UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Solos

Tese

Matéria orgânica em Planossolo Háplico sob sistemas de manejo no cultivo do arroz irrigado no Sul do Brasil

Carla Machado da Rosa

Pelotas, 2010

CARLA MACHADO DA ROSA

Matéria orgânica em Planossolo Háplico sob sistemas de manejo no cultivo do arroz irrigado no Sul do Brasil

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciências (área do conhecimento: Solos).

Orientadora: Rosa Maria Vargas Castilhos

Co-orientador: Clenio Nailto Pillon

Pelotas, 2010

Dados de catalogação na fonte:

(Marlene Cravo Castillo – CRB-10/744)

R788m Rosa, Carla Machado da

Matéria orgânica em Planossolo háplico sob sistemas de manejo no cultivo do arroz irrigado no Sul do Brasil / Carla Machado da Rosa ; orientador Rosa Maria Vargas Castilhos; co-orientador Clenio Nailto Pillon - Pelotas,2010.-92f. ; il..- Tese (Doutorado em Solos) –Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel . Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, 2010.

1.Arroz irrigado 2.Espectroscopia 3.Fracionamento físico 4.Plantio direto 5.Preparo

Banca examinadora:

Professora Dr[a]. Rosa Maria Vargas Castilhos – UFPel – (Presidente)

Professor Dr. Cimélio Bayer - UFRGS

Professora Dr[a]. Cláudia Liane Rodrigues de Lima - UFPel

Professora Dr[a]. Flávia Fontana Fernandes - UFPel

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus pela sua infinita bondade em colocar as pessoas certas no meu caminho.

A Professora Dra. Rosa Maria Vargas Castilhos pela amizade, e por contribuição na minha formação, como orientadora durante oito anos, desde a iniciação científica.

Ao Pesquisador Dr. Clenio Nailto Pillon pela co-orientação, ensinamentos transmitidos, apoio e amizade.

Aos demais professores do Departamento de Solos pela amizade, respeito e ensinamentos transmitidos.

Ao Pesquisador da Embrapa Clima Temperado Algenor Gomes da Silva e ao Prof. Dr. Eloy Antonio Pauletto pela concessão da área experimental para coleta das amostras de solo.

Ao Prof. Dr. Cimélio Bayer; aos pós-graduandos Paulo Cesar Conceição, Michely Tomazi, e ao funcionário Luis Antônio da Silveira (Tonho) do Departamento de Solos da UFRGS por possibilitarem a realização do treinamento nas técnicas de fracionamento físico e pela valiosa contribuição durante o trabalho.

Aos Pesquisadores Wilson Tadeu Lopes da Silva e Débora Marcondes B. P. Milori por disponibilizarem os laboratórios da Embrapa Instrumentação Agropecuária para a realização das análises espectroscópicas e ao “colega” Cleber Hilário dos Santos pela colaboração e amizade.

Ao ex bolsista de IC e agora colega de pós graduação, Otávio dos Anjos Leal pela dedicação, amizade e ajuda durante a realização das análises.

À minha grande amiga Magali de Ávila Fortes, pelo carinho e apoio nos muitos momentos de convivência durante quase sete anos.

À amiga Cecília Sacramento dos Reis e ao amigo Tiago Zchornack, que mesmo de longe tiveram participação fundamental para a realização deste trabalho.

Às amigas Marla de Oliveira Farias, Daiane dos Santos, Daniela Krolow, Rosângela Mattos e ao amigo Adilson Bamberg pelo carinho, amizade e muitos momentos de colaboração.

A todos os colegas do Departamento de Solos (muitos para serem mencionados) pelos momentos de descontração, amizade e troca de experiências.

A todos os funcionários do Departamento de Solos (muitos para serem mencionados) pela amizade, respeito e auxílio nas coletas de solo.

Aos meus familiares Leomar Soares da Rosa (pai), Maria Cecília Machado da Rosa (mãe), Leomar Júnior e Lessandro (irmãos), pelo apoio e incentivo.

Ao meu namorado Márcio de Moura Rodrigues pela paciência, carinho e companheirismo.

À Universidade Federal de Pelotas, que possibilitou meus estudos por onze anos.

À Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES - pela concessão da bolsa de estudos durante o mestrado e doutorado.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e ao Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), pelo auxílio financeiro no âmbito do projeto PRONEX.

A todos que não foram mencionados, mas que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

ROSA, Carla Machado da. **Matéria orgânica em Planossolo Háplico sob sistemas de manejo no cultivo do arroz irrigado no Sul do Brasil**, 2010. 92f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Solos. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

A região sul do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil, apresenta 950 mil hectares de solos de várzea, cultivados com arroz irrigado, em diferentes sistemas de manejo, constituindo uma das mais importantes atividades agrícolas para a região. O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito de sistemas de manejo de arroz irrigado sobre o conteúdo e qualidade da matéria orgânica do solo (MOS) de um solo representativo da região, bem como, buscar um maior entendimento dos mecanismos de estabilização da MOS neste solo. Amostras de um Planossolo Háplico foram coletadas em um experimento de campo de longa duração (21 anos), nas profundidades de 0-0,025, 0,025-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, nos tratamentos: ST- Sistema tradicional de cultivo: um ano arroz (preparo convencional) e dois anos com pousio; APC- Sistema de cultivo contínuo de arroz (preparo convencional) e controle de invasoras com herbicida; APD- Sucessão azevém/arroz em plantio direto e SN- Solo mantido com vegetação natural. As amostras foram submetidas aos fracionamentos granulométrico e densimétrico e o teor de carbono do solo e das frações da MOS quantificados em analisador de combustão seca, corrigindo-se os estoques de carbono pela massa equivalente de solo. As características químicas e moleculares do solo e das frações da MOS foram determinadas por espectroscopia de FTIR, RMN ^{13}C (CP/MAS) e fluorescência induzida por lazer. O uso do solo sob o sistema sucessão arroz/azevém em plantio direto mostrou-se eficiente na manutenção ou incremento dos estoques de MOS do solo, até a profundidade de 0,05 m, e o incremento da fração grosseira conferiu um maior índice de manejo de carbono (IMC), mostrando a capacidade deste sistema conservacionista em promover a qualidade do solo. A fração leve oclusa da MOS não foi sensível aos efeitos dos diferentes sistemas de manejo utilizados no cultivo do arroz irrigado, evidenciando uma baixa eficiência da proteção física da MOS por oclusão em agregados, o que pode estar relacionada à condição de má drenagem no processo de agregação deste solo. A caracterização espectroscópica da MOS do solo de várzea mostrou que seus grupos funcionais são semelhantes aos de solos oxidados, no entanto, a proporção de estruturas CO-alquil das frações leve livre e leve oclusa foram elevados (39 a 52%), evidenciando um baixo grau de decomposição da MOS no ambiente mal drenado. A MO do sistema APC apresentou–se mais humificada do que a MOS dos sistemas APD e SN, principalmente nas camadas superficiais, refletindo as perdas das frações mais lábeis da MOS, pelo preparo do solo.

Palavras-chave: Arroz irrigado, espectroscopia, fracionamento físico, plantio direto, preparo convencional

ABSTRACT

ROSA, Carla Machado da. Organic matter in Albaqualf as affected by managements irrigated rice cropping systems the South from Brazil, 2010. 92 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Solos. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

In the south region from Rio Grande do Sul State, in,Brazil, 950 thousand hectares of soils are cultivated with rice, an important agricultural activity in that region, under an irrigation (flooded) system, using different soil management techniques. Studies regarding the organic matter (OM) dynamic in these soils are incipient, so this work aimed to evaluate the effect of irrigated rice management systems on the composition and quality of the OM from an Albaqualf, as well as, to investigate the OM stabilization mechanisms in this soil. Soil samples were collected in a long-term field experiment (21 years), from the 0-0,025, 0,025-0,05, 0,05-0,10 and 0,10-0,20 meters. The treatments evaluated are: ST – traditional rice crop system: one year with rice crop under conventional tillage and two years of fallow; APC – continuous rice crop system under conventional tillage and weeds control with herbicides; APD – no-tillage system with rye-grass in the winter and rice in the summer; SN – soil under natural conditions with native grassland. Soil samples were submitted to OM physical fractionation, and total organic carbon (TOC) and C contend in fractions were determinate by dry combustion analyzer, and carbon stocks adjusted according to the equivalent soil's mass. The chemical and molecular characteristics from this soil and OM fraction were determined by FTIR spectroscopy, RMN ^{13}C (CP/MAS), and laser-induced fluorescence. No-tillage rice/rye-grass succession system was efficient in maintenance or increase SOM stocks until 0.05m deph. Particulate fraction increase demonstrates a higher maintenance level for carbon, showing the feasibility of this conservative system to contribute to the soil quality. Occluded light OM fraction was not susceptible to the effects of tillage systems used in irrigated rice crop, demonstrating a lower efficiency of the OM physical protection in soil aggregates. This situation may be related to the flooded condition affecting aggregates process. The OM spectroscopy characterization demonstrates for the flooded soil that functional groups are similar to the oxided soils. However, the portion of the CO-aquil structures from the free light and occluded light OM fraction were increased (from 39% to 52%), demonstrating a low level of OM decomposition in the deficient drainege environment. The OM from APC system were more humified than OM from APD and SN systems, mainly in the superficial levels, due to the loss of light OM fractions during the soil tillage.

Key words: Irrigated rice, spectroscopy, physical fractionation, conventional tillage

SUMÁRIO

RESUMO..... 05
ABSTRACT..... 06
SUMÁRIO..... 07
1. INTRODUÇÃO GERAL..... 08
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... 11
2.1. Sistemas de cultivo utilizados em solos de várzea..... 11
2.2. Dinâmica da matéria orgânica em ambiente alagado..... 13
2.3. Mecanismos de estabilização da matéria orgânica do solo..... 15
2.4. Fracionamento físico da matéria orgânica do solo..... 17
2.5. Efeito do manejo sobre as frações da matéria orgânica do solo..... 20
2.6. Carbono orgânico e agregação do solo..... 23
2.7. Caracterização química da matéria orgânica do solo..... 25
3. ESTUDO 1: Carbono orgânico total e frações granulométricas da matéria orgânica de um Planossolo Háplico submetido a diferentes sistemas de manejo com arroz irrigado. 28
Introdução..... 28
Material e Métodos..... 30
Resultados e Discussão..... 31
Conclusões..... 40
4. ESTUDO 2: Efeito de sistemas de manejo do arroz irrigado sobre a matéria orgânica do solo e suas frações densimétricas em um Planossolo Háplico. 41
Introdução..... 41
Material e Métodos..... 42
Resultados e Discussão..... 44
Conclusões..... 50
5. ESTUDO 3: Caracterização química da matéria orgânica de um Planossolo Háplico submetido a diferentes sistemas de manejo no cultivo de arroz irrigado. 51
Introdução..... 51
Material e Métodos..... 53
Resultados e Discussão..... 55
Conclusões..... 61
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS..... 63
7. ESTUDOS FUTUROS 65
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 67
9. APÊNDICES..... 77

1 INTRODUÇÃO GERAL

O uso contínuo do solo com agricultura e/ou pecuária pode levá-lo a diferentes níveis de degradação através da sua compactação, diminuição do carbono orgânico total e desestruturação do solo. No sentido de buscar a recuperação desses solos, um dos passos a serem dados é identificar o nível de proteção da matéria orgânica (MO) nos diferentes sistemas de manejo, visando a escolha do sistema com maior potencial de preservação.

A MO constitui um dos atributos do solo de maior importância, pois exerce um papel fundamental sobre a sua qualidade, sendo sensível às condições ambientais e às mudanças no manejo e atuando nos mecanismos que permitem a manutenção da capacidade produtiva do solo. A MO está intimamente relacionada aos atributos químicos, físicos e biológicos, como a agregação, estrutura, retenção de água, ciclagem de nutrientes, troca de cátions e atividade biológica (STEVENSON, 1994).

Diferentes frações da matéria orgânica possuem distintos aspectos funcionais que nem sempre são percebidos numa avaliação do solo inteiro. O fracionamento físico permite a obtenção de informações sobre aspectos básicos da dinâmica da MO do solo, como sua decomposição e estabilização (DIEKOW, 2003). A ligação da MO com minerais do solo leva a formação de agregados mais estáveis. Neste processo de agregação ocorrem diferentes tipos de interação entre partículas minerais e orgânicas do solo, bem como os microrganismos e plantas que fazem parte do sistema. A magnitude dos mecanismos envolvidos nessa interação é que definem o nível de agregação que o solo pode atingir e, influencia diretamente a qualidade do solo, favorecendo ou fragilizando a sua estrutura principalmente no que se refere à preservação da MOS.

Os experimentos de longa duração são essenciais para estudar os efeitos do manejo do solo sobre a dinâmica da matéria orgânica, pois desta forma pode-se avaliar os efeitos cumulativos de cada tipo de sistema de manejo (tratamentos), visto que os resultados só podem ser observados após alguns anos da mudança do sistema de uso do solo. Muitos trabalhos com experimentos de longa duração são estabelecidos de forma a permitirem a estimativa do efeito do manejo em cada ano agrícola, e desta forma se fazer um acompanhamento das alterações que ocorrem ao longo do tempo.

Nos solos de várzea, devido às condições de má drenagem e ao alagamento, por conta do cultivo do arroz irrigado, a dinâmica da MOS é diferenciada, tanto com relação aos produtos da decomposição quanto à velocidade de decomposição, que nestes solos tende a ser mais lenta do que nos solos oxidados. Além disso, o clima temperado e as baixas temperaturas contribuem para uma menor taxa de decomposição.

No RS, aproximadamente um milhão de hectares de solos de várzea são cultivados com arroz irrigado sob inundação. No entanto, poucos são os experimentos de longa duração, bem como as ações de pesquisa que visam o estudo da dinâmica da matéria orgânica neste ambiente. Estudos baseados em métodos de fracionamento físico da MOS e sua caracterização química, permitem avaliar como diferentes sistemas de manejo nestes solos interferem no estoque e na qualidade da matéria orgânica das frações físicas, além de trazer subsídios para um melhor entendimento da dinâmica da MOS em ambiente sob condição de má drenagem.

Com base no exposto, o presente trabalho foi realizado em um experimento de campo de longa duração, implantado em 1985, em um Planossolo Háplico, localizado no município do Capão do Leão - RS e apresenta como objetivo geral avaliar o efeito de sistemas de manejo do arroz irrigado sobre o conteúdo e qualidade da matéria orgânica de um Planossolo, bem como, buscar um maior entendimento dos mecanismos de estabilização da matéria orgânica. Para tanto o trabalho foi estruturado em três estudos:

O primeiro estudo tem como objetivo específico avaliar o efeito dos sistemas de manejo sobre a distribuição do carbono orgânico total e das frações granulométricas de um Planossolo cultivado com arroz irrigado.

O segundo estudo visou avaliar a influência dos sistemas de manejo do arroz irrigado sobre a matéria orgânica e suas frações densimétricas, bem como estimar a magnitude dos mecanismos de proteção da MO em um Planossolo cultivado há 21 anos no Sul do RS.

O terceiro estudo foi complementar aos anteriores e teve como objetivo caracterizar quimicamente a MOS de um Planossolo Háplico cultivado com arroz irrigado em plantio direto e preparo convencional, avaliando amostras de solo e das frações físicas da MO na camada de 0-0,025 m.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Sistemas de cultivo utilizados em solos de várzea

No Rio Grande do Sul, os solos de várzea (hidromórficos) ocupam 5,4 milhões de hectares dos quais, aproximadamente, 950 mil hectares são utilizados para a produção de arroz irrigado, com uma produtividade média de 7,15 Mg ha^{-1} (CONAB, 2009).

Os solos de várzea possuem características peculiares (densidade naturalmente elevada, relação micro/macroporos muito baixa e deficiência de drenagem) que tornam o manejo bastante complexo, pois quando realizado em condições de umidade excessiva, pode acentuar estes problemas que, embora favoráveis para o cultivo do arroz, são restritivas ao desenvolvimento de culturas de sequeiro, podendo ainda, em alguns casos, serem restritivas ao próprio arroz (PINTO et al., 2004).

Os sistemas de cultivo de arroz utilizados no Rio Grande do Sul são: sistemas convencional, cultivo mínimo, plantio direto, pré-germinado, mix e transplante de mudas.

O sistema convencional de cultivo baseia-se no intenso revolvimento do solo, por ocasião do preparo primário (aração), seguido de preparo secundário mais superficial (grades e plainas niveladoras). Estes procedimentos promovem alterações físicas que causam problemas de compactação subsuperficial e drenagem, dificultando os movimentos de água e ar. Neste sistema, o solo é exposto à ação direta dos agentes climáticos que passam a atuar com maior intensidade na sua superfície, constituindo-se num fator determinante para a sua degradação (GOMES et al., 2004).

O sistema tradicional de cultivo utilizado no arroz irrigado (sucessão arroz azevém em preparo convencional) tem enfrentado problemas de baixa rentabilidade, devido à alta infestação de plantas daninhas e à necessidade de

longos períodos de pousio (VERNETTI JR. et al., 2004; GOMES et al., 2004). Esta situação tem gerado preocupação entre os agricultores e pesquisadores que, buscando minimizar os efeitos do sistema convencional ou tradicional de cultivo, estão adotando alternativas de produção como o cultivo mínimo e o plantio direto, com uma menor mobilização do solo.

O cultivo mínimo apresenta menor mobilização do solo, que pode ser feita no verão ou final do inverno, sendo neste segundo caso com uma antecedência que permita a formação de uma cobertura vegetal antes do plantio do arroz. Para este sistema recomendam-se taipas de base larga e perfil baixo, pois sua estrutura fica mais estável e o arroz pode ser semeado também sobre a taipa, aproveitando melhor a área. Neste sistema a incidência de plantas daninha é bastante reduzida (SOSBAI, 2005).

O plantio direto consiste na semeadura do arroz diretamente sobre os resíduos da cultura anterior, sem que haja preparo do solo, proporcionando a permanência da cobertura vegetal do solo durante todo o ano e mantendo um aporte contínuo de resíduos que contribuem para a redução da degradação do solo (GOMES et al., 2004). Cabe salientar que o plantio direto em arroz irrigado foi implantado com o objetivo inicial de combater a infestação por plantas daninhas.

Entretanto, o cultivo contínuo de arroz favorece o crescimento de plantas daninhas e sua infestação. Como alternativa para minimizar este problema incorporou-se, ao plantio direto, o sistema de rotação e sucessão de culturas, utilizando, além do arroz, culturas de cobertura e/ou alternativas ao arroz que proporcionam a redução da população de plantas daninhas, favorecendo a produção e dando maior estabilidade econômica ao produtor e equilíbrio ambiental (GASTAL et al., 2004).

A combinação destas práticas permite a viabilidade da exploração racional e econômica de culturas de sequeiro em solos de várzea, diminuindo seu custo de produção (GOMES et al., 2004). A produtividade nestes sistemas tem sido similar ou até superior ao sistema convencional.

No sistema de cultivo pré-germinado, o preparo do solo consiste no nivelamento e alisamento do solo após a sua inundação, mantendo-se uma lâmina de água de 0,10 m, com objetivo de controlar as plantas daninhas. De

vinte a trinta dias após a inundação do solo é realizada a semeadura com sementes pré germinadas. Alguns dias após a semeadura a água é retirada, mantendo o solo em estado de saturação permanente (PETRINI et al., 2004). Este sistema é o único utilizado no Estado de Santa Catarina.

O sistema “mix” é uma combinação entre os sistemas plantio direto e pré-germinado e está sendo uma boa alternativa em grandes áreas, contribuindo para a melhoria da qualidade do solo, controle de plantas daninhas, aumento da produtividade e qualidade dos grãos (PETRINI et al., 2004).

O sistema com transplante de mudas é bastante semelhante ao pré geminado, no entanto, é utilizado para produção de sementes de alta qualidade.

Atualmente, no Rio Grande do Sul predomina o sistema cultivo mínimo (54% da área), seguido dos sistemas convencional (29% da área), pré-germinado e mix (9% da área), plantio direto (3% da área) e outros (3% da área) (SOSBAI, 2005).

2.2 Dinâmica da matéria orgânica em ambiente alagado

A dinâmica da matéria orgânica no solo se dá principalmente através da disposição de resíduos orgânicos que são resultado, direto ou indireto, da reação de fotossíntese realizada pelas plantas. Através deste processo as plantas captam o CO_2 da atmosfera, fixando-o no tecido vegetal. Após a senescência e morte das plantas, a parte aérea é depositada na superfície e o sistema radicular no interior do solo, servindo como substrato para os organismos decompositores, transformadores da MOS (PAUL e CLARK, 1996). As perdas de matéria orgânica também podem ocorrer por meio da lixiviação de compostos solúveis e pela erosão do solo.

