopy **Australian Journal of Soil Research**, v 32, n 2, p. 285-309, 1994b.

GOMES, A. da S. et al. Rotação de culturas em áreas de várzea e plantio direto de arroz. **Embrapa Clima Temperado-Documentos (INFOTECA-E)**, 2002.

INSTITUTO RIOGRANDENSE DO ARROZ (IRGA). **Serviços e informações – Safras**. Disponível em: <http://www.irga.rs.gov.br/upload/2017071314363produtividade_municipios_safra_16_17_final.pdf>. Acesso em 21 de junho de 2017.

IQBAL, A. et al. Rain regime and soil type affect the C and N dynamics in soil columns that are covered with mixed-species mulches. **Plant and soil**, v. 393, n. 1-2, p. 319-334, 2015.

REDIN, M.; RECOUS, S.; AITA, C.; DIETRICH, G.; SKOLAUDE, A. C.; LUDKE, W. H.; SCHMATZ, R.; GIACOMINI, S. J. How the chemical composition and heterogeneity of crop residue mixtures decomposing at the soil surface affects C and N mineralization. **Soil Biol Biochem**, v. 78, p. 65–75, 2014.

REDIN, M.; GUÉNON, R.; RECOUS, S.; SCHMATZ, R.; LIBERALESSO, F. 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**, v. 378, p. 205-214, 2014.

ROSCOE, R.; BUURMAN, P. Tillage effects on soil organic matter in density fractions of a Cerrado Oxisol. **Soiland Tillage Research**, v. 70, n. 2, p. 107-119, 2003.

SAHRAWAT, K. Soil fertility in flooded and non-flooded irrigated rice systems. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 58, n. 4, p. 423-436, 2012.

SILVA, C. A S. da; PARFITT, J. M.B. Drenagem superficial para diversificação do uso dos solos de várzea do Rio Grande do Sul. Pelotas: **Embrapa ClimaTemperado**, 10p, 2004.

SIX, J. et al. Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agroecosystems. **Soil Science Society of America Journal**, v. 70, p. 555-569, 2006.

SIX, J.; ELLIOT, E. T.; PAUSTIAN, K. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-till systems. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 63, p. 1350-1358, 1998.

SOHI, S. P. et al. A procedure for isolating soil organic matter fractions suitable for modeling. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, n. 4, p. 1121-1128, 2001.

TRINSOUTROT, I., RECOUS, S., MARY, B., NICOLARDOT, B. C and N fluxes of decomposing ¹³C and ¹⁵N Brassica napus L.: effects of residue composition and N content. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 32, p. 1717-1730, 2000.

VAN SOEST, P. J. Use of detergents in the analysis of fibrous feeds. II. A rapid method for the determination of fiber and lignin. **Journal of the Association of Official Agricultural Chemists**, v. 46, p. 829-835, 1963.

WHALEN, J. K. et al. Transforming plant carbon into soil carbon: Process-level controls on carbon sequestration. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 94, p. 1-9, 2014.

YAMASHITA, T. et al. Organic matter in density fractions of water-stable aggregates in silty soils: effect of land use. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 38, n. 11, p. 3222-3234, 2006.

YANNI, S. F. et al. Plant lignin and nitrogen contents control carbon dioxide production and nitrogen mineralization in soils incubated with Bt and non-Bt corn residues. **Soil Biology Biochemistry**, v. 43, p. 63-69, 2011.