A quantidade de matéria orgânica que é armazenada no solo depende das características edafo-climáticas da região, da vegetação e/ou espécie cultivada e do manejo utilizado. Sistemas de cultivos que tem a capacidade de adicionar matéria orgânica em maiores profundidades via biomassa radicular, contribuem

significativamente para o armazenamento de carbono no solo (BAYER et al., 2000).

A velocidade e quantidade de adições e perdas de carbono no solo determinam a direção à sustentabilidade ou à degradação do sistema. Em geral o revolvimento do solo aumenta as perdas, já o revolvimento mínimo do solo é determinante para o acúmulo de carbono no solo (BAYER et al., 1997).

Nos solos de várzea e, principalmente, nas áreas utilizadas para o cultivo do arroz irrigado, há um período (três a quatro meses) em que o solo permanece alagado e os seus poros são ocupados por água, mantendo-se uma lâmina d'água na superfície. Por este motivo, há um "cenário" bastante peculiar com relação às alterações químicas, físicas e biológicas que ocorrem no solo, bem como com a dinâmica da matéria orgânica.

Em conseqüência do alagamento o suprimento de O_2 para o solo se torna bastante lento devido à baixa taxa de difusão deste gás na água (cerca de 10.000 vezes menor do que no ar) provocando uma mudança da microbiota do solo que passa a ser, predominantemente anaeróbia facultativa e obrigatória (SOUSA et al., 2009). Diferente da respiração aeróbia, para estes microrganismos a decomposição da matéria orgânica se dá por respiração anaeróbia e fermentação, que ocorre de forma mais lenta do que a decomposição aeróbia e o receptor de elétrons deixa de ser o O_2 e os produtos finais da decomposição da matéria orgânica também são distintos em solos bem drenados e em solos alagados, conforme mostrado na Tabela 1 (SOUSA et al., 2004).

Tabela 1. Resumo de algumas características dos processos microbiológicos que ocorrem em solos inundados

	Aeróbio	Anaeróbio	Fermentativo
Fonte de energia	oxidação da MO	Oxidação da MO	Oxidação da MO
Receptor de elétrons	O_2	substâncias inorgânicas (NO_3^-, Mn^{4+}, Fe^{3+}, SO_4^{2-})	substâncias orgânicas
Composto final de carbono	CO_2	CO_2, CH_4	CO_2, CH_4, álcoois, aminas, mercaptanos, ácidos orgânicos
Outros produtos finais	compostos inorgânicos oxidados (NO_3^-, SO_4^{2-})	compostos inorgânicos reduzidos (NH^{4+}, Fe^{2+}, Mn^{2+}, H_2S)	H_2, H_2S

Adaptado de Sousa et al. (2004).

A diminuição do potencial redox (Eh), as mudanças nos valores de pH e o aumento da condutividade elétrica (CE) são as principais alterações eletroquímicas que ocorrem no solo após o seu alagamento.

Outras alterações e comportamentos distintos ocorrem em solos alagados diferentemente dos solos bem drenados, são algumas delas: acúmulo de CO_2 devido a sua lenta difusão na água; acúmulo de ácidos orgânicos (acético, fórmico, butírico, propiônico e láctico); e redução dos óxidos de ferro e manganês, aumentando suas concentrações no solo, podendo em determinadas situações, atingir níveis tóxicos às plantas (Sousa et al., 2004, 2009).

2.3 Mecanismos de estabilização da matéria orgânica do solo

Existem muitos fatores que afetam a taxa de decomposição da MOS, principalmente quando se faz a conversão de sistemas naturais para a agricultura, alterando de forma bastante agressiva as taxas de adição e de degradação da MO. No entanto, existem mecanismos químicos e físicos que podem proteger a matéria orgânica da ação dos microrganismos decompositores, determinando que moléculas de mesma composição e complexidade sejam diferentemente suscetíveis à decomposição. Estes mecanismos são chamados de: recalcitrância, interação química ou coloidal e inacessibilidade ou proteção física, e são utilizados para classificar as diferentes frações da matéria orgânica do solo, porém essa separação é apenas didática, pois os mecanismos atuam simultaneamente sobre os substratos e compostos orgânicos em todos os seus estágios de decomposição (CHRISTENSEN, 1996).

A recalcitrância molecular é definida como a resistência variável de uma molécula em ser decomposta, em função do seu tamanho, conformação molecular, presença de grupos funcionais, ou mesmo sua composição elementar (TISDALL; OADES, 1982). Os microrganismos degradam seletivamente compostos menos recalcitrantes, aumentando a recalcitrância média do resíduo remanescente.

Alguns autores consideram a recalcitrância insuficiente para explicar variações no tempo de permanência da matéria orgânica no solo, pois estudos têm

indicado que a estabilidade da matéria orgânica do solo é mais dependente dos mecanismos de proteção física do que da recalcitrância intrínseca dos compostos orgânicos (SKJEMSTAD, 1993; LADD, 1993).

A interação, também chamada de estabilização química ou coloidal, compreende reações de superfície como: interações eletrostáticas, ligações de hidrogênio, troca de ligantes e pontes de cátions. São associações intermoleculares entre substâncias orgânicas e inorgânicas que alteram a taxa de degradação das moléculas orgânicas ou a síntese de novas moléculas (LADD et al., 1993; PILLON, 2000).

Os argilo-minerais e os óxidos são os principais minerais responsáveis pelas interações com a matéria orgânica do solo, pois considerando que são reações de superfície, as responsáveis pelas interações, estes minerais possuem área superficial 50 a 100 vezes maior do que área formada pela soma das frações areia e silte (STOTZKY, 1986, citado por PILLON, 2000). Roscoe et al. (2001) encontraram aproximadamente 90% do carbono orgânico total (COT) acumulado nas frações silte+argila em um Latossolo vermelho escuro do Cerrado brasileiro. A mineralogia dominante é um importante atributo na estabilização química da MOS, pois são encontradas na literatura diferenças na associação organo-mineral em solos com mineralogia distinta (PARFITT et al., 1997; WISEMAN e PÜTTMANN, 2005).

Esse mecanismo é diretamente influenciado pelo grupo de minerais do solo que podem ter carga variável, representados pelos óxidos de ferro e alumínio e caulinita (grupos funcionais hidroxil (OH) e grupos aluminol (Al-OH) respectivamente), onde a carga líquida de superfície varia com o pH do solo, a qual diminui quando o pH aumenta. Já o grupo de minerais de carga permanente apresenta sua carga em função do grau de substituição isomórfica nas lâminas octaedral e tetraedral dos minerais (SPOSITO, 1989).

Portanto, para que ocorra interação química, dois atributos do solo são de grande relevância: distribuição do tamanho de partículas e mineralogia dominante. Considerando que ambos atributos são pouco afetados pelo manejo, pode-se dizer que a quantidade de matéria orgânica quimicamente estabilizada é pouco dependente do sistema de manejo utilizado no solo (DUXBURY et al., 1989).

A matéria orgânica também pode estar inacessível ao ataque dos microrganismos do solo. A oclusão da MOS no interior dos agregados possibilita que esta fique protegida fisicamente e esta proteção está relacionada à formação e estabilização dos agregados, seja pela encapsulação no interior dos macro e microagregados ou em microporos inacessíveis (TISDALL e OADES, 1982; GOLCHIN, 1994).

A proteção física tem grande importância no controle da decomposição da MOS. Uma parte considerável do espaço poroso do solo possui diâmetro muito pequeno, o que impede a movimentação dos microrganismos decompositores, dificultando o seu acesso à MO protegida.

A estabilização da matéria orgânica protegida fisicamente depende diretamente da estabilidade de agregados e dos seus agentes ligantes, que por sua vez dependem da ação de raízes e hifas de fungos que estão intimamente relacionados à presença de plantas e adição de resíduos ao solo (TISDALL e OADES, 1982). Com o revolvimento e remoção da cobertura do solo a estabilidade e quantidade de agregados diminuem, reduzindo o conteúdo de matéria orgânica no solo.

2.4 Fracionamento físico da matéria orgânica do solo

Estudar a matéria orgânica do solo significa estudar uma diversidade de substâncias que apresentam comportamentos diferentes no solo (ROSCOE e MACHADO, 2002).

O fracionamento do solo em estudos da matéria orgânica tenta reduzir a heterogeneidade buscando separar frações homogêneas quanto à natureza, dinâmica e função. A escolha do método de fracionamento depende do objetivo do estudo, seja para caracterização e identificação química dos componentes, ou para a quantificação e descrição de compartimentos da MOS (ROSCOE e MACHADO, 2002).

Buscando estudar as relações da MOS com o ambiente (fração mineral, líquida e biológica), pode-se utilizar o fracionamento físico da MO que possibilita

relacionar cada compartimento com as suas funções no sistema. A quantificação e caracterização desses compartimentos auxiliam no entendimento da dinâmica da MOS, bem como da dinâmica de liberação de nutrientes, formação e estabilização dos agregados no solo.

Os fracionamentos físicos são, em geral, menos destrutivos e mais relacionados à função e estrutura da matéria orgânica do solo *in situ* do que os métodos químicos e, portanto, são adotados na maioria dos estudos da matéria orgânica do solo (CHRISTENSEN, 1992). Os métodos empregados para separar fisicamente a MOS baseiam-se na diferença de densidade entre as frações mineral e orgânica do solo (fracionamento densimétrico) e/ou na diferença de tamanho das partículas (fracionamento granulométrico) (ROSCOE e MACHADO, 2002).

O método granulométrico utiliza a separação das frações da matéria orgânica que estão associadas aos constituintes minerais do solo pela diferença no tamanho das partículas e para isso é essencial a completa dispersão deste (CHRISTENSEN, 2001).

A fração da MOS tamanho areia (> 53 μm), chamada matéria orgânica particulada ou fração grosseira (FG), é composta por restos vegetais em vários estágios de alteração e, em geral, se encontra em menor proporção, contribuindo com cerca de 3 a 20% do COT. Em solos cultivados de clima temperado, a FG corresponde aproximadamente a 10% da MOS, enquanto que em áreas sob vegetação permanente a proporção desta fração é mais significativa (CHRISTENSEN, 2001). Pode-se verificar aumentos nos teores desta fração em sistemas com menor revolvimento do solo e em condições climáticas menos favoráveis à decomposição (SILVA e MENDONÇA, 2007). Nascimento et al. (2009) verificaram proporções de aproximadamente 32% da FG na camada de 0-2,5 cm em um Gleissolo Háplico cultivado com arroz irrigado, evidenciando que o alagamento pode contribuir para uma maior proporção da FG, pois as taxas de decomposição são mais lentas em ambiente alagado, aumentando o tempo de permanência desta fração.

A MOS recuperada na fração areia apresenta pouca ou nenhuma associação organo-mineral e, por isso, a magnitude dessa fração normalmente é reduzida quando sistemas naturais são substituídos por sistemas de manejo

baseados em intenso revolvimento do solo (PILLON, 2000) e, assim pode servir como indicador da qualidade do solo na avaliação de sistemas de manejo recentes (BAYER et al., 2004; CONCEIÇÃO et al., 2005; CONCEIÇÃO, 2006).

As frações da MOS tamanho silte e argila (< 0,053mm; Carbono Associado aos Minerais - CAM) são constituídas de material orgânico num estágio mais avançado de decomposição e concentram grandes proporções da MOS, basicamente por formarem facilmente associações organo-minerais em virtude da grande área superficial específica dessas partículas minerais (CONCEIÇÃO, 2006; DIEKOW, 2003; GREGORICH et al., 2006). De acordo com Christensen (2001), a proporção da MOS ligada à fração argila varia de 50 a 75 % em solos temperados, enquanto que para o silte este valor está entre 20 e 40 % da MOS.

O fracionamento físico densimétrico baseia-se na diferença de densidade entre a fração orgânica (< 1,5 g cm^{-3}) e a fração mineral do solo mineral (≈ 2,65 g cm^{-3}) (CHRISTENSEN, 1992; ROSCOE e MACHADO, 2002). Assim, o fracionamento da MOS pela flotação em líquidos densos permite a separação em frações distintas de acordo com sua localização no solo, com o objetivo de inferir sobre a dinâmica dessa MOS (CONCEIÇÃO, 2006; GOLCHIN et al., 1994).

A fração leve (FL) corresponde a matéria orgânica não complexada e é composta por resíduos vegetais, animais e microbianos em vários estágios de decomposição (GREGORICH, 2006). Esta fração pode ser encontrada livre na matriz do solo (fração leve livre – FLL) ou oclusa no interior dos agregados (fração leve oclusa – FLO). A FLL é influenciada pelo tipo de vegetação e normalmente se acumula em maior quantidade nos horizontes superficiais, pois o único mecanismo de proteção que atua sobre ela é a recalcitrância do seu material constituinte (SOLLINS et al., 1996). Os teores da FLO, assim como a FLL, tentem a decrescer em profundidade, uma vez que o teor total de carbono também se comporta desta forma e os mecanismos de proteção predominantes nesta fração são a recalcitrância molecular e, principalmente, a oclusão ou proteção física destas estruturas (SOLLINS, et al., 1996).

A fração pesada (FP) é constituída de materiais orgânicos em elevado estágio de decomposição, que formam complexos ou associações com as partículas minerais do solo, particularmente com as argilas (CHRISTENSEN, 2001;

GOLCHIN et al., 1994). É a fração densimétrica mais estável, sendo caracterizada por uma baixa taxa de ciclagem, pois na sua estabilização estão envolvidos todos os mecanismos de proteção (recalcitrância química, oclusão e interação com minerais) (CHRISTENSEN, 2000)

A separação e obtenção das frações densimétricas (FLL, FLO e FP) ocorre pela imersão da amostra de solo geralmente em soluções salinas, como o iodeto de sódio (NaI) ou politungstato de sódio [$Na_6(H_2W_{12}O_{40}).H_2O$], com densidades que variam de 1,4 a 2,2 g cm^{-3} (ROSCOE e MACHADO, 2002). Através de uma agitação branda antes da dispersão da amostra, o material que estiver sobrenadando no líquido corresponde a FLL. Em seguida, é procedida a dispersão da amostra (sonicação ou agitação), rompendo-se todos os agregados presentes, obtendo-se dessa forma a FLO. O material remanescente é denominado de FP (ROSCOE e MACHADO, 2002; DIEKOW, 2003; CONCEIÇÃO, 2006).

Para obtenção da FG é feita dispersão do solo utilizando-se reagentes químicos como NaOH (hidróxido de sódio), Na_2CO_3 (oxalato de sódio), $Na_4P_2O_7$ (pirofosfato de sódio), $NaPO_3$ (metafosfato de sódio), ou a mistura deles, em soluções concentradas para que se possibilite: extrair os agentes cimentantes e elevar o potencial eletrocinético, de modo que os colóides permaneçam dispersos e a fração da MO possa ser separada com auxílio de peneira de acordo com o tamanho de partícula.

Algumas divergências e dúvidas sobre processos metodológicos e a padronização de procedimentos ainda são levantados, entretanto, esta padronização deve ser bastante flexível permitindo a aplicação na grande diversidade de solos e ecossistemas existentes.

2.5 Efeito do manejo sobre as frações físicas da matéria orgânica do solo

Os processos de mineralização e humificação, responsáveis pela decomposição e transformação da matéria orgânica ocorrem simultaneamente e são regulados por fatores climáticos, pH do solo, disponibilidade de nutrientes,

meso e microfauna, quantidade de resíduos e sua composição química (EMPINOTTI, 1999).

Quando o meio ambiente sofre a interferência do homem a dinâmica da matéria orgânica é alterada e, geralmente, os resultados dessa interferência sobre as propriedades do solo são negativos (SANTOS, 2003). Bayer (1996) afirma que o uso intensivo do solo e o seu revolvimento contribuem para a sua degradação que, entre outros fatores, está relacionada diretamente com a diminuição da matéria orgânica.

Dependendo do manejo adotado, o solo pode atuar como um reservatório de carbono ou como fonte de CO_2 para a atmosfera. A concentração de carbono atmosférico tem aumentado nas últimas décadas, principalmente pela queima de combustíveis fósseis e oxidação da matéria orgânica do solo e a atividade agrícola têm contribuído com 1/3 da liberação de CO_2, o qual representa, aproximadamente, 50% dos gases que compõem o efeito estufa (CHRISTENSEN, 1996). Pequenas alterações na quantidade de matéria orgânica representam um grande efeito sobre a concentração do CO_2 atmosférico.

O preparo do solo afeta principalmente as propriedades físicas do solo (agregação, compactação, aeração, etc). No sistema convencional esse efeito é mais intenso devido à maior exposição do solo aos fatores climáticos (radiação, chuva, vento, entre outros). Já no plantio direto, a permanência da palhada na superfície do solo diminui a amplitude térmica e aumenta a retenção de água no solo (SALTON e MIELNICZUK, 1995). O revolvimento sistemático do solo também promove um estresse na população microbiana do solo fazendo com que esta consuma o carbono orgânico, levando à redução da matéria orgânica do solo.

A magnitude do efeito do manejo sobre as frações minerais do solo ao longo do tempo, pode ser determinada pela composição e grau de associação da matéria orgânica. Bayer (1996) verificou que a taxa de decomposição da matéria orgânica nas frações >53 μm em plantio convencional e em plantio direto, foi de 4,5 e 3,4 vezes maior do que nas frações <53 μm, respectivamente, em um Argissolo Vermelho.

Mielniczuk (1999), formulou um modelo da dinâmica da matéria orgânica do solo e explica que uma perda inicial rápida de carbono da fração >53 μm nos primeiros anos de cultivo do solo se deve, provavelmente, à redução nas adições de carbono devido à colheita e ao aumento da taxa de decomposição da matéria orgânica grosseira através do revolvimento do solo. Com isso, a estabilidade de agregados é reduzida e a matéria orgânica protegida fisicamente no interior dos agregados torna-se acessível aos microrganismos.

Em geral, todas as frações de tamanho de partícula da matéria orgânica são afetadas pelo manejo do solo ao longo do tempo, no entanto, os maiores efeitos são observados nas frações mais grosseiras (CHRISTENSEN, 1992; BAYER, 1996).

Em sistemas com baixa adição de resíduos há uma rápida mineralização das frações mais lábeis (>53 μm). Mantendo-se o revolvimento e a pequena adição de resíduos, ocorrem perdas acentuadas na estabilidade de agregados e a matéria orgânica localizada no interior dos microagregados é mineralizada. Os processos de perda da MO continua até que a atividade microbiana diminua consideravelmente levando o sistema a um novo estado de equilíbrio, com baixos conteúdos de matéria orgânica. Por outro lado, em sistemas com alta adição de resíduos e pouco ou nenhum revolvimento do solo, há inicialmente um acúmulo de matéria orgânica nas frações mais lábeis, favorecendo a estabilidade de agregados. Neste caso, em solos arenosos, a formação de macroagregados é importante para a estabilização da matéria orgânica, enquanto que em solos argilosos, rapidamente são formados microagregados, mantendo a matéria orgânica inacessível aos microrganismos (PILLON, 2000).

Desta forma, é possível entender que diferentes sistemas de manejo alteram o ecossistema como um todo. A matéria orgânica, em especial, é diretamente afetada quantitativa e qualitativamente, sendo um indicador da degradação ou conservação dos solos sob cultivo agrícola.

Na maioria dos solos os sistemas conservacionistas de manejo favorecem o aumento no estoque de C no solo e nos solos de várzea não é diferente, no entanto, pouco se sabe sobre a intensidade com que os diferentes sistemas

influenciam na dinâmica da MOS, principalmente nos seus mecanismos de proteção.

2.6 Carbono orgânico e agregação do solo

Em decorrência da decomposição da matéria orgânica do solo, os resíduos de plantas e seus produtos passam por transformações químicas e físicas e ficam parcial ou completamente associados às partículas minerais do solo, formando agregados estáveis (KEMPER e ROSENAU, 1986). O grau de associação dessas partículas e o nível de proteção da MO nos agregados dependem das práticas de manejo do solo (SIX et al., 2002), da textura e da mineralogia (HASSINK, 1997; ZECH et al., 1997).

A utilização do sistema plantio direto tem demonstrado grande eficiência tanto na recuperação dos teores de MOS como no aumento da agregação (CAMBARDELLA e ELLIOTT, 1993, 1994; SILVA e MIENICZUK, 1998; SIX et al., 2000). Esses benefícios ocorrem inicialmente na camada superficial, elevando os níveis de qualidade do solo ao longo do tempo (VEZZANI, 2001). Em contrapartida, o rompimento dos agregados pelo revolvimento em sistemas convencionais de manejo, aumentam as taxas de degradação, pois possibilitam maior exposição da MO aos agentes da decomposição (microrganismos, oxigênio, calor, etc).

Muitos autores utilizam a teoria da hierarquia de agregação proposta por Tisdall e Oades (1982) para explicar a correlação existente entre agregação e MOS (CAMBARDELLA; ELLIOTT, 1993; GOLCHIN et al., 1997; ROSCOE et al., 2006). Segundo estes autores, as estruturas básicas do solo são os argilominerais que associados à MOS formam os chamados complexos organominerais (COM). Quando esses complexos são formados pela interação direta destes componentes, são chamados COM primários e a união desses são os COM secundários ou microagregados (COM secundários < 53 μm) (ROSCOE; MACHADO, 2002).

Os microagregados podem ser unidos por materiais orgânicos transitórios como exsudatos microbianos e radiculares, entrelaçamento de hifas e fungos e pela ação do sistema radicular, resultando nos macroagregados (COM secundários

> 250 μm) (BAYER; MIELNICZUK, 1999; SIX et al., 2002; TISDALL, 1991, ROSCOE et al., 2006).

Quanto à estabilidade dos agregados, Dexter (1988) define dois tipos: a) referente à capacidade do solo em conservar a estrutura em água e b) relacionada à resistência a pressões mecânicas. Essa resistência é influenciada pela aproximação das partículas e pela estabilização destas por substâncias agregantes (matéria orgânica, argilas e óxidos).

Os processos de umidecimento e secagem do solo podem provocar uma maior aproximação das partículas com a superfície radicular das plantas e, associadas aos exsudatos orgânicos, atuam como ponto de agregação. Quando ocorre a ruptura das raízes, ficam expostas regiões de maior ataque microbiano a partir das extremidades da matéria orgânica, sendo a mesma decomposta também no interior do agregado. Portanto, em sistemas com alta densidade de raízes, há uma maior agregação e estabilização destes agregados em decorrência da formação de uma rede de raízes associadas a fungos micorrízicos (JASTROW e MILLER, 1997).

Em solos de textura arenosa, a presença de quartzo provoca uma maior distância entre as demais partículas do solo, o que acarreta em uma menor estabilidade estrutural quando comparados aos solos argilosos, já que a fração areia tem pequena capacidade de se manter quimicamente ligada a outras partículas, pois sua CTC é menor que 1 $mmol_c\ dm^{-3}$ enquanto que no húmus, por exemplo, pode variar de 200 a 400 $mmol_c\ dm^{-3}$. Sendo assim, a manutenção de um sistema vegetal com grande aporte de resíduos é essencial para o incremento contínuo de compostos ligantes e manutenção da atividade agregante dos microrganismos (CONCEIÇÃO, 2006).

Nos solos de várzea, o manejo convencional, com revolvimento intensivo, associado ao ambiente alagado pode desestabilisar a agregação do solo, fazendo com que haja um predomíneo de agregados nas frações de menor tamanho (PALMEIRA et al. 1999; PAULETTO et al. 2004; LIMA et al., 2008). A agregação efêmera e a saturação do solo com drenagem restrita tem direta sobre a proteção física da MOS (NASCIMENTO et al., 2009).

Como os processos de agregação e desagregação ocorrem permanente e simultaneamente no solo, o nível de agregação é reflexo de um balanço líquido das adições contínuas de matéria orgânica no solo e as taxas de formação e destruição dos agregados, principalmente em solos onde a MO é o principal agente de agregação.

2.7 Caracterização química da matéria orgânica do solo

Nas últimas décadas algumas técnicas espectroscópicas evoluíram significativamente na capacidade de caracterizar quantitativa e qualitativamente a composição e transformação de elementos e compostos no sistemas solo-água-planta-atmosfera. Técnicas como Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR), Ressonância Magnética Nuclear (RMN) e Fluorescência Induzida por Laser (FIL) são ferramentas que auxiliam no entendimento de inúmeras e complexas reações no solo e suas interfaces (ABREU JR. et al., 2009).

Para estudar a MOS a partir destes métodos, é necessário a realização de procedimentos de extração e/ou fracionamento por métodos físicos ou químicos, pois a MO geralmente se apresenta em pequena quantidade e associada aos demais constituintes do solo, sendo necessário concentrá-la e na maioria dos casos, purificar estas frações para evitar interferência de material inorgânico.

A espectroscopia de ^{13}C RMN trata-se da interação da radiação eletromagnética com a matéria. Em amostras sólidas utiliza-se a técnica de rotação no ângulo mágico e polarização cruzada com monitoramento dos núcleos do isótopo ^{13}C. Basicamente é uma espectroscopia de absorção onde, sob condições apropriadas em um campo magnético, uma amostras pode absorver radiação eletromagnética na região de radiofreqüência, em uma freqüência governada pelas características estruturais da molécula (CARVALHO et al., 2004).

Com esta análise pode-se obter o grau de aromaticidade e alifaticidade das amostras bem como, a caracterização estrutural identificando compostos como: lignina, taninos, carboidratos, grupos alquil, metoxílicos, fenólicos e carboxílicos, dentre outros (STEVENSON, 1994; ABREU JR., 2009). Desta forma, pode-se

monitorar as alterações químicas e estruturais da MOS decorrentes do tipo de uso e manejo do solo. O ^{13}C RMN no estado sólido é bastante utilizado porque possibilita o estudo de substâncias pouco solúveis além de não ser uma análise destrutiva, preservando a amostra para outras determinações (ABREU JR. et al., 2009).

Os principais grupos funcionais detectados por ^{13}C RMN no estado sólido são: 0 – 45 ppm: grupos alifáticos; 45 – 60 ppm: metoxil e N-alifáticos; 60 – 110 ppm: O-alifáticos; 110 – 140 ppm: aromáticos; 140 – 160 ppm: fenólicos; 160 – 185 ppm: carboxílicos; e 185 – 230 ppm: carbonílicos (ABREU JR. et al., 2009).

A espectroscopia de infra vermelho (FTIR) vem sendo aplicada para estudo dos grupos funcionais da MOS. É uma técnica de fácil interpretação, porém, a sobreposição de bandas pode requerer o uso complementar de outros métodos analíticos, como a análise elementar.

A radiação de infravermelho corresponde à parte do espectro eletromagnético entre a região visível e as microondas. Para o estudo da MOS utiliza-se o intervalo de 4000 a 400 nm, onde a energia dos fótons provoca movimentos vibracionais de átomos e grupos ligados covalentemente, permitindo a identificação desses movimentos rotacionais em grupos de ligações simples (STEVENSON, 1994; ABREU JR et al., 2009).

O FTIR permite a observação de mudanças ambientais resultante do sistema de manejo do solo. O sistema convencional de manejo, com aração e gradagem, por exemplo, expõe a MOS naturalmente estável aos agentes da decomposição, favorecendo a sua mineralização e após um determinado período, permanece no solo apenas a MO mais recalcitrante, que mostra características específicas como maior aromaticidade da estrutura.

Já a florescência induzida por laser (FIL) aplicada a solos, é um método relativamente novo, que tem se mostrado eficiente na análise da MO do solo inteiro, sendo uma técnica ágil, limpa e em condições próximas as naturais do solo (MILORI et al., 2006). A fluorescência do solo está na MO que apresenta grupos funcionais ricos em ligações insaturadas, que estão principalmente na MO não humificada. Ao iluminar a amostras de solo com luz azul, excitam-se preferencialmente as estruturas cuja concentração aumenta no processo de

humificação, ou seja, a FIL pode servir como um ótimo indicador do grau de humificação da MOS.

3. ESTUDO 1- Carbono orgânico total e frações granulométricas da matéria orgânica de um Planossolo Háplico submetido a diferentes sistemas de manejo com arroz irrigado.

INTRODUÇÃO

A quantidade de matéria orgânica que é armazenada no solo depende do tipo de solo, principalmente textura e mineralogia, das condições climáticas da região, da vegetação ou espécie cultivada e do manejo utilizado (PARFITT et al., 1997; PILLON, 2000; BAYER et al. 2002).

Nos solos de várzea, principalmente nas áreas cultivadas com arroz irrigado, as alterações químicas são bastante distintas dos solos oxidados. Devido às condições de má drenagem e ao alagamento, a dinâmica da MOS é diferenciada, tanto em relação aos produtos quanto à velocidade de decomposição, visto que, há uma alteração na microbiota do solo, que passa a ser predominantemente anaeróbia, e desenvolve um processo de decomposição dos resíduos orgânicos de forma mais lenta do que no processo aeróbio. Além disso, em clima temperado, as baixas temperaturas reduzem ainda mais a atividade microbiana, os resíduos sofrem decomposição parcial e assim, acumulam mais C na fração grosseira (PILLON, 2000).

Os sistemas de uso também são responsáveis por alterações no solo e a MO é um indicador bastante sensível às mudanças de manejo. Normalmente, o sistema plantio direto promove o incremento do estoque de MO, enquanto o plantio convencional tende a reduzi-lo (BAYER et al, 2002; DIEKOW, 2003).

O preparo do solo, com mecanização intensiva promove a quebra dos agregados, expondo o solo aos agentes da decomposição (sol, microrganismos, O_2), que atuam de forma mais intensa, acelerando o processo de degradação (GOMES et al., 2004). Já o plantio direto mantém a cobertura vegetal, favorecendo um aporte contínuo de MO que, associado ao não revolvimento do solo, permite

que a degradação seja mínima. Cabe salientar que o plantio direto em arroz irrigado foi implantado com o objetivo inicial de combater a infestação por plantas daninhas.

Para estudar os efeitos do manejo sobre o estoque de carbono no solo, é fundamental a existência dos experimentos de longa duração, os quais permitem avaliar os efeitos cumulativos de cada sistema, visto que, as alterações são lentas mas gradativas, sendo difíceis de serem observadas nos primeiros anos.

Na busca de avaliar essas alterações da MOS, vários estudos com fracionamento físico vêm sendo feitos com o objetivo de obter informações a respeito da estabilização da MOS, sua localização, quantidade e qualidade (CHRISTENSEN, 1992). O fracionamento físico por tamanho de partícula, fracionamento granulométrico, parte do princípio de que frações orgânicas associadas às partículas minerais do solo diferem na sua estrutura e função, atuando de diferentes formas na dinâmica da MOS (CHRISTENSEN, 1992; 2001).

A MO tamanho areia (> 53 μm) ou fração grosseira, é composta por resíduos vegetais e animais em estágio inicial de decomposição e em geral se encontra em menor proporção, podendo haver um aumento em sistemas onde as condições são menos favoráveis a decomposição, como ocorre em ambiente alagado e em baixas temperaturas (SILVA e MENDONÇA, 2007). Esta é considerada a fração mais lábil da MOS, pois está mais acessível à decomposição pelos microrganismos. A fração da MO tamanho silte e argila (< 53 μm) corresponde à moléculas orgânicas que apresentam interação com os minerais da fração silte e argila e, geralmente, são substâncias que se encontram num estágio mais avançado de decomposição (CHRISTENSEN, 2001). Esta fração está relacionada à maior recalcitrância e à proteção química, devido a sua interação com os minerais do solo, principalmente os óxidos de Fe e Al (BALDOCK et al. 1992; BAYER et al., 1996).

Neste contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar o efeito dos sistemas de manejo sobre o teor e estoque do carbono orgânico total bem como sua distribuição nas frações granulométricas de um Planossolo, cultivado com arroz irrigado.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento vem sendo conduzido desde 1985 em um Planossolo Háplico na Estação Experimental de Terras Baixas - CPACT - EMBRAPA, localizado no município do Capão do Leão – RS em uma área onde anteriormente era de campo nativo nunca cultivado. O clima da região é Cfa (C- clima mesotérmico quente, com média do mês de frio entre 3-18º C; f- precipitação média mensal não inferior a 60 mm – sempre úmido; a- temperatura do mês mais quente superior a 22° C), segundo classificação de Köeppen. O solo apresenta, em média, na camada de 0 – 0,20 m, 149 g kg^{-1} de argila, 389 g kg^{-1} de silte e 463 g kg^{-1} de areia, tendo um predomínio de caulinita e mistura de minerais 2:1 na fração argila (CASTILHOS et al., 2002).

Os tratamentos estão dispostos em blocos casualizados com quatro repetições e para este estudo foram avaliados: ST – sistema tradicional de cultivo: um ano arroz (preparo convencional) seguido de dois anos de pousio; APC – cultivo contínuo de arroz (preparo convencional); APD – sucessão azevém x arroz sob plantio direto e SN – solo mantido com vegetação natural (campo nativo). As amostras de solo foram coletadas em outubro de 2006, nas camadas 0-0,025; 0,025-0,05; 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m.

O fracionamento granulométrico utilizado foi descrito por Cambardella e Elliott (1992). Foram usados 20 gramas de solo seco ao ar e 60 mL de hexametafosfato de sódio (5,0 g L^{-1}). O carbono do material retido na peneira de 53 µm, corresponde ao carbono da fração grosseira (CFG), enquanto o carbono associado aos minerais (CAM) foi obtido por diferença entre o carbono orgânico total (COT) e o CFG. Os teores de COT e CFG foram determinados em analisador de combustão seca (LECO).

Os estoques de COT e nas frações da MO foram calculados em massa equivalente de solo segundo Sisti et al. (2004), utilizando a densidade do solo em cada camada (Tabela 1; BAMBERG et al., 2009) e tendo o solo sob vegetação natural (SN) como referência.

Tabela 1. Densidade do solo nas quatro camadas para os tratamentos amostrados de um Planossolo Háplico sob diferentes sistemas de manejo

Profundidade	Densidade do solo			
	ST	APC	APD	SN
---- m ----	---------- Mg m^{-3} ----------			
0-0,025	1,55	1,49	1,51	1,49
0,025-0,05	1,50	1,45	1,48	1,54
0,05-0,10	1,53	1,53	1,52	1,55
0,10-0,20	1,57	1,60	1,54	1,57

ST = Sistema tradicional de cultivo: um ano arroz (preparo convencional) seguido de dois anos com pousio; APC = Sistema de cultivo contínuo de arroz (preparo convencional); APD = Sucessão de azevém x arroz sob plantio direto; SN = Solo mantido em condições naturais, sem cultivo.
Fonte: Bamberg et al. (2009).

Considerando os estoques de COT, CFG e CAM, calculou-se o Índice de Manejo de carbono (IMC) para cada sistema (a), adaptado de Blair et al. (1995) descrito por Diekow (2003). E neste caso, utilizou-se o CFG como representando a porção lábil da MOS e a CAM como porção não lábil.

(a) IMC= IEC x IL x 100

Onde:

IEC = C total do tratamento / C total do solo natural;

IL = L tratamento / L solo natural

L = C lábil / C não lábil

Os resultados dos parâmetros avaliados foram submetidos à análise de variância e aplicado o teste de Duncan e DMS de Fischer a 5 %, para avaliação das diferenças entre os resultados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os teores médios de carbono orgânico total (COT) (Figura 1) na camada de 0-0,025 m variaram de 14,09 a 47,59 g Kg^{-1} entre os sistemas de cultivo, enquanto na camada de 0,025-0,05 m, os valores estiveram entre 11,48 e 22,70 g Kg^{-1}, na camada de 0,05-0,10 m variaram de 10,77 a 13,08 g Kg^{-1} e na camada de 0,10-0,20 m o COT esteve entre 8,24 e 9,68 g Kg^{-1}. Observa-se que, tanto os

valores como a amplitude de variação, diminuem com a profundidade, ou seja, o maior efeito dos sistemas de cultivo do solo ocorreu nas camadas superficiais.

O maior teor de COT do solo mantido sob condição natural (SN) nas camadas superficiais (0-0,025 m) se deve à estabilidade deste sistema que está ha mais de 20 anos sem utilização agrícola, o que permite a manutenção de um balanço entre as taxas de adição e perdas de matéria orgânica.

Na Figura 1 observa-se uma diminuição nos teores de COT quando comparados aos sistemas APD e SN na camada superficial (0-0,025 m), onde a redução do tratamento sob cultivo foi de 37%. Essa diminuição foi ainda maior comparando o SN com os sistemas ST e APC, ambos sob preparo convencional, onde os valores de COT ficaram, em média, 68% abaixo do solo sob campo nativo (SN).

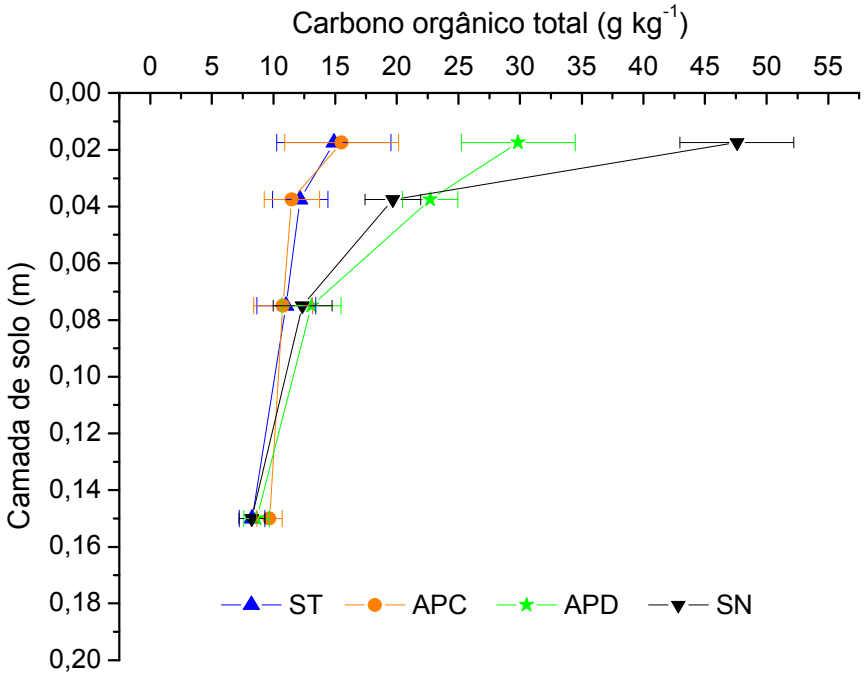


Figura 1. Teor de carbono orgânico total nas camadas de um Planossolo Háplico submetido a diferentes sistemas de cultivo de arroz irrigado, Capão do Leão – RS. Médias de quatro repetições. Barras indicam valores para DMS 5%. ST = Sistema tradicional de cultivo: um ano arroz (preparo convencional) seguido de dois anos com pousio; APC = Sistema de cultivo contínuo de arroz (preparo convencional); APD = Sucessão de azevém x arroz sob plantio direto; SN = Solo mantido em condições naturais, sem cultivo.

Na camada de 0,025-0,05 m, observa-se que o tratamento APD manteve os teores de COT semelhantes ao SN, o que pode ser explicado pelo não revolvimento do solo e acúmulo de raízes nas camadas mais superficiais (AMADO et al., 2001). No entanto, nos dois sistemas de cultivo onde há revolvimento do solo (ST e APC), observa-se uma diminuição nos teores de COT. Resultados semelhantes foram obtidos por Santos et al. (2004) na camada superficial (0-0,05m) de um solo de várzea cultivado com arroz irrigado, após 17 anos de cultivo. As alternâncias de umedecimento e secagem, devido ao cultivo do arroz, associadas as melhores condições de aeração do solo pelo revolvimento, no preparo convencional, aumentam a atividade microbiana, acelerando o processo de decomposição da matéria orgânica e consequentemente, diminuem os teores de COT do solo (STEVENSON, 1982).

Nas camadas mais profundas, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, as concentrações de COT foram semelhantes em todos os sistemas (Figura 1). A utilização do preparo convencional nos sistemas ST e APC resultou em uma homogeneidade da concentração de COT em profundidade no perfil do solo. Apesar do revolvimento do solo, devido ao preparo convencional nos sistemas ST e APD, e a provável aceleração dos processos de decomposição da MO, a incorporação dos resíduos favoreceu a manutenção dos teores de COT nestas profundidades.

As camadas superficiais estão mais sujeitas às variações de temperatura e umidade (SALTON e MIELNICZUK, 1995), principalmente quando há ausência de cobertura do solo, como ocorre em sistemas convencionais de cultivo. As condições mais favoráveis à oxidação da MO, associadas à quebra dos agregados do solo e maior exposição dos resíduos, colaboram para uma maior taxa de decomposição da mesma, resultando em menores concentrações comparativamente aos sistemas com plantio direto e campo nativo.

Segundo Bayer e Mielniczuk (1997), os conteúdos de COT de solos afetados por sistemas de manejo somente irão se aproximar do conteúdo de COT de um solo sob condição natural se submetidos a sistemas que adicionem grandes quantidades de resíduo vegetal ao solo e que sejam minimamente revolvidos.

Na Tabela 2 são apresentados os estoques de COT. Convém salientar que as camadas coletadas variam de 0,025 a 0,10 m de espessura, implicando em

volumes de solo distintos, explicando assim, maiores estoques de COT nas camadas inferiores em alguns tratamentos.

Tabela 2 Estoque de carbono orgânico total (COT= Mg ha^{-1}), nitrogênio total (NT= Mg ha^{-1}) e relação C/N em um Planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo de arroz irrigado, Capão do Leão – RS. Média de quatro repetições.

Sistema de cultivo	COT*	NT*
	---------- Mg ha^{-1} ----------	
	0 - 0,025 m	
ST	5,58 c	0,32 b
APC	5,80 c	0,39 b
APD	11,11 b	0,91 a
SN	17,73 a	1,16 a
	0,025 - 0,05 m	
ST	4,71 b	0,34 b
APC	4,37 b	0,34 b
APD	8,69 a	0,58 a
SN	7,57 a	0,40 b
	0,05 - 0,10 m	
ST	8,48 a	0,67 a
APC	8,34 a	0,61 a
APD	9,95 a	0,72 a
SN	9,58 a	0,63 a
	0,10 - 0,20 m	
ST	13,02 a	1,14 a
APC	15,25 a	1,20 a
APD	13,52 a	1,14 a
SN	12,95 a	1,07 a
	0-0,020 m **	
ST	31,79 b	2,47 b
APC	33,75 b	2,54 b
APD	43,27 a	3,34 a
SN	47,83 a	3,26 a

Médias seguidas da mesma letra na coluna, em cada camada, não diferem estatisticamente pelo teste de Duncan, ao nível de 5%. ST = Sistema tradicional de cultivo: um ano arroz (preparo convencional) seguido de dois anos com pousio; APC = Sistema de cultivo contínuo de arroz (preparo convencional); APD = Sucessão de azevém x arroz sob plantio direto; SN = Solo mantido em condições naturais, sem cultivo.
* Valores corrigidos pela massa equivalente de solo em cada camada (SISTI et al., 2004). ** Valores obtidos pela soma das quatro camadas amostradas.

Os estoques de COT nas camadas superficiais (0-0,025 e 0,025-0,05 m) foram diretamente influenciados pelo sistema de cultivo. No sistema APD esses

valores foram superiores aos obtidos nos sistemas sob preparo convencional (ST e APC). Para as camadas de solo mais profundas (0,05-0,10 e 0,10-0,20 m) não houve diferença significativa entre os sistemas de cultivo.

O estoque de COT na camada de 0-0,20 m no solo mantido sob condição natural (SN) foi de 47,83 Mg ha^{-1} (Tabela 2). Este resultado se assemelha aos encontrado por Zschornack (2007), avaliando solos de várzea sob campo nativo em dois Planossolos distintos (47,34 e 64,34 Mg ha^{-1}) e maiores que o encontrado por Nascimento et al. (2009) em um Gleissolo Háplico (36 Mg ha^{-1}). Amado et al. (2006), observaram em solos de terras altas, estoques de COT de 57,2 e 22,1 Mg ha^{-1} em solo argiloso e arenoso, respectivamente. Segundo os autores, o maior estoque no solo argiloso se deve à maior proteção física e química da matéria orgânica. É importante observar que, ao comparar diferentes tipos de solo, deve-se levar em consideração alguns atributos físicos (quantidade e disponibilidade de água e ar, por exemplo), a mineralogia e a quantidade de óxidos que são bastante distintos nos solos de várzea e influenciam diretamente a dinâmica da matéria orgânica.

No sistema de referência (SN) e no APD o estoque de COT nas camadas de 0-0,025 e 0,025-0,05 m representou, em média, 50% do carbono estocado na camada de 0-0,20 m enquanto nos sistemas com preparo convencional do solo (ST e APC), o estoque de COT foi de 32% em relação ao total estocado na camada arável. A manutenção da cobertura vegetal e o não revolvimento do solo são responsáveis por um maior incremento de COT no solo e por menores taxas de decomposição, favorecendo assim, a manutenção/recuperação dos teores de matéria orgânica. Conceição (2006), avaliando um Argissolo submetido a sistemas de cultivo durante 18 anos, também obteve estoques de COT bastante elevados no campo nativo e nos sistemas com plantio direto, sendo as maiores diferenças entre os tratamentos obtidas na camada de 0-0,05 m.

Diferenças significativas nos estoques de nitrogênio total (NT) entre os sistemas de cultivo foram observadas nas camadas de 0-0,025 e 0,025-0,05 m (Tabela 2). Nas camadas superficiais as maiores reservas de NT foram observadas no sistema APD e no solo mantido sob vegetação natural (SN). Nos sistemas ST e APC, as reduções nos estoques de NT foram de 71 e 66%, respectivamente, na

primeira camada, quando comparados ao SN. Outros autores, encontraram diminuição de, aproximadamente, 40% nas quantidades de NT do solo, comparando áreas com sistema convencional de cultivo com áreas de campo nativo (SANTOS et al., 2004). Os ciclos de alagamento e drenagem do solo, por ocasião dos cultivos de arroz irrigado, também podem ter contribuído para a diminuição do NT, pois aumentam as perdas de N por desnitrificação ou lixiviação, respectivamente.

Não houve diferenças significativas nos estoques de NT, entre os sistemas de cultivo, nas camadas de 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m. Em geral, as variações encontradas para os estoques de NT seguiram a mesma tendência das variações do COT, o que se justifica pela relação desses dois parâmetros, componentes da matéria orgânica do solo.

As reservas de carbono orgânico da fração grosseira (CFG > 53 μm) nas camadas de 0-0,025 e 0,025-0,05 m, em geral, foram superiores à verificada nas camadas de 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m nos sistemas APD e SN (Tabela 3). Isto porque se trata de uma região de intenso desenvolvimento radicular e também, por ser uma camada onde se concentram as adições de resíduos, principalmente nos sistemas onde não há revolvimento do solo (SILVA e MIELNICZUK, 1997).

Já nos sistemas ST e APC, onde ocorre a incorporação dos resíduos, no momento do preparo convencional do solo para o cultivo do arroz, houve uma distribuição mais uniforme no estoque de MO ao longo do perfil.

Na Tabela 3 observa-se que os maiores estoques de CFG (fração lábil) foram encontrados no sistema APD, que se manteve semelhante ao SN. A fração particulada da MO é composta basicamente por resíduos pouco decompostos (AMADO et al., 2006) e estes resultados se justificam por se tratar de dois sistemas com uma taxa de decomposição mais lenta do que os sistemas com preparo convencional onde há maior exposição da MO aos agentes decompositores (microrganismos, oxigênio, temperatura, etc). A redução do CFG, devido ao preparo convencional, pode ser explicada pelo fato desta ser uma fração de rápida ciclagem, pois se encontra mais vulnerável a decomposição por estar menos protegida pelos mecanismos de estabilização da MO, sendo o único ou principal atuante a recalcitrância.

Tabela 3. Estoques de carbono orgânico da fração grosseira (CFG), carbono associado aos minerais (CAM) e relação entre estes e o carbono orgânico total (CFG/COT e CAM/COT), em um Planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo de arroz irrigado, Capão do Leão – RS. Média de quatro repetições

Sistema de cultivo	CFG*	CAM*	CFG/COT	CAM/COT
	--------- Mg ha^{-1} ---------		---------- % ----------	
		0 - 0,025 m		
ST	1,68 b	3,90 b	31,16	68,84
APC	1,82 b	4,00 b	31,23	68,77
APD	7,07 a	3,91 b	67,25	32,75
SN	7,20 a	10,66 a	40,99	59,01
		0,025 - 0,05 m		
ST	1,32 b	3,39 ab	28,03	71,97
APC	1,14 b	3,23 b	25,93	74,07
APD	3,70 a	4,99 a	40,85	59,15
SN	4,05 a	3,52 ab	55,42	44,58
		0,05 - 0,10 m		
ST	2,56 a	6,23 a	26,47	73,53
APC	1,97 a	6,37 a	24,04	75,96
APD	3,01 a	6,95 a	29,08	70,92
SN	2,26 a	7,32 a	24,50	75,50
		0,10 - 0,20 m		
ST	2,17 a	10,85 ab	16,66	83,34
APC	2,31 a	12,94 a	15,16	84,84
APD	2,46 a	11,06 ab	17,90	82,10
SN	2,82 a	10,13 b	21,61	78,39

Médias seguidas da mesma letra na coluna, em cada camada, não diferem estatisticamente pelo teste de Duncan, ao nível de 5%. ST = Sistema tradicional de cultivo: um ano arroz (preparo convencional) seguido de dois anos com pousio; APC = Sistema de cultivo contínuo de arroz (preparo convencional); APD = Sucessão de azevém x arroz sob plantio direto; SN = Solo mantido em condições naturais, sem cultivo.

* Valores corrigidos pela massa equivalente de solo em cada camada (SISTI et al., 2004).

Os quocientes CFG/COT e CAM/COT indicam a importância relativa destas frações sobre o COT (Tabela 3). A MO particulada é um importante compartimento por ser considerada fonte de energia para a biota do solo e por atuar como fonte de nutrientes às plantas, principalmente o nitrogênio (GREGORICH e JANSEN, 1996). Vários autores têm comprovado que a mudança de áreas naturalmente vegetadas por áreas cultivadas, ocasiona perdas consideráveis da fração particulada, principalmente nos primeiros anos de cultivo,

o que a torna um importante indicador das mudanças de manejo do solo (BAYER et al., 2004; CONCEIÇÃO et al., 2005; GREGORICH e JANSEN, 1996).

A matéria orgânica da fração grosseira, em geral, se encontra em menor proporção em relação à fração associada a minerais (CAM), contribuindo com cerca de 3-20% do COT. No entanto, pode haver um aumento nos teores desta fração em sistemas com menor revolvimento do solo e em condições climáticas menos favoráveis à decomposição (SILVA e MENDONÇA, 2007). No caso deste estudo, por ser em um Planossolo de região temperada, além do período em que o solo encontra-se sob alagamento por ocasião do cultivo do arroz irrigado, durante o inverno, as temperaturas são baixas e há oscilação de lençol freático, ocasionando uma queda nas taxas de decomposição, o que poderia justificar as maiores proporções de CFG, entre 15 e 67%, com os maiores estoques nas camadas superficiais (Tabela 4).

A manutenção de matéria orgânica protegida nos agregados do solo não cultivado aumenta o período de interação do material particulado com os argilominerais devido ao maior tempo de ciclagem da MOS nos macroagregados, permitindo que as reações de complexação entre estes ocorram mais efetivamente (SIX et al., 1998). Isto foi evidenciado pelo maior estoque de carbono associado a minerais (CAM) que teve em média 6,7 Mg ha^{-1} a mais no SN em relação aos demais sistemas, na camada de 0-0,025 m.

Em geral, a proporção de C lábil em relação ao estoque de COT (CFG/COT) nas camadas de 0-0,025 e 0,025-0,05 m aumentou com a diminuição do preparo do solo (APC< ST< APD). Nas camadas mais profundas, as proporções de CFG foram menores chegando a representar apenas 15% do COT, no sistema com maior revolvimento do solo (APC).

Em função da distribuição do carbono nas frações físicas da MOS, sendo a fração grosseira (CFG) considerada o compartimento da fração lábil e a fração associada aos minerais (CAM) a fração não lábil, calculou-se os índices de estoque de carbono (IEC) e manejo de carbono (IMC) para cada sistema considerando a camada de 0-0,20 m (Tabela 4). O IMC é um indicador de qualidade do manejo do solo e permite avaliar o processo de ganho ou perda de

qualidade do solo, ou seja, quanto maior o IMC, maior a sua qualidade e vice versa.

Tabela 4. Índice de estoque de carbono (IEC), labilidade do Carbono (L), índice de labilidade (IL) e índice de manejo do carbono (IMC) em um Planossolo submetido a diferentes sistemas de manejo no cultivo do arroz irrigado. O solo natural (SN) foi considerado como referência para cálculo do (IMC)

Sistema de cultivo	IEC [1]	L [2]	IL [3]	IMC [4]
ST	0,66	0,32	0,61	40,83
APC	0,71	0,27	0,53	37,30
APD	0,90	0,60	1,17	105,75
SN	1,00	0,52	1,00	100,00

ST = Sistema tradicional de cultivo: um ano arroz (preparo convencional) seguido de dois anos com pousio; APC = Sistema de cultivo contínuo de arroz (preparo convencional); APD = Sucessão de azevém x arroz sob plantio direto; SN = Solo mantido em condições naturais, sem cultivo.
[1] IEC = C total do tratamento / C total do solo natural;
[2] L = C lábil / C não lábil;
[3] IL = L tratamento / L solo natural;
[4] IMC= IEC x IL x 100.

O sistema APD apresentou os maiores índices dos solos sob cultivo e o fato de possuir um IMC maior do que a referência (SN) mostra a capacidade desse sistema em melhorar a qualidade do solo e promover a sustentabilidade do agroecossistema. Por outro lado, os IMC_s dos sistemas ST e APC, onde há revolvimento do solo, foram menores do que o solo natural evidenciando uma redução na qualidade do solo. Diekow et al. (2005) avaliaram um Argissolo submetido a diferentes sistemas de cultura e adubação nitrogenada sob plantio direto, tendo como referência o campo nativo e observaram que no sistema com maior aporte de resíduos o IMC foi maior (256), enquanto o IMC no solo descoberto foi mais baixo (aproximadamente 56).

Como os valores de IMC dos sistemas com preparo convencional foram muito semelhantes, o fato de o sistema ST ficar dois anos em pousio, onde o alagamento também é suspenso, não é suficiente para minimizar a degradação provocada pelo revolvimento e manejo intensivo do solo.

CONCLUSÕES

No Planossolo Háplico, o sistema de cultivo do arroz irrigado em plantio direto sobre a palha do azevém preserva os teores e os estoques de COT do solo e da fração grosseira. Os sistemas com preparo convencional provocam perdas acentuadas no conteúdo de COT e da fração grosseira nas camadas de 0-0,025 e 0,025-0,05 m.

Nas duas camadas superficiais, nos sistemas SN e APD, cada fração granulométrica representa aproximadamente metade do COT, evidenciando a alta labilidade da MO decorrente da baixa taxa de decomposição dos resíduos, no ambiente anaeróbio. Nos sistemas com preparo convencional, em todas as camadas, predomina a fração associada aos minerais (CAM > 68%).

O Índice de Manejo de Carbono mostrou que o plantio direto no cultivo do arroz irrigado preserva a qualidade no solo em relação aos sistemas com preparo convencional.

4. ESTUDO 2- Efeito de sistemas de manejo do arroz irrigado sobre a matéria orgânica do solo e suas frações densimétricas em um Planossolo Háplico

INTRODUÇÃO

No Rio Grande do Sul, os solos de várzea representam cerca de 20% da área total, onde destes, aproximadamente 35% são Planossolos, ocupando uma área de mais de 2,5 milhões de hectares (PINTO et al., 2004). Estes solos apresentam uma característica bastante peculiar, o hidromorfismo, que é motivada pelo relevo predominantemente plano, associado a presença de um horizonte B de textura argilosa que impermeabiliza o solo, impedindo a infiltração da água.

Nestas áreas há um predomínio do cultivo do arroz irrigado onde o preparo do solo, o método de semeadura e o manejo da água definem os sistemas de manejo adotado, com maior ou menor mobilização. Estes solos são submetidos a regimes de alagamento e drenagem, o que altera periodicamente o ambiente em função das mudanças na microbiota e nos processos químicos que se alternam entre uma condição aeróbia e anaeróbia.

Muitos fatores podem alterar a dinâmica da matéria orgânica (MO), principalmente quando se faz a conversão de sistemas naturais para a agricultura, alterando as taxas de adição e degradação da MO. No entanto, existem mecanismos químicos e físicos que podem proteger a MO da ação dos microrganismos decompositores, determinando que moléculas de mesma composição e complexidade sejam diferentemente suscetíveis à decomposição. Estes mecanismos são: recalcitrância, interação química ou coloidal e inacessibilidade ou proteção física e são utilizados para classificar diferentes frações da MO do solo (ROSCOE et al., 2006).

A matéria orgânica do solo (MOS) é considerada um importante indicador da qualidade do solo e é bastante sensível a estas alterações. Na maioria dos

solos os sistemas conservacionistas de manejo favorecem o aumento no estoque de C no solo e nos solos de várzea não é diferente, no entanto, pouco se sabe sobre a intensidade com que os diferentes sistemas influenciam na dinâmica da MOS, principalmente nos seus mecanismos de proteção.

As frações lábeis da MOS tem grande influência na atividade biológica e na química de solos alagados, e sua dinâmica em solos agrícolas tem impacto sobre as emissões de gases de efeito estufa (GAUNT et al., 1997; NASCIMENTO et al., 2009).

Identificar os mecanismos de estabilização da MOS que atuam com maior eficiência nestes solos, é essencial para avaliar o potencial de degradação de cada sistemas de manejo adotado. A estabilização da MO, seja pela menor acessibilidade dos microrganismos, proteção física, ou pela formação de complexos estáveis entre a fração orgânica e mineral, proteção química, é fundamental para a preservação dos estoques de C orgânico do solo (ROSCOE et al., 2006), assim como tem grande importância para a agregação do solo, seguindo a teoria da agregação proposta por Tisdall e Oades (1982), onde a MO é o principal agente ligante para a formação dos agregados.

Nos solos de várzea cultivados com arroz irrigado, além dos sistemas de preparo, o alagamento desestabiliza a estrutura do solo, promovendo uma agregação transitória entre o período drenado e o alagado. Desta forma, a proteção física da MOS seria um mecanismo pouco eficiente na sua estabilização e a fração leve oclusa pouco contribuiria para o acúmulo de C em solos de várzea cultivados (NASCIMENTO et al., 2009).

Neste contexto, o presente estudo tem como objetivo avaliar o efeito dos sistemas de manejo do arroz irrigado sobre a matéria orgânica e suas frações densimétricas, bem como identificar a magnitude dos mecanismos de proteção da MO em um Planossolo cultivado há 21 anos no Sul do RS.

MATERIAL E MÉTODOS

As amostras de solo foram coletadas em um experimento implantado em 1985 em um Planossolo Háplico eutrófico solódico localizado na Estação experimental de Terras Baixas da Embrapa Clima Temperado, no município do

Capão do Leão – RS. Os sistemas de manejo estão dispostos em parcelas de 600 m^2, em blocos ao acaso (n=4) e para este estudo foram avaliados: ST – sistema tradicional de cultivo: um ano arroz (preparo convencional) seguido de dois anos de pousio; APC – cultivo contínuo de arroz (preparo convencional); APD – sucessão azevém x arroz sob plantio direto e SN – solo mantido com vegetação natural (pastagem nativa).

As amostras foram coletadas em trincheiras, nas camadas de 0-0,025; 0,025-0,05; 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, tomando-se o cuidado de preservar a estrutura do solo, que foi seco ao ar e posteriormente, os agregados naturais foram passados em peneira 9,51 mm e submetidos ao fracionamento densimétrico e análise de estabilidade de agregados.

O método de fracionamento utilizado foi descrito em Conceição et al. (2008) e constitui de agitação manual leve do tubo contendo 10 g de solo e 80 mL de solução de politungstato de sódio (PTS) com densidade de 2,00 g cm^{-3}. Após a centrifugação (2000 g por uma hora) o sobrenadante contendo a fração leve livre (FLL), foi filtrado (filtro de fibra de vidro) previamente pesado. A solução de PTS foi recolocada sobre o material que restou no tubo que foi submetido à dispersão por sonicação com energia de 250 J mL^{-1}, a qual foi previamente determinada para obtenção da máxima dispersão dos agregados do solo. Após a dispersão o material foi centrifugado e filtrado novamente para obtenção da fração leve oclusa (FLO). A fração restante no tubo de centrífuga correspondeu à fração pesada (FP).

As FLL e FLO foram secas em estufa a 50° C, moídas e analisadas quanto ao teor de carbono (analisado por combustão a seco em analisador Leco) o que também foi feito nas amostras de solo inteiro, para determinar o carbono orgânico total (COT). O carbono da FP foi obtido por diferença entre o COT e nas frações leves [(COT-(FLL+FLO)].

Os estoques de COT e nas frações da MO foram calculados em massa equivalente de solo segundo Sisti et al. (2004), utilizando a densidade do solo em cada camada e tratamento (Tabela 1, Capítulo 1), tendo o solo sob vegetação natural (SN) como referência.

A magnitude dos mecanismos de proteção da MOS foi estimada pela participação relativa do estoque de C em cada fração em relação ao estoque de COT [(estoque fração/estoque COT) x100].

A estabilidade de agregados em água foi determinada seguindo o princípio da método descrito por Kemper & Rosenau (1986) modificada por Palmeira et al. (1999), que utiliza o aparelho de oscilação vertical de Yoder (1936) e será representada pelo diâmetro médio ponderado (DMP) calculado pela seguinte expressão:

$$DMP = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n} DMi.(MAGRi - mi)}{\sum_{i=1}^{n} MAGRi - mi} \right]$$

Onde: DMP = diâmetro médio ponderado (mm);

DMi = diâmetro médio da classe i.

Os resultados dos parâmetros avaliados foram submetidos à análise de variância e aplicado o teste de Duncan a 5 % de probabilidade de erro, para avaliação das diferenças entre os resultados obtidos. Também foi realizada análise de correlação entre os teores de COT e nas frações da MO, com o DMP para observar se há relação entre os mecanismos de estabilidade da MO e a agregação nos solos de várzea.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os estoques de COT nas camadas superficiais (0-0,025 e 0,025-0,05 m) foram influenciados pelo sistema de cultivo (Tabela 1). No sistema APD, esses valores foram superiores aos obtidos nos sistemas sob preparo convencional (ST e APC). Para as camadas de solo mais profundas (0,05-0,10 e 0,10-0,20 m) não houve diferença significativa entre os sistemas de cultivo.

Somando os estoques de COT nas diferentes profundidades em cada tratamento (tabela 1), tem-se o estoque de COT na camada de 0-0,20 m, que no sistema SN foi de 47,8 Mg ha^{-1}. Zschornack (2007), avaliando solos de várzea sob campo nativo, que obteve valores de 47,34 e 64,34 Mg ha^{-1} em dois Planossolos distintos nesta mesma camada de solo. Em Argissolo, Conceição (2006) obteve

um estoque de 39,32 Mg ha^{-1} na mesma camada em campo nativo. Em três Latossolos distintos, Boeni (2007) verificou, em um Latossolo sob vegetação nativa, estoques de 44,56; 66,34 e 53,12 Mg ha^{-1}.

Tabela 1. Estoque de carbono orgânico total (COT) e nas frações leve livre (FLL), leve oclusa (FLO) e na fração pesada (FP) da matéria orgânica nas camadas amostradas dos diferentes sistemas de cultivo de um Planossolo Háplico. Capão do Leão – RS. Média de quatro repetições

Sistema de cultivo	COT*	FLL*	FLO*	FP*
	---------- Mg ha^{-1} ----------			
		0 - 0,025 m		
ST	5,58 c	0,52 c	1,09 a	3,97 b
APC	5,80 c	0,45 c	1,15 a	4,20 b
APD	11,11 b	3,25 a	2,01 a	5,85 b
SN	17,73 a	1,59 b	1,14 a	15,00 a
		0,025 - 0,05 m		
ST	4,71 b	0,35 b	0,86 ab	3,50 b
APC	4,37 b	0,30 b	0,69 b	3,38 b
APD	8,69 a	0,83 a	1,09 ab	6,77 a
SN	7,57 a	0,84 a	1,16 a	5,57 a
		0,05 - 0,10 m		
ST	8,48 a	0,61 a	1,42 a	6,45 a
APC	8,34 a	0,80 a	1,58 a	5,96 a
APD	9,95 a	0,92 a	1,59 a	7,44 a
SN	9,58 a	0,53 a	1,52 a	7,53 a
		0,10 - 0,20 m		
ST	13,02 a	0,58 ab	2,68 a	9,56 a
APC	15,25 a	0,91 a	2,61 a	11,73 a
APD	13,52 a	0,39 b	2,16 a	10,97 a
SN	12,95 a	0,68 ab	2,48 a	9,79 a
		0 - 0,20 m **		
ST	31,79 b	2,06 c	6,06 a	23,68 c
APC	33,75 b	2,46 c	6,03 a	25,27 bc
APD	43,27 a	5,39 a	6,85 a	31,03 b
SN	47,83 a	3,64 b	6,30 a	37,89 a

Médias seguidas da mesma letra na coluna, em cada camada, não diferem estatisticamente pelo teste de Duncan, ao nível de 5%. ST = Sistema tradicional de cultivo: um ano arroz (preparo convencional) seguido de dois anos com pousio; APC = Sistema de cultivo contínuo de arroz (preparo convencional); APD = Sucessão de azevém x arroz sob plantio direto; SN = Solo mantido em condições naturais, sem cultivo.

* Valores corrigidos pela massa equivalente de solo em cada camada (SISTI et al., 2004).

** Valores obtidos pela soma das quatro camadas amostradas

No sistema de referência (SN) e no APD o estoque de COT nas camadas de 0-0,025 e 0,025-0,05 m representou, em média, 50% do carbono estocado na

camada de 0-0,20 m enquanto nos sistemas com preparo convencional do solo (ST e APC), o estoque de COT foi de 32% em relação ao total estocado na camada arável. A manutenção da cobertura vegetal e o não revolvimento do solo são responsáveis por um maior incremento de COT no solo e por menores taxas de decomposição, favorecendo assim, a manutenção/recuperação dos teores de MO.

Na camada superficial (0-0,025 m) o estoque de C na FLL foi superior no sistema APD (3,25 Mg ha^{-1}), seguido do SN (1,59 Mg ha^{-1}), já os sistemas com preparo convencional, ST e APC, apresentaram estoques de C nesta fração bastante inferiores (Tabela 1). Este resultado evidencia que em solos de várzea cultivados com arroz irrigado, apesar do alagamento reduzir a velocidade de decomposição dos resíduos orgânicos, o revolvimento do solo durante o preparo promove perdas consideráveis de carbono na camada superficial, principalmente da fração mais lábil (FLL). Por outro lado, o acúmulo na superfície, da palha do azevém cultivado no inverno no sistema APD contribuiu para o aumento no estoque de C da FLL. O único mecanismo de estabilização que atua na FLL é a recalcitrância, e devido a sua relativa facilidade de decomposição, esta fração está muito ligada, em termos de dinâmica, ao suprimento de resíduos orgânicos do sistema (CHRISTENSEN, 2000).

Não houve diferença significativa, na camada superficial, entre os sistemas de manejo para a FLO, já o estoque de C na FP foi superior no SN, onde a estabilidade dos sistemas sem utilização agrícola contribui para a manutenção da MO nesta fração. A manutenção de matéria orgânica protegida nos agregados do solo não cultivado aumenta o período de interação do material particulado com os argilominerais devido ao maior tempo de ciclagem da MOS nos macroagregados, permitindo que as reações de complexação entre estes ocorram mais efetivamente (SIX et al., 1998).

Na camada de 0,025 – 0,05 m, os estoques das FLL e FP, foram superiores nos sistemas SN e APD. Na fração FLO, essa tendência também foi observada apesar de ter havido diferença significativa apenas entre os sistemas SN e APC. Em geral, os estoques da FLO foram superiores aos da FLL, o que pode ser conseqüência da maior eficiência do mecanismo de oclusão para a estabilização da MO nesta fração.

Na camada de 0,05-0,10 m não houve influência dos sistemas de manejo sobre os estoques de C nas frações densimétricas da MO. Na camada de 0,10-0,20 m pode-se observar que os estoques da FLL foi maior no APC em relação ao APD, os quais não diferem dos demais sistemas. O revolvimento do solo por ocasião do preparo convencional permite a incorporação do resíduo que está na superfície assim, favorecendo o incremento desta fração em profundidade.

Independente da profundidade, com exceção do APD e SN na camada superficial, os estoques de C na FLL, FLO e FP, obedeceram a seguinte ordem: FP > FLO > FLL. Esta seqüência se deve ao diferente grau de estabilidade da MO em cada fração. Na FLL apenas a recalcitrância química é responsável pela estabilidade da MO, enquanto na FLO a proteção física, ou oclusão da MO no interior dos agregados do solo também contribui para a manutenção da MOS. Já na fração pesada, os três mecanismos de estabilização atuam conjuntamente: recalcitrância, oclusão e interação da MO com os minerais do solo (NASCIMENTO et al., 2009). Por esse motivo a FP, seguida da FLO, possuem um tempo maior de ciclagem do que a FLL.

Resultados semelhantes foram observados por Conceição et al. (2008) avaliando um Argissolo Vermelho e um Latossolo Vermelho, submetidos ao sistema convencional de cultivo e plantio direto.

O fato de os sistemas APD e SN apresentarem maior estoque da FLL em relação a FLO é explicado pelo grande aporte de resíduo na superfície do solo, associado a um ambiente onde a alta umidade do solo de várzea e o não revolvimento contribuem para uma taxa de decomposição mais lenta.

A magnitude dos mecanismos de estabilização da MOS pode ser melhor avaliada analisando as proporções de cada fração em relação ao COT (Figura 1).

A FLL representou a menor proporção do COT entre os sistemas (9% em média), em todas as profundidades e tratamentos, exceto no APD da camada superficial, indicando que a recalcitrância molecular é o mecanismo de menor importância na estabilização da MOS. A FLO, apesar de ter sido mais expressiva do que a FLL na maioria dos sistemas e profundidades representou, em média 17% do COT, mostrando uma baixa eficiência do mecanismo de oclusão neste Planossolo. Já a FP representou, na média dos tratamentos, 74% do estoque de

COT, o que reforça a grande importância da interação organomineral para a manutenção dos estoques de carbono do mesmo.

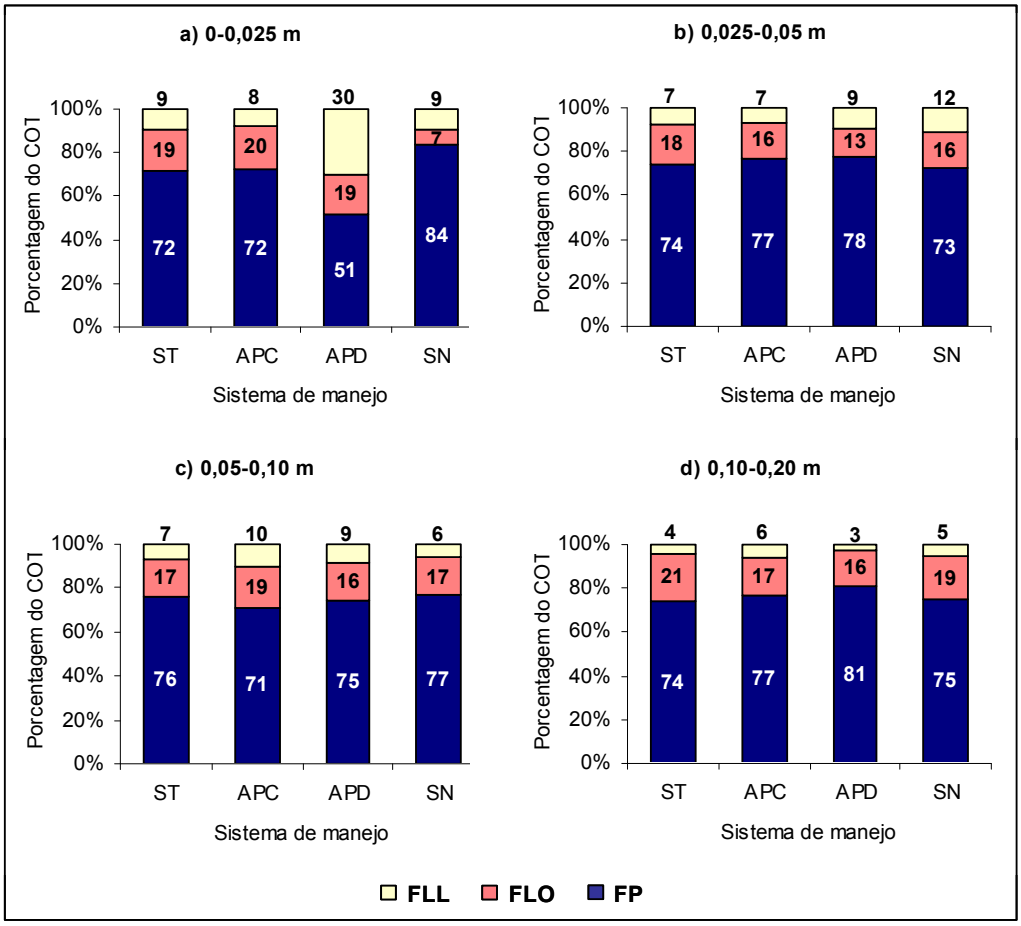


Figura 1. Proporção do carbono orgânico total (COT) nas frações leve livre (FLL), leve oclusa (FLO) e pesada (FP) da matéria orgânica de um Planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo. ST = Sistema tradicional de cultivo: um ano arroz (preparo convencional) seguido de dois anos com pousio; APC = Sistema de cultivo contínuo de arroz (preparo convencional); APD = Sucessão de azevém x arroz sob plantio direto; SN = Solo mantido em condições naturais, sem cultivo.

Esses resultados diferem de Nascimento et al. (2009), que encontraram proporções similares entre FLL e FLO (17% e 18%) em um Gleissolo com cultivo de arroz irrigado, no município de Cachoeirinha-RS, os quais concluíram que a proteção física foi pouco expressiva para a manutenção da MOS. Já em Latossolos, Boeni (2007) observou proporções significativamente maiores da FLO em relação a FLL (em média 19,5% e 5,4%, respectivamente).

Os teores de COT e das frações físicas da MOS não se correlacionaram com o diâmetro médio ponderado do solo (DMP) nos sistemas com preparo convencional (ST e APC) (Figura 2), evidenciando que a MO não está contribuindo para a estabilização dos agregados do solo e/ou a agregação do solo nesses sistemas. O intenso revolvimento do solo provoca a quebra dos agregados expondo a matéria orgânica o que diminui a proteção física e o tempo de contato da fração orgânica com a mineral para que haja interação entre elas.

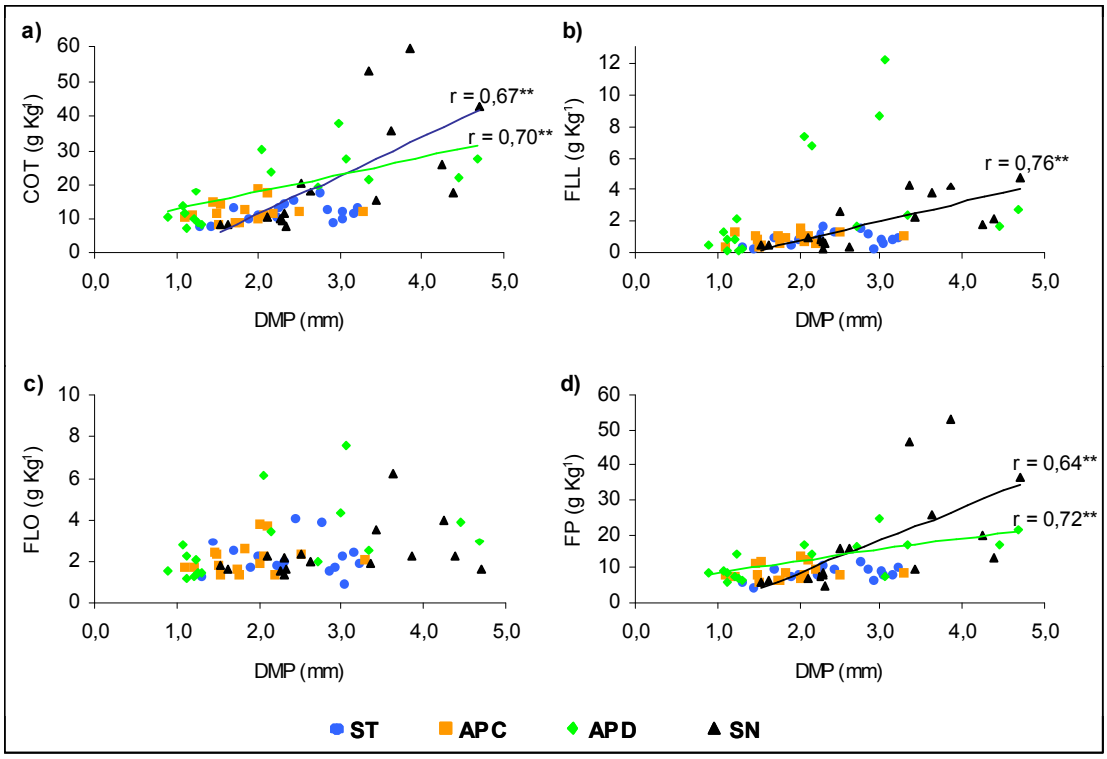


Figura 2. Correlação entre o diâmetro médio ponderado (DMP) dos agregados de um Planossolo sob diferentes sistemas de manejo e o teor de carbono orgânico total (COT) e das frações leve livre (FLL), leve oclusa (FLO) e pesada (FP) da matéria orgânica do solo. ** Significativo < 1% de probabilidade. ST = Sistema tradicional de cultivo: um ano arroz (preparo convencional) seguido de dois anos com pousio; APC = Sistema de cultivo contínuo de arroz (preparo convencional); APD = Sucessão de azevém x arroz sob plantio direto; SN = Solo mantido em condições naturais, sem cultivo.

Por outro lado, o sistema SN, onde o solo não é cultivado, foi observada correlação entre o DMP e o COT, FLL e FP. Este resultado, comparado ao encontrado nos sistemas com revolvimento do solo, mostra a fragilidade deste solo quanto a sua eficiência na proteção da MO, onde a utilização intensiva no cultivo

agrícola, além de causar perdas significativas nos estoques de carbono no solo reduz também a sua capacidade de proteger e estabilizar a MOS.

No APD foi encontrada correlação entre o COT e FP com o DMP, essa correlação foi de r=0,70 e r=0,72, respectivamente, indicando que aproximadamente 70% da estabilidade dos agregados se deve a MO total no primeiro caso e da FP no segundo. Martins et al. (2009), também encontraram correlações positivas entre o diâmetro médio ponderado de agregados e teores de COT em um Latossolo sob plantio direto.

A FLO não apresentou correlação com o DMP em nenhum dos sistemas de manejo o que pode confirmar a hipótese de que a oclusão é um mecanismo de estabilização da MO pouco eficiente em solos de várzea onde a umidade excessiva e o alagamento, por ocasião do cultivo do arroz, proporciona uma agregação transitória entre cultivos.

CONCLUSÕES

O sistema de manejo, sucessão arroz irrigado x azevém em plantio direto, após 21 anos, preserva os estoques de COT e da fração leve livre, nas camadas superficiais do solo, em comparação aos sistemas com arroz irrigado com preparo convencional.

A fração leve oclusa não se mostrou sensível aos efeitos dos diferentes sistemas de manejo, evidenciando para o solo de várzea uma baixa eficiência da proteção física da MO por oclusão em agregados, podendo estar relacionado à condição de má drenagem no processo de agregação.

A estabilidade da matéria orgânica neste Planossolo, tanto entre os sistemas de cultivo como em profundidade, deve-se principalmente à fração pesada, onde atuam simultaneamente os mecanismos de proteção: recalcitrância, oclusão e interação com minerais.

5. ESTUDO 3- Caracterização química da matéria orgânica de um Planossolo Háplico submetido a diferentes sistemas de manejo no cultivo de arroz irrigado.

INTRODUÇÃO

A matéria orgânica do solo (MOS) tem fundamental importância na manutenção ou recuperação da quantidade e qualidade do solo que é perdida ao longo do tempo devido, principalmente, à utilização de práticas inadequadas de manejo e uso do solo. O entendimento sobre sua dinâmica, estrutura e função nos diferentes tipos de solo e sistemas de manejo tem sido objetivo de vários trabalhos (GOLCHIN et al., 1994; PILLON, 2000; DIEKOW, 2003; CONCEIÇÃO, 2006; OLENDZKI, 2006; entre outros), porém ainda são escassos os estudos em solos de várzea. Sabe-se que o aporte de resíduos em solos de várzea contribui para o acúmulo de MOS de maneira similar aos solos oxidados, porém, o efeito do manejo sobre a qualidade da MO em solo de várzea é pouco conhecido.

Os solos de várzea diferem dos solos de terras altas por estarem submetidos à condição de má drenagem e/ou alagamento durante o cultivo do arroz. Este fato proporciona uma dinâmica diferenciada para as transformações da MOS e nestas condições, onde há redução das taxas de oxigênio no solo, decorrentes da baixa taxa de difusão do O_2 na água, a decomposição da MO passa a ocorrer através de processos anaeróbios, respiração anaeróbia e fermentação (TAN, 2003). Entretanto, ao final do ciclo do arroz, as lavouras são drenadas, prevalecendo o processo aeróbio, forçando o sistema a encontrar um novo estágio de equilíbrio.

O tipo de uso e manejo do solo também tem influência direta sobre as transformações da MOS, principalmente na velocidade de decomposição dos resíduos, interferindo no tempo de permanência de cada fração da MO no solo. A MOS pode ser dividida em compartimentos físicos, onde o seu tamanho e/ou

localização determinam maior ou menor resistência à decomposição. Quanto à localização ela pode ser: livre, fração leve livre (FLL); pode estar protegida dentro dos agregados do solo, mas fracamente associada aos minerais, fração leve oclusa (FLO); ou associada fortemente às partículas minerais do solo, formando complexos organominerais, fração pesada (FP). Considerando o grau de associação da MOS com os minerais, pode-se dizer que a taxa de decomposição é maior na ordem FLL > FLO > FP (GOLCHIN et al., 1997; ROSCOE et al., 2006).

A diferença no tamanho de partículas também é utilizada para separação de frações orgânicas. A fração tamanho areia (> 0,053 mm) é chamada de matéria orgânica particulada, ou fração grosseira (FG), é composta por restos vegetais em estágio inicial de decomposição e apresenta pouca ou nenhuma associação organomineral. A fração tamanho silte/argila (< 0,053 mm) é composta por um material num estágio mais avançado de decomposição e forma facilmente associações com os minerais do solo (CONCEIÇÃO, 2006; GREGORICH et al., 2006).

As possíveis variações que podem ser observadas na composição e na qualidade do C associado a cada fração da MOS são resultantes das diferenças na natureza e na magnitude dos processos de decomposição em cada solo, sendo influenciados pelos sistemas de manejo (BOENI, 2007).

Diversas técnicas espectroscópicas são utilizadas para a caracterização da MOS e de suas frações, e têm demonstrado grande potencial para auxiliar no entendimento dos processos relacionados com a sua dinâmica. Informações sobre as características estruturais, grau de humificação, condensação e aromaticidade podem ser obtidas por espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR), Ressonância Magnética Nuclear (RMN), Ressonância Paramagnética Eletrônica (RPE), Fluorescência Induzida por Laser (FIL), ou pela combinação desses métodos (ABREU JR. et al., 2009). Conhecer a composição da MOS e a estrutura dos seus componentes é de fundamental importância para compreender o comportamento da MO após a mudança na forma de uso e manejo do solo. Em geral, as variações químicas decorrentes do efeito dos sistemas de manejo ocorrem primeiro na fração mais lábil da MOS, como a FLL, mas ainda são

poucas as informações sobre esses efeitos na composição química da MO nas frações densimétricas do solo (GOLCHIN et al., 1995).

Com a intenção de complementar os estudos 1 e 2, o objetivo deste trabalho foi caracterizar qualitativamente a MOS de um Planossolo Háplico cultivado com arroz irrigado em plantio direto e preparo convencional na camada superficial.

MATERIAL E MÉTODOS

Para este estudo foram coletadas amostras de solo na camada de 0-0,025 m em um experimento de campo, de longa duração (21 anos), localizado na Estação Experimental de Terras Baixas – CPACT - EMBRAPA, localizado no município do Capão do Leão, Rio Grande do Sul (31º 52' 00" S e 52º 21' 24" W). O solo é um Planossolo Háplico eutrófico solódico submetido a diferentes sistemas de manejo no cultivo do arroz irrigado. Foram avaliados os sistemas: APC - Sistema de cultivo contínuo de arroz (preparo convencional), APD - Sucessão de azevém x arroz sob plantio direto e SN - Solo mantido com vegetação natural (predomínio de gramíneas). O experimento está disposto em blocos ao acaso com quatro repetições.

As frações físicas da MOS analisadas foram obtidas através dos fracionamentos granulométrico, segundo Cambardella e Elliott (1992) (Apêndice 1), onde foi obtida a fração grosseira (FG); e o fracionamento densimétrico, conforme procedimento descrito por Golchin et al. (1994) modificado por Conceição (2006) (Apêndice 2), para obtenção das frações leve livre (FLL) e leve oclusa (FLO).

Para as análises espectroscópicas, foi feita a desmineralização e concentração da MO das amostras de solo e das frações orgânicas tratando com solução de HF 10%, com o objetivo principal de remover possíveis componentes inorgânicos que pudessem interferir na caracterização da MOS. As amostras foram agitadas com 30 ml (razão 1:10) da solução por duas horas e centrifugadas (2500rpm, 20min) descartando o sobrenadante. O procedimento foi repetido até o resíduo apresentar coloração escura (oito vezes para o solo e FLO e quatro vezes para FLL e FG). A MO concentrada foi lavada com água destilada sete vezes,

ficando o pH do sobrenadante da última lavagem em torno de 5,0. As amostras tratadas foram secas em estufa a 50º C até peso constante, e moídas em gral de ágata para a realização das determinações espectroscópicas e quantificação do teor de carbono em analisador de combustão seca (Leco).

As amostras tratadas com HF foram analisadas por FTIR (Perkin Elmer – Spectrum 1000) em pastilhas de KBr (1 amostra:100 KBr; 32 scans, resolução de 4 cm^{-1}). A atribuição das bandas de absorção foi feita segundo Tan (2003) e Dick et al. (2008).

Os espectros de RMN ^{13}C CP/MAS no estado sólido das frações FLL e FLO foram obtidos em um espectrômetro Varian (Unity 400), pertencente à Embrapa Instrumentação Agropecuária, São Carlos – SP. Os espectros foram divididos em sete regiões de deslocamento químico, que correspondem a diferentes tipos de carbono: 0 – 45 ppm (alifáticos não substituídos), 45 – 60 ppm (metoxil e N-alifáticos), 60 – 110 ppm (O-alifáticos), 110 – 140 ppm (aromáticos), 140 – 160 ppm (fenólicos), 160 – 185 ppm (carboxílicos) e 185 – 230 ppm (carbonílicos). A quantificação de cada tipo de C foi realizada através da integração das áreas dos correspondentes picos no espectro e cálculo das intensidades de cada região em relação à área total do espectro. O índice de aromaticidade foi calculado a partir das áreas dos espectros (a), segundo Stevenson (1994):

a) $$\text{Aromaticidade (\%)} = \frac{\text{área dos sinais de C aromáticos 110-160 ppm}}{\text{área dos sinais de C alifáticos 0-160 ppm}} \times 100$$

A análise de fluorescência foi realizada em um sistema portátil de FIL, nas dependências da Embrapa Instrumentação Agropecuária em São Carlos – SP. Para a realização das medidas de FIL, as amostras de solo inteiro, FG, FLL e FLO foram colocadas em um porta-amostra com janela de quartzo. Foram realizadas três medidas por amostra, sendo obtido um total de três espectros de FIL / amostra. Estes dados foram utilizados para cálculo do índice de humificação H_{FIL}. O cálculo deste índice é a razão entre o valor da área (ACF) sob o espectro de emissão de fluorescência, compreendida entre 475 e 660 nm, e o valor da concentração de carbono orgânico total presente na amostra Milori et al. (2006).

Para este cálculo foi desconsiderada a fluorescência na região em torno de 676 nm correspondente à clorofila.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os espectros de FTIR das amostras de solo, FLL, FLO e FG foram semelhantes nos três sistemas avaliados, tendo apenas pequena diferença na intensidade dos picos (Figura 1).

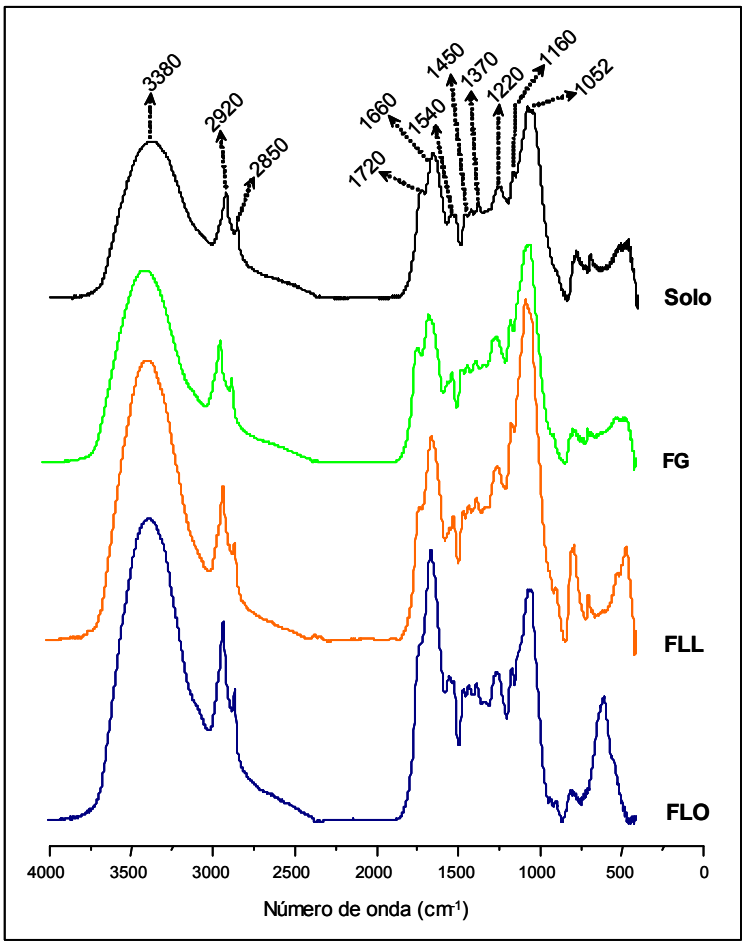


Figura 1. Espectros de FTIR das amostras de MOS e suas frações leve livre (FLL), leve oclusa (FLO) e fração grosseira (FG), na camada de 0-0,025 m, de um Planossolo háplico cultivado com arroz irrigado. Capão do Leão, RS.

Foram identificadas as seguintes bandas e respectivas atribuições: uma banda larga em 3380 cm^{-1} atribuída aos grupamentos OH e N-H inter e intra molecular; duas bandas em 2929 e 2850 cm^{-1} do estiramento C-H alifático; um pico em 1720 cm^{-1} referente ao estiramento C=O de COOH e cetonas; uma banda em 1660 cm^{-1} referente ao estiramento C=O de amida, quinona e/ou C=O de $–COO^{-}$; um pico em 1540 cm^{-1} devido à deformação N-H e estiramento C=N; uma banda fraca entre 1450 e 1370 cm^{-1} referente ao estiramento C-H alifático e de grupos metila; uma banda em 1220 cm^{-1} do estiramento C-O de estruturas tipo polissacarídeos; e um pico em 1052 cm^{-1} atribuído à ligação C-O de carboidratos.

Os espectros de RMN ^{13}C das amostras FLL e FLO, oriundas dos diferentes sistemas de manejo, na camada de 0-0,025 m, são apresentadas na Figura 2 e a distribuição relativa dos grupos funcionais podem ser observadas na Tabela 1. Não foi possível a realização da análise de RMN na FLL do tratamento APC por não ter quantidade suficiente de amostra.

Em todas as amostras, os principais sinais foram observados nos mesmos deslocamentos químicos. Em geral, houve predominância de grupos C-O-alquil/C-di-O-alquil e N-alquil/C-metoxil (49 - 62%), seguidos de grupos C-alquil (22 – 33%). As estruturas aromáticas (C-aromático + C-fenólicos) contribuíram com, aproximadamente, 10% da composição das amostras. A distribuição dos grupos de C indica que as FLL e FLO contêm os mesmos tipos de C, mas em proporções diferentes. Pillon (2000), Diekow et al. (2005) e Dick et al. (2008) também encontraram maior abundância das estruturas C-O-alquil/C-di-O-alquil avaliando o solo inteiro e/ou as mesmas frações da MO em Argissolos e a MO de um Gleissolo, respectivamente. Esta alta porcentagem de estruturas alifáticas é esperada por se tratar da camada superficial (0-0,025 m), onde se concentra a maior quantidade dos resíduos culturais.

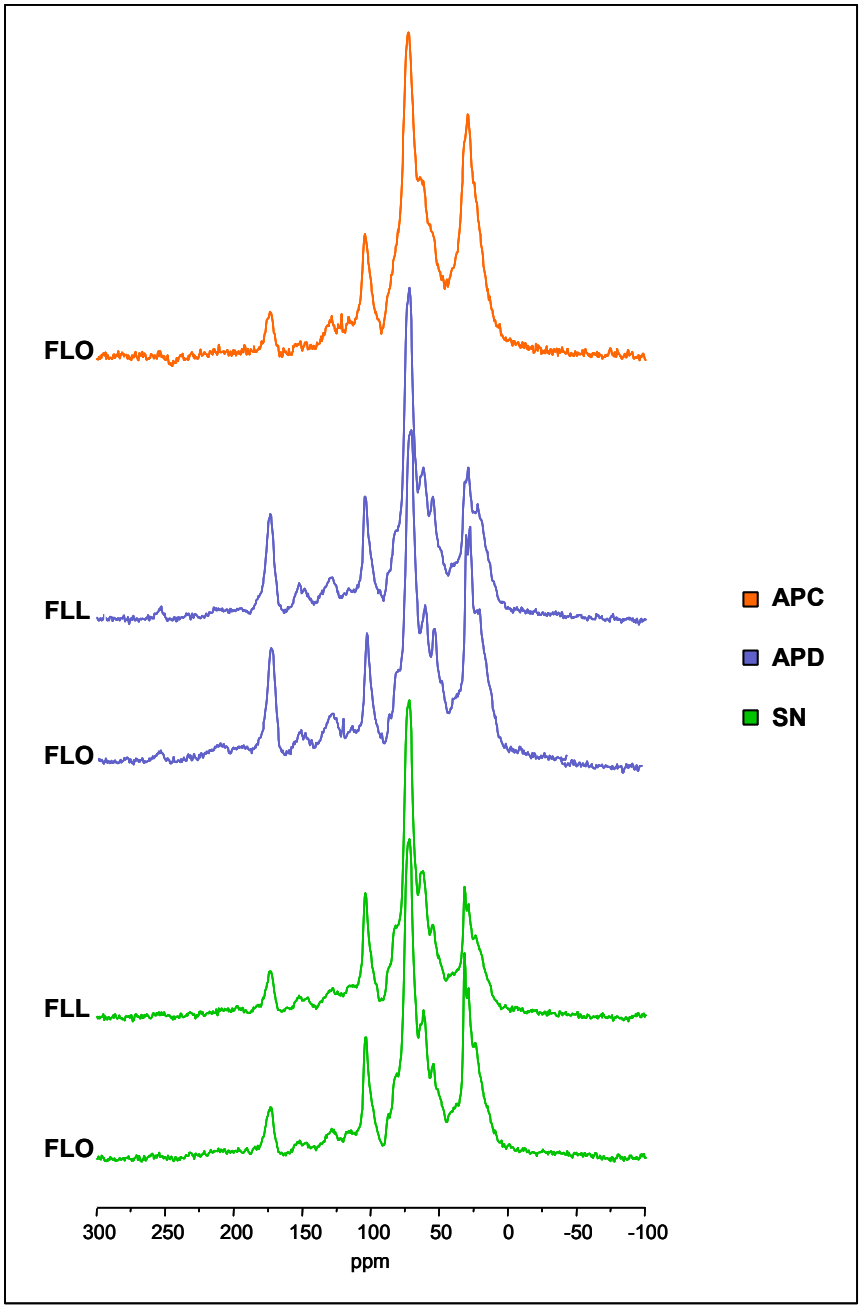


Figura 2. Espectroscopia de RMN ^{13}C das frações da matéria orgânica leve livre (FLL), leve oclusa (FLO), na camada de 0-0,025 m, de um Planossolo submetido a diferentes sistemas de manejo, Capão do Leão – RS. APC = Sistema de cultivo contínuo de arroz (preparo convencional); APD = Sucessão de azevém x arroz sob plantio direto; SN = Solo mantido em condições naturais, sem cultivo.

Tabela 1. Distribuição percentual dos grupos funcionais de C determinados por espectroscopia de ^{13}C RMN CP/MAS nas frações leve livre (FLL) e leve oclusa (FLO) da camada de 0-0,025m, de um Planossolo submetido a diferentes sistemas de manejo, Capão do Leão - RS.

	Distribuição de tipos de C/deslocamento químico (ppm)						
Amostra	C-alquil	N-alquil C-metoxil	C-O-alquil C-di-O-alquil	C-aromático	C-fenólico	C-carboxil	C- carbonil
	0-45	45-60	60-110	110-140	140-160	160-185	185-230
				FLL			
APC	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
APD	25	10	43	7	4	8	3
SN	22	10	52	7	3	4	2
				FLO			
APC	33	11	45	6	1	3	1
APD	29	10	39	7	3	8	4
SN	27	10	48	6	2	4	3

APC = Sistema de cultivo contínuo de arroz (preparo convencional); APD = Sucessão de azevém x arroz sob plantio direto; SN = Solo mantido em condições naturais, sem cultivo.
nd= não determinado

A composição química da FLL foi similar entre os dois sistemas (APD e SN) e constituiu, em média, 57% de C-O-alquil/N-alquil/ C-metoxil, seguido por 23,5% de C-alquil, 10% de aromáticos e em menor quantidade de C-carboxílicos. Boeni (2007), avaliando a FLL em Latossolos sob plantio direto e pastagem, observou menores quantidades de C-alquil (≈ 15%) e proporções maiores de aromáticos (≈ 20%). A maior proporção de C-O-alquil, observada neste estudo reflete uma maior contribuição de polissacarídeos no material orgânico adicionado ao solo (GOLCHIN et al., 1994).

Na região entre 25-35 ppm, o sinal de C-alquil é de metileno, derivado de longas cadeias alifáticas. Já na região do C-O-alquil (60-110 ppm), podem-se observar dois picos distintos, onde o pico em 72-75 ppm é atribuído à celulose e em 105 ppm, são derivados de hemicelulose e outros carboidratos. A intensidade do sinal entre 160-230 ppm corresponde, em parte, a grupos carboxílicos de ácidos orgânicos (KÖGEL-KNABNER 2002 citado por BOENI, 2007).

Em comparação aos resultados de Boeni (2007) em Latossolos, para as FLL e FLO, as maiores diferenças foram observadas nas proporções de C-carboxil+C-carbonil, que no solo de várzea foi de 11%, enquanto no Latossolo ficou entre 6-7%, o que pode ser explicado por uma provável maior concentração de ácidos orgânicos produzidos no ambiente alagado. Por outro lado, as outras estruturas mais recalcitrantes (C-aromáticos e C-alquil) foram inferiores às encontradas por Boeni

(2007). Provavelmente a menor taxa de decomposição no solo de várzea, em relação ao Latossolo, contribui para um aumento na proporção de estruturas mais lábeis, como C-O-alquil e redução de compostos mais recalcitrantes.

Na FLO observa-se uma leve redução do C-O-alquil (± 4%) e pequeno aumento de C-alquil (±5%) em relação aos mesmos sistemas na FLL (Tabela 1). Essas variações indicam um aumento no grau de decomposição da FLO (BALDOCK et al., 1992). Outros autores também encontraram variações semelhantes entre as FLL e FLO (GOLCHIN et al., 1994; PILLON, 2000; BOENI, 2007).

Na FLO, as diferenças nas proporções dos grupos funcionais entre os sistemas de manejo ocorreram da seguinte forma: o sistema APC apresentou maior proporção de C-alquil em relação aos demais sistemas; já o APD teve a maior proporção de C-carboxil e a menor proporção de C-O-alquil/C-di-O-alquil (Tabela 1).

As mudanças nas proporções C-alquil (mais recalcitrante) e C-O-alquil (material mais lábil) foram as alterações mais evidentes entre as frações orgânicas. A razão entre as proporções de C-O-alquil/ C-alquil pode ser um indicativo do grau de decomposição dos compostos orgânicos e essa razão decresceu na ordem FLL>FLO (em média 2,47 e 1,85, respectivamente), evidenciando o maior grau de humificação da fração oclusa (Tabela 2).

Tabela 2. Índice de aromaticidade e Razão C-O-alquil/C-alquil dos grupos funcionais de C determinados por espectroscopia de ^{13}C RMN CP/MAS nas frações leve livre (FLL) e leve oclusa (FLO) da camada de 0-0,025 m, de um Planossolo submetido a diferentes sistemas de manejo, Capão do Leão - RS.

Amostra	Fração Leve Livre		Fração Leve Oclusa	
	Aromaticidade	C-O-alquil / C-alquil	Aromaticidade	C-O-alquil / C-alquil
	----- % ------		----- % ------	
APC	nd	nd	7,29	1,70
APD	12,36	2,12	11,36	1,69
SN	10,64	2,82	8,60	2,15

APC = Sistema de cultivo contínuo de arroz (preparo convencional); APD = Sucessão de azevém x arroz sob plantio direto; SN = Solo mantido em condições naturais, sem cultivo.
nd= não determinado

Os maiores valores para a razão C-O-alquil/C-alquil foram observados para o sistema SN, tanto na fração LL como na LO, indicando que os sistemas

submetidos ao cultivo agrícola, independente da forma de preparo, proporcionaram uma maior decomposição dos resíduos orgânicos.

Na Figura 3, pode-se observar os espectros de Fluorescência (FIL) do solo e das frações da MO. As áreas sob as curvas, normalizadas pelo teor de C, fornecem um índice que pode ser diretamente relacionado com o grau de humificação da MO (Tabela 3).

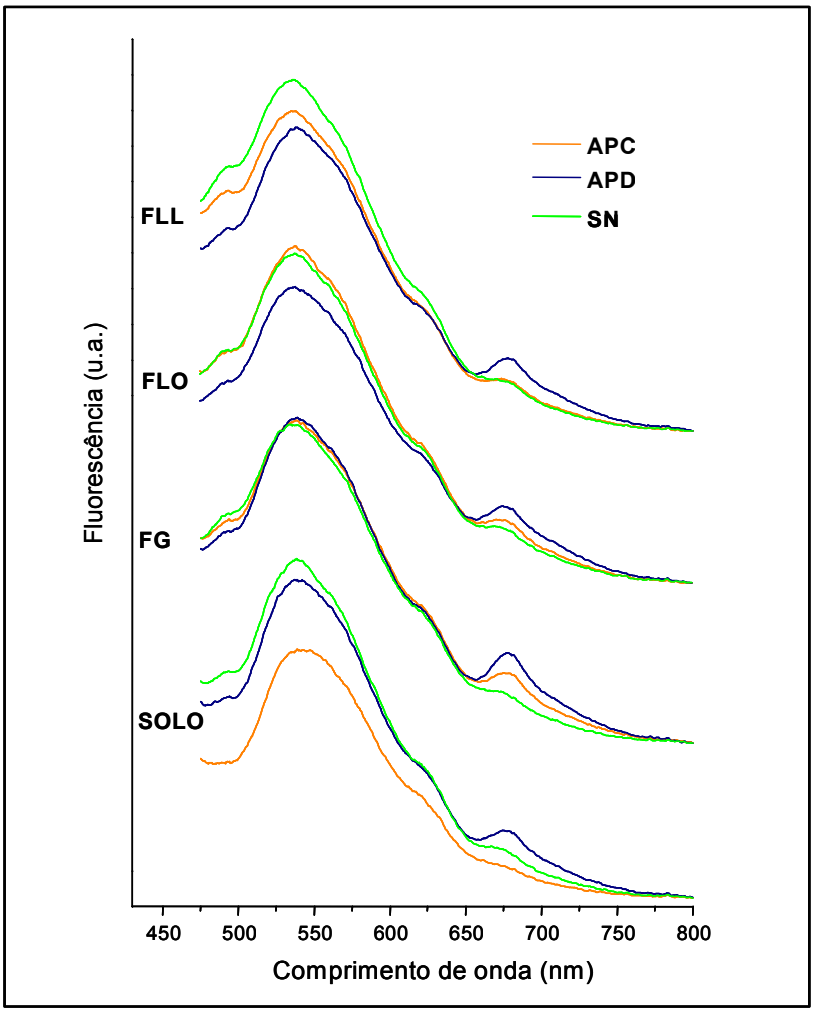


Figura 3. Emissão de fluorescência da matéria orgânica do solo e das frações leve livre (FLL), leve oclusa (FLO) e fração grosseira (FG) tratadas com HF. APC = Sistema de cultivo contínuo de arroz (preparo convencional); APD = Sucessão de azevém x arroz sob plantio direto; SN = Solo mantido em condições naturais, sem cultivo.

Em todas as frações analisadas, o maior grau de humificação foi encontrado no sistema APC, evidenciando que o revolvimento do solo, durante o preparo convencional, causou desagregação do solo e com isto diminuiu a proteção física das frações mais lábeis, acelerando assim a sua decomposição. Resultados semelhantes foram encontrados por Milori et al (2006) e por outros autores utilizando técnicas de RMN e EPR (BAYER et al., 2000; 2002).

A origem da fluorescência do solo é a MO, principalmente nos grupos funcionais ricos em ligações insaturadas que estão presentes na MO mais humificada. Portanto, ao iluminar as amostras com luz ultravioleta próximo ou no azul, excitam-se preferencialmente as estruturas mais recalcitrantes, ou seja, cuja concentração aumenta no processo de humificação (ABREU JR. et al., 2009).

Tabela 3. Área sob a curva de fluorescência (ACF) ponderada pelos teores de carbono orgânico (C) como índice do grau de humificação da MO de um Planossolo e suas frações físicas, na camada de 0-0,025m, submetido a diferentes sistemas de manejo

Sistema de manejo	FLL	FLO	MOP	SOLO
APC	44732	17475	10379	2062
APD	5794	8634	2589	1410
SN	13969	17101	2632	933

APC = Sistema de cultivo contínuo de arroz (preparo convencional); APD = Sucessão de azevém x arroz sob plantio direto; SN = Solo mantido em condições naturais, sem cultivo.

O maior aporte de resíduos vegetais sobre o solo no sistema APD provavelmente é responsável pelo menor grau de humificação, pois, associado ao não revolvimento do solo, tem sua degradação mais lenta, permanecendo por mais tempo a fração lábil da MO. Cabe também ressaltar que se trata da camada superficial (0-0,025 m), onde todo resíduo da parte aérea das plantas fica depositado.

CONCLUSÕES

O avanço da decomposição dos resíduos vegetais no solo alagado resulta na redução de C-O-alquil e aumento de C-alquil.

A fração leve oclusa, protegida fisicamente no interior dos agregados do solo, apresenta maior proporção de compostos mais recalcitrantes em relação à fração leve livre.

Os dados de RMN ^{13}C e FIL indicam maior grau de decomposição dos compostos orgânicos lábeis no sistema APC, refletindo-se num maior grau de humificação, em comparação ao sistema APD.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As condições de má drenagem típicas dos solos de várzea, associadas ao alagamento, durante o cultivo do arroz irrigado, impõe uma dinâmica diferenciada da MOS, com relação à taxa de decomposição, à distribuição desta nos seu compartimentos e aos seus mecanismos de estabilização.

O fracionamento físico constitui uma ferramenta importante na avaliação da proteção da matéria orgânica (MO), pois permite separar as frações homogêneas quanto a natureza, dinâmica e função e desta forma estudar as relações da MO com o ambiente. Este trabalho de pesquisa demonstrou que:

O uso do solo, no sistema sucesão arroz/azevém sob plantio direto, é uma estratégia na manutenção ou incremento dos estoques de MOS. Nos solos de várzea cultivados com arroz irrigado por inundação, onde a taxa de decomposição é mais lenta, comparada a solos oxidados, é importante salientar a elevada proporção de MO na fração grosseira, o que indica que o sistema (APD) adiciona quantidades suficientes de resíduos e que o solo está sendo capaz de protegê-la. O maior índice de manejo de carbono (IMC) conferido pelo incremento desta fração, demonstra a capacidade do sistema conservacionista em promover a qualidade do solo.

No Planossolo, a fração leve oclusa da MO não se mostrou sensível aos efeitos dos diferentes sistemas de manejo utilizados no cultivo do arroz irrigado, evidenciando que, no solo de várzea, há uma baixa eficiência da proteção física da MO (oclusão), que pode estar relacionada à condição de má drenagem no processo de agregação. Desta forma, a manutenção da MO neste solo, se deve ao aporte de resíduos, que determina a quantidade da FLL e à fração pesada que tem maior estabilidade no solo.

A caracterização espectroscópica da MO do solo de várzea demonstrou que seus grupos funcionais são semelhantes aos de solos oxidados e, comparando os sistemas de manejo, o arroz contínuo com preparo convencional

do solo apresentou um maior grau de humificação da MO, comprovando a maior taxa de decomposição demonstrada pela redução dos estoques de COT e das frações mais lábeis da MO, principalmente nas camadas superficiais.

7 ESTUDOS FUTUROS

Em virtude da importância da MO para a qualidade do solo e sua sustentabilidade agrícola, e dos poucos trabalhos sobre essa temática em solos de várzea, os resultados do presente estudo permitiram levantar alguns aspectos que constituem ponto de partida para outros estudos, buscando o avanço no entendimento da dinâmica da MOS e suas frações em solos alagados de clima temperado.

Um aspecto ainda a ser estudado é o efeito dos sistemas de manejo no conteúdo de MO no interior dos micro e macro agregados do solo com o objetivo de avaliar a influência da MO em cada classe de agregados, já que o DMP dos agregados do solo é baixo e, aparentemente, a oclusão não está sendo eficiente na proteção da MO no Planossolo.

Outro aspecto a investigar é a influência dos microrganismos anaeróbios no processo de proteção e transformação da MOS, visto que os produtos da decomposição anaeróbia são diferenciados e a velocidade de decomposição é menor do que no processo aeróbio.

A caracterização espectroscópica do solo inteiro e das frações da MO, foi realizada apenas na camada de 0-0,025 m e a sua avaliação em camadas mais profundas, pode ser objeto de outros estudos, visto que o sistema convencional de manejo proporciona a incorporação de resíduos até, pelo menos, 0,20 m (camada arável) e o alagamento do solo facilita a infiltração dos compostos orgânicos que podem se acumular em camadas subsuperficiais.

Os resultados quantitativos de carbono em sistemas alagados também podem ser inseridos em modelos simuladores da dinâmica da MOS, com o objetivo de prever cenários futuros no que diz respeito a qualidade dos solos de várzea cultivados.

Em termos gerais, mais estudos sobre a dinâmica da MO nos diferentes tipos de solos de várzea ainda são necessários para estabelecer conceitos e teorias sobre este tema no ambiente com drenagem deficiente.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU JR., C.H.; NETO, L.M.; MILORI, D.M.B.P.; SIMÕES, M.L.; da SILVA, W.T.L. Métodos analíticos utilizados em química do solo. In: MELO, V. DE F.; ALLEONI, L.R.F. **Química e mineralogia do solo. Parte II – Applicações**. Viçosa - MG, 2009.

AMADO, T.J.C.; BAYER, C.; ELTZ, F.L.F.; BRUM, A.C.R. Potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25. p.189-197, 2001.

AMADO, T. J. C.; BAYER, C.; CONCEIÇÃO, P. C.; SPAGNOLLO, E.; CAMPOS, B. C.; VEIGA, M. Potential of carbon accumulation in no-till soils with intensive use and cover crops in southern Brazil. **Journal of Enviromental Quality**, v.35, p.1599-1607, 2006.

BAMBERG, A.L.; PAULETO, E.A.; GOMES, A. da S.G.; TIMM, L.C.; PINTO, L.F.S.; LIMA, A.C.R. de; SILVA, T.R. da. Densidade de um Planossolo sob sistemas de cultivo avaliada por meio da tomografia computadorizada de raios gama. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 1079-1086. 2009.

BALDOCK, J.A.; OADES, J.M.; WATERS, A.G.; PENG, X.; VASSALO, A.M. & WILSON, M.A. Aspects of the chemical structrure of soil organic material as revealed by solid-state 13C NMR spectroscopy. **Biogeochemistry**, 16:1-42, 1992.

BAYER, C**. Dinâmica da matéria orgânica em sistemas de manejo de solos**. Porto Alegre. 1996. 240f. Tese (Doutorado em Agronomia – Ciência do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Características químicas do solo afetadas por métodos de preparo e sistemas de cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 21, p. 105-112, 1997.

BAYER C.; MARTIN-NETO L.; MIELNICZUK J.; CERETTA C. A. Effect of no-till cropping systems on soil organic matter in a sandy clay loam Acrisol from Southern Brazil monitored by electron spin resonance and nuclear magnetic resonance. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 53, p. 95-104, 2000.

BAYER C.; MIELNICZUK J.; MARTIN-NETO L.; ERNANI P.R. Stocks and humification degree of organic matter fractions as afeccted by no-tillage on a subtropical soil. **Plant and soil**, Dordrecht, v. 238, p. 133-140, 2002.

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

BLAIR, G.J.; LEFROY, R.D.B.; LISLE, L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon manegement index for agricultural systems. **Australian Journal of Agricultural Research**, Collingwood, v. 46, p. 1459-1460, 1995.

BOENI, M. **Proteção física da matéria orgânica em Latossolos sob sistemas com pastagens na região do cerrado brasileiro**, 2007. 136p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS.

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

CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Carbon and nitrogen distribution in aggregates from cultivated and native grassland soils **Soil Science Society of America Journal** , Madison, v.57, p.1071-1076, 1993.

CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Carbon and nitrogen dynamics of soil organic-matter fractions from cultivated grassland soils **Soil Science Society of America Journal** , Madison, v.58, p.123-130, 1994.

CARVALHO, E.R.; MARTIN-NETO, L.; MILORI, D.M.B.P.; ROCHA, J.C.; ROSA, A.H. Interactions of chlorine with tropical aquatic fulvic acids and formation of intermediates observed by fluorescense spectroscopy. **Journal of the Brazilian**

Chemical Society, v. 15, n. 53, p. 421, 2004.

CASTILHOS, R.M.V.; MEURER, E.J.; KÄMPF, N.; PINTO, L.F.S. Mineralogia e fontes de potássio em solos no Rio Grande do Sul cultivados com arroz irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, MG. V.26, n.3, p.579-587, 2002.

CHRISTENSEN, B.T. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates. **Advances in soil science**, New York, v.20, p. 1-90, 1992.

CHRISTENSEN, B. T. **Organic matter in soil - structure, function and turnover** . 2000. 95 f. Copenhagen. 2000.

CHRISTENSEN, B. T. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover. **European Journal of Soil Science**, v.52, p.345-353, 2001.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira: grãos Safra 2008/2009**. Nono Levantamento. Junho/2009. Disponível em <*http://www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/9graos_08.09.pdf*>. Acesso em: 26 jun. 2009.

CONCEIÇÃO, P. C.; AMADO, T. J. C.; MIELNICZUK, J.; SPAGNOLLO, E. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.

777-788, 2005.

CONCEIÇÃO, P. C. **Agregação e proteção física da matéria orgânica em dois solos do sul do Brasil.** 2006. 138f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS.

CONCEIÇÃO, P.C.; BOENI, M.; DIEKOW, J.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Fracionamento densimétrico com politungstato de sódio no estudo da proteção física da matéria orgânica em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 541-549, 2008.

DEXTER, A. R. Advances in characterization of soil structure. **Soil and Tillage Research** , Amsterdam, v.11, p.199-238, 1988.

DIEKOW, J. **Estoque e qualidade da matéria orgânica do solo em função de sistemas de culturas e adubação nitrogenada no sistema plantio direto,** 2003. 164p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS.

DIEKOW, J.; MIELNICZUK, J.; KNICKER,H.; BAYER, C.; DICK, D.P.; KNABNER, I.K. Carbon and nitrogen stocks in physical fractions of a subtropical Acrisol as influenced by long-term no-till cropping systems and N fertilization. **Plant Soil**, v. 268, p. 319-328, 2005.

DICK, D.P.; SILVA, L.B. da; INDA, A.V.; KNICKER, H. Estudo comparativo da matéria orgânica de diferentes classes de solos de altitude do sul do Brasil por técnicas convencionais e espectroscópicas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2289-2296, 2008.

DUXBURY, J. M. et al. Soil organic matter as a source and a sink of plant nutrients. In: COLEMAN, D. C. et al. (eds.) **Dynamics of soil organic matter in tropicals ecosystems** . Honolulu, University of Hawai, 1989. p.33-67.

EMPINOTTI, V. L. **Conteúdo e qualidade da Matéria Orgânica em sistemas de manejo e classes de solo**, 1999. 101p. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

GASTAL, M. F. da C.; RAUPP, A. A. A.; SILVA, C. A. S.; PARFITT, J. M. B.; PORTO, M. P.; BRANCÃO, N. Rotação e sucessão de culturas em áreas de várzea. In: GOMES, A. da S.; MAGALHÃES JUNIOR, A. M. **Arroz irrigado no Sul do Brasil**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2004. p. 799-829.

GAUNT, J.L.; NEUE, H.U.; BRAGAIS, J. Soil characteristics that regulate soil reduction and methane production in wetland rice soils. **Soil Science Socite of American Journal**, v. 61, p. 1526-1531, 1997.

GOLCHIN, A.; OADES, J.M.; SKJEMSTAD, J.O.; CLARK, P. Study of free and occluded particulate organic matter in soils by solid state ^{13}C CP/MAS NMR

spectroscopy and scanning electron microscopy. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v.32, p. 285-309, 1994.

GOLCHIN, A. et al. Structural and dynamic properties of soil organic matter as reflected by ^{13}C natural abundance, pyrolysis mass spectrometry and solid-state ^{13}C NMR spectroscopy in density fractions of na Oxisol under forest and pature. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v. 33, p. 59-76, 1995.

GOLCHIN, A.; BALDOCK, J. A.; OADES, J. M. A model linking organic matter decomposition, chemistry, and aggregate dynamics. In: LAL, R.; KIMBLE, J. M.; FOLLETT, R. F.; STEWART, B. A. **Soil Processes and the Carbon Cycle.** Boca Raton: CRC Press, 1997, p.245-266.

GOMES, A. da S.; PAULETTO, E. A.; VERNETTI JUNIOR, F. de J.; SOUSA, R. O. Plantio direto e cultivo mínimo em arroz. In: GOMES, A. da S.; MAGALHÃES JUNIOR, A. M. **Arroz irrigado no Sul do Brasil**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2004. p. 349-386.

GREGORICH, E. G.; BEARE, M. H.; McKIM, U. F.; SKJEMSTAD, J. O. Chemical and biological characteristics of physically uncomplexed organic matter. **Soil Science Society of America Journal**, v.70, p.975-985, 2006.

GREGORICH, E. G.; JANZEN, H. H. Storage of soil carbon in the light fraction and macroorganic matter. In: CARTER, M. R.; STEWART, B. A. **Structure and Organic Matter Storage in Agriculture Soils.** Boca Raton: CRC Lewis, 1996, p.167-190.

HASSINK, J. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles. **Plant and Soil**, v.191, p.77-87, 1997.

JASTROW, J. D.; MILLER, R. M. Soil aggregate stabilization and carbon sequestration: feedbacks through organomineral associations. In: LAL, R. et al. (eds.) **Soil processes and the carbon cycle.** Boca Raton: CRC Press, 1997, p.207-223.

KEMPER, W.D.; ROSENAU, R.C. Aggregate stability and size distribution. In: KLÜTE, A. (ed.). Methods of Soil Analysis, 2.ed. Madison, Wisconsin USA:

American Society of Agronomy, **Soil Science Society of America**, 1986, p.425-441.

KÖGEL-KNABNER, I. The macromolecular organic composition of plant and microbial residues as inputs to soil organic matter. **Soil Biology & Biochemistry**, Amsterdam, v. 34, p. 139-162, 2002.

LADD, J.N.; FOSTER, R.C.; SKJEMSTAD, J.O. Soil Structure: carbon and nitrogen metabolism. **Geoderma**, Amsterdam, v. 56, p. 401-434, 1993.

LIMA, C.L.R. de; PILLON, C.N.; SUZUKI, L.E.A.S.; CRUZ, L.E.C. da. Atributos físicos de um Planossolo Háplico sob sistemas de manejo comparados aos do campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1849-1855, 2008.

MARTINS, M.R.; CORÁ, J.E.; JORGE, R.F.; MARCELO, A. V. Crop type influences soil aggregation and organic matter under no-tillage. **Soil and Tillage Reseach**, v.104, p.22-29, 2009.

MIELNICZUK, J. Matéria orgânica e sustentabilidade de sistemas agrícolas. In: SANTOS, G.A.; CAMARGO, F.A.O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Gênesis, 1999. p.1-8.

MILORI, D.M.B.P.; GALETI, H.V.A.; MARTIN-NETO, L.; DIECKOW, J.; GONZÁLEZPÉREZ, M.; BAYER, C.; SALTON, J. Organic matter study of whole soil samples using laser-induced fluorescense spectroscopy. **Soil Science Society of America Journal**, v. 70, p. 57-63, 2006.

NASCIMENTO, P.C.do; BAYER, C.; NETTO, L.DE F. da S.; VIAN, A.C.; VIEIRO, F.; MACEDO, V.C.M.; MARCOLIN, E. Sistemas de manejo e a matéria orgânica de solo de várzea com cultivo de arroz. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p. 1821-1827, 2009.

OLENDZKI, R.N. **Caracterização das interações de substâncias húmicas com a matéria orgânica em solos de arroz irrigado: Contribuição à aquisição de dados essenciais para avaliação global do sequentro de carbono no solo**. 2006. 134p. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR.

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

PARFITT, R. L.; THENG, B. K. G.; WHITTON, J. S.; SHEPHERD, T. G. Effects of clay minerals and land use on organic matter pools. **Geoderma**, v.75, p.1-12, 1997.

PAUL, E. A.; CLARK, E.E. **Soil Microbiology and Biochemistry**. 2,ed. San Diego: Academic Press, 1996. 340p.

PAULETTO, E.A.; GOMES, A. da S. & PINTO, L.F.S. Física de solos de várzea cultivados com arroz irrigado. In: GOMES, A.S. & MAGALHÃES JR., A.M. **Arroz irrigado no sul do Brasil**. Brasília, Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p.119-142.

PETRINI, J. A.; FRANCO, D. F.; SOUZA, P. R.; BACHA, R. E.; TRONCHONI, J. G. Sistemas de cultivo de arroz pré-germinado e transplante de mudas. In: GOMES, A. da S.; MAGALHÃES JUNIOR, A. M. **Arroz irrigado no Sul do Brasil**, Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2004. p. 387-416.

PILLON, C.N. **Alterações no conteúdo e qualidade da matéria orgânica do solo, induzidas por sistemas de cultura em plantio direto**, 2000. 232p. Tese (Doutorado em Agronomia – Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS.

PINTO, L.F.S.; NETO, J.A.L.; PAULETTO, E.A. Solos de várzea do Sul do Brasil cultivados com arroz irrigado. In: GOMES, A. DA S.; MAGALHÃES JUNIOR, A. M. **Arroz irrigado no Sul do Brasil**, Pelotas - RS: Embrapa Clima Temperado, 2004. p. 75-95.

ROSCOE, R.; BUURMAN, P.; VELTHORST, E. J.; VASCONCELLOS, C. A. Soil organic matter dynamics in density and particle-size fractions as revealed by the $^{13}C/^{12}C$ isotopic ratio in a cerrado's oxisol. **Geoderma**, v.104, p.182-202, 2001.

ROSCOE, R.; MACHADO, P.L.O.de A. **Fracionamento físico do solo em estudos da matéria orgânica**, Dourados – MS: Embrapa Agropecuária Oeste e Embrapa Solos, 2002. 86p.

ROSCOE, R.; MADARI, B. E.; MACHADO, P. L. O. A. Fracionamento físico do solo na obtenção de compartimentos mensuráveis para uso em simuladores da dinâmica da matéria orgânica. In: ROSCOE, R.; MERCANTE, F. M.; SALTON, J. C. **Dinâmica da Matéria Orgânica do Solo em Sistemas Conservacionistas: modelagem matemática e métodos auxiliares.** Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste. 2006, p.107-132.

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J. Relações entre sistemas de preparo, temperatura e umidade de um Podzólico Vermelho-Escuro de Eldorado do Sul (RS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo** , Campinas, v.19, p.313-319, 1995.

SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O. **Fundamentos da Matéria Orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais**, Porto Alegre: Gênesis, 1999. 491p.

SANTOS, V. B. **Matéria orgânica e biomassa microbiana de um Planossolo sob diferentes sistemas de manejo**, 2003. 80p. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Ciência do Solo) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

SANTOS, V.B. dos et al. Biomassa, atividade microbiana e teores de carbono e nitrogênio totais de um planossolo sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Agrociência**, v.10, n.3, p.333-338, 2004.

SILVA, I. R. da; MENDONÇA, E. de S. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F. de; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 275-374.

SILVA, I. F.; MIELNICZUK, J. Ação do sistema radicular de plantas na formação e estabilização de agregados do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.21, p.113-117, 1997.

SILVA, I. F.; MIELNICZUK, J. Sistemas de cultivo e características do solo afetando a estabilidade de agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** Viçosa, v.22, p.311-317, 1998.

SISTI, C. P. J.; SANTOS, H. P.; KOHHAN, R.; ALBES, B.J.R.; URQUIAGA, S.; BODEY, R.M. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of

conventional or zero tillage in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v.76, p.39-58, 2004.

SIX, J.; ELLIOTT, E. T.; PAUSTIAN, K.; DORAN, J. W. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivaded and native grassland soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.62, p.1367-1377, 1998.

SIX, J. et al. Soil structure and organic matter: I. distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon. **Soil Science Society of America Journal,** v.64, p.681-689, 2000.

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**, v.241, p.155-176, 2002.

SKJEMSTAD, J.O.;JANIK, L.J.; HEAD, M.J. et al. High energy ultraviolet photo-oxidation: a novel technique for studyng physically protected organic matter in clay and silt-sized aggregates. **Journal of Soil Science**, London, v.44, p. 485-499, 1993.

SOLLINS, P.; HOMANN, P.; CALDWELL, B. A. Stabilization and destabilization of soil organic matter: mechanisms and controls. **Geoderma**, v.74, p.65-105, 1996.

SOSBAI; Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado. **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil**. XXVI Reunião da Cultura do Arroz Irrigado, Santa Maria, 2005. 159p.

SOUSA, R.O. de; CAMARGO, F.A.O.; VAHL, L. Solos alagados (reações de redox). In: MEURER, E.J. **Fundamentos de química do solo**. 2ª ed. Porto Alegre, RS, 2004.

SOUSA, R.O. de; VAHL, L.C.; OTERO, X.L. Química de solo alagado. In: MELO, V. DE F.; ALLEONI, L.R.F. **Química e Mineralogia do Solo. Parte II – Aplicações**. Viçosa, MG, 2009. p. 485-528.

SPOSITO, G. **The chemistry of soils.** New York, Oxford University Press, 1989. 277p.

STEVENSON, F. G. **Humus chemistry: Genesis, composition, reactions**. New York: John Wiley, 1982.

STEVENSON, J.F**. Humus chemisthy, gênesis, composition, reactions**. 2ª ed. New York, John Wiley, 1994. 496p.

TAN, K.H. **Humic Matter in soil and the environment**. Madison Avenue, New York, 2003. 385p.

TISDALL, J.M.; OADES, J.M. Organic matter and water-stable aggregates in sils. **Journal of Soil Science**, London, v.33, p. 141-163, 1982.

VERNETTI JUNIOR, F. de J.; GOMES, A. da S. Sistema convencional de arroz irrigado. In: GOMES, A. DA S.; MAGALHÃES JUNIOR, A. M. **Arroz irrigado no Sul do Brasil**, Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2004. p.339-348.

VEZZANI, F.M. **Qualidade do sistema solo na produção agrícola**. Porto Alegre, 2001. 184 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo)- Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.

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

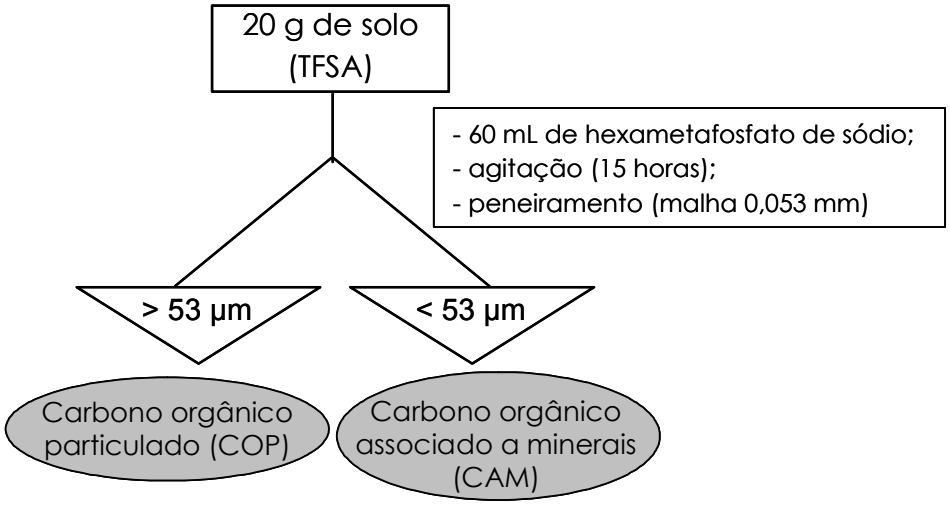
WISEMAN, C. L. S.; PÜTTMANN, W. Interactions between mineral phases in the preservation of soil organic matter. **Geoderma**, v.134, p.109-118, 2005.

ZECH, W. et al. **Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics**, Amsterdam, v.79, p.117-161, 1997.

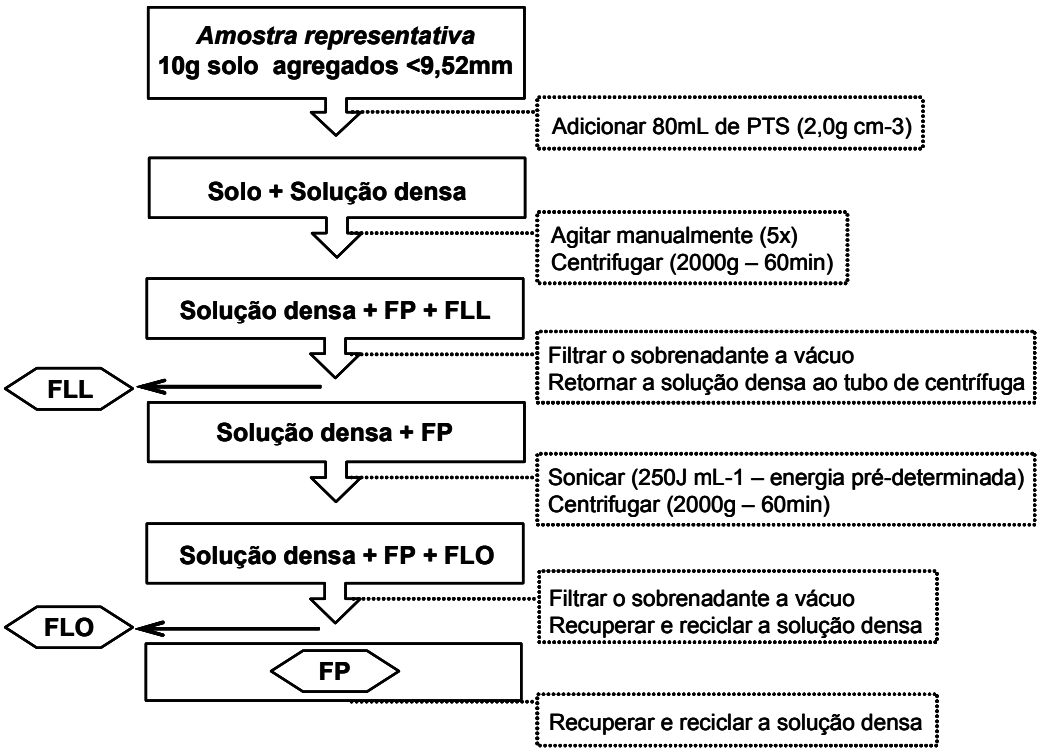
ZSCHORNACK, T. **Fracionamento e estoques de carbono orgânico de solos de várzea sob campo natural no Rio Grande do Sul**. Pelotas, 2007. 88f. Dissertação (Mestrado em Agronomia, área de concentração Solos) – Faculdade de Agronomia “Eliseu Maciel”, UFPel.

9 APÊNDICES

Apêndice 1. Esquema simplificado do fracionamento físico granulométrico da matéria orgânica do solo segundo Cambardella e Elliott (1992).



Apêndice 2. Esquema simplificado do fracionamento físico densimétrico da matéria orgânica do solo com PTS. Adaptado de Conceição (2006).



Apêndice 3. Densidade (Ds) e massa de solo, teor de carbono orgânico total (COT) e estoques de COT calculado e corrigido de um Planossolo sob diferentes sistemas de manejo do arroz irrigado, na camada de 0-0,025 m, Capão do Leão - RS

Sistema de manejo	Bloco	Ds*	Massa de solo	COT	Estoque de $COT_{calculado}$	Estoque de $COT_{corrigido}$
		- g cm^{-3} -	--- g ---	-- g kg^{-1} --	------ Mg ha^{-1} ------	
ST	1	1,52	379	14,99	5,68	5,48
	2	1,65	413	13,04	5,38	4,76
	3	1,57	392	17,38	6,82	6,77
	4	1,47	367	14,17	5,19	5,31
Média		**1,55**	-	**14,90**	**5,77**	**5,58**
APC	1	1,48	370	14,50	5,36	5,38
	2	1,55	387	18,70	7,23	6,82
	3	1,52	379	17,10	6,48	6,61
	4	1,43	358	11,80	4,22	4,41
Média		**1,49**	-	**15,53**	**5,82**	**5,80**
APD	1	1,49	371	27,33	10,15	9,98
	2	1,45	363	37,65	13,68	13,72
	3	1,54	386	24,03	9,27	9,31
	4	1,54	385	30,37	11,69	11,41
Média		**1,51**	-	**29,85**	**11,20**	**11,11**
SN	1	1,46	365	42,72	15,58	15,58
	2	1,46	365	59,37	21,69	21,69
	3	1,55	388	35,51	13,80	13,80
	4	1,50	376	52,76	19,85	19,85
Média		**1,49**	**-**	**47,59**	**17,73**	**17,73**

* Bamberg et al. (2009)

ST = Sistema tradicional de cultivo: um ano arroz (preparo convencional) seguido de dois anos com pousio; APC = Sistema de cultivo contínuo de arroz (preparo convencional); APD = Sucessão de azevém x arroz sob plantio direto; SN = Solo mantido em condições naturais, sem cultivo.

Apêndice 4. Densidade (Ds) e massa de solo, teor de carbono orgânico total (COT) e estoques de COT calculado e corrigido de um Planossolo sob diferentes sistemas de manejo do arroz irrigado, na camada de 0,025-0,05 m, Capão do Leão - RS

Sistema de manejo	Bloco	Ds*	massa de solo	COT	Estoque de $COT_{calculado}$	Estoque de $COT_{corrigido}$
		- g cm^{-3} -	--- g ---	-- g kg^{-1} --	----- Mg ha^{-1} ------	
ST	1	1,51	378	13,08	4,95	5,01
	2	1,56	390	10,96	4,27	4,34
	3	1,50	376	11,50	4,32	4,40
	4	1,44	359	13,08	4,69	5,08
Média		**1,50**	-	**12,16**	**4,56**	**4,71**
APC	1	1,46	365	10,60	3,87	3,93
	2	1,54	385	11,30	4,35	4,53
	3	1,37	342	13,80	4,72	5,02
	4	1,45	362	10,20	3,70	3,98
Média		**1,45**	-	**11,48**	**4,16**	**4,37**
APD	1	1,49	373	27,33	10,20	10,38
	2	1,56	390	19,52	7,61	7,55
	3	1,40	350	22,30	7,80	8,35
	4	1,49	372	21,66	8,06	8,46
Média		**1,48**	-	**22,70**	**8,42**	**8,69**
SN	1	1,52	381	17,30	6,59	6,59
	2	1,55	387	15,30	5,93	5,93
	3	1,52	381	25,70	9,79	9,79
	4	1,56	391	20,40	7,97	7,97
Média		**1,54**	-	**19,68**	**7,57**	**7,57**

* Bamberg et al. (2009)

ST = Sistema tradicional de cultivo: um ano arroz (preparo convencional) seguido de dois anos com pousio; APC = Sistema de cultivo contínuo de arroz (preparo convencional); APD = Sucessão de azevém x arroz sob plantio direto; SN = Solo mantido em condições naturais, sem cultivo.

Apêndice 5. Densidade (Ds) e massa de solo, teor de carbono orgânico total (COT) e estoques de COT calculado e corrigido de um Planossolo sob diferentes sistemas de manejo do arroz irrigado, na camada de 0,05-0,10 m, Capão do Leão - RS

Sistema de manejo	Bloco	Ds*	Massa de solo	COT	Estoque de $COT_{calculado}$	Estoque de $COT_{corrigido}$
		- g cm^{-3} -	--- g ---	-- g kg^{-1} --	----- Mg ha^{-1} -----	
ST	1	1,57	786	12,00	9,44	9,22
	2	1,58	792	10,40	8,24	8,32
	3	1,51	754	9,50	7,16	7,22
	4	1,44	719	12,20	8,78	9,18
Média		**1,53**	-	**11,03**	**8,40**	**8,48**
APC	1	1,53	763	11,90	9,07	9,10
	2	1,54	771	12,30	9,48	9,77
	3	1,53	767	8,89	6,82	6,73
	4	1,52	762	10,00	7,62	7,73
Média		**1,53**	-	**10,77**	**8,25**	**8,34**
APD	1	1,52	761	11,40	8,68	8,72
	2	1,59	797	9,46	7,54	7,55
	3	1,45	727	18,04	13,12	13,23
	4	1,52	759	13,40	10,17	10,32
Média		**1,52**	-	**13,08**	**9,88**	**9,95**
SN	1	1,53	767	17,90	13,73	13,73
	2	1,59	797	10,10	8,05	8,05
	3	1,52	761	10,00	7,61	7,61
	4	1,57	783	11,40	8,93	8,93
Média		**1,55**	-	**12,35**	**9,58**	**9,58**

* Bamberg et al. (2009)

ST = Sistema tradicional de cultivo: um ano arroz (preparo convencional) seguido de dois anos com pousio; APC = Sistema de cultivo contínuo de arroz (preparo convencional); APD = Sucessão de azevém x arroz sob plantio direto; SN = Solo mantido em condições naturais, sem cultivo.

Apêndice 6. Densidade (Ds) e massa de solo, teor de carbono orgânico total (COT) e estoques de COT calculado e corrigido de um Planossolo sob diferentes sistemas de manejo do arroz irrigado, na camada de 0,10-0,20 m, Capão do Leão - RS

Sistema de manejo	Bloco	Ds*	Massa de solo	COT	Estoque de $COT_{calculado}$	Estoque de $COT_{corrigido}$
		- g cm^{-3} -	--- g ---	-- g kg^{-1} --	----- Mg ha^{-1} -----	
ST	1	1,63	1626	9,53	15,49	14,78
	2	1,59	1587	7,41	11,76	12,22
	3	1,52	1516	7,48	11,34	11,53
	4	1,54	1536	8,60	13,21	13,55
Média		**1,57**	-	**8,26**	**12,95**	**13,02**
APC	1	1,62	1624	10,70	17,37	16,50
	2	1,60	1596	11,40	18,19	18,59
	3	1,60	1601	8,07	12,92	12,43
	4	1,56	1562	8,54	13,34	13,45
Média		**1,60**	-	**9,68**	**15,46**	**15,25**
APD	1	1,51	1513	8,59	13,00	13,26
	2	1,57	1568	7,20	11,29	11,74
	3	1,50	1500	10,50	15,75	16,18
	4	1,57	1572	8,20	12,89	12,92
Média		**1,54**	-	**8,62**	**13,23**	**13,52**
SN	1	1,54	1543	9,41	14,52	14,52
	2	1,63	1631	7,88	12,85	12,85
	3	1,54	1541	7,30	11,25	11,25
	4	1,57	1575	8,36	13,17	13,17
Média		**1,57**	-	**8,24**	**12,95**	**12,95**

* Bamberg et al. (2009)

ST = Sistema tradicional de cultivo: um ano arroz (preparo convencional) seguido de dois anos com pousio; APC = Sistema de cultivo contínuo de arroz (preparo convencional); APD = Sucessão de azevém x arroz sob plantio direto; SN = Solo mantido em condições naturais, sem cultivo.

Apêndice 7. Estoques de carbono, calculados e corrigidos, da fração grosseira (FG), da fração associada aos minerais (CAM) e proporção destas em relação ao carbono orgânico total (COT) de um Planossolo sob diferentes sistemas de manejo do arroz irrigado, na camada de 0-0,025 m, Capão do Leão - RS

Sistema de manejo	Bloco	FG	CAM	FG	CAM	FLL/COT	FLO/COT
		- calculado (Mg ha^{-1}) -		- corrigido (Mg ha^{-1}) -		-------- % --------	
ST	1	1,18	4,51	1,13	4,34	20,68	79,32
	2	2,48	2,90	2,19	2,57	46,08	53,92
	3	1,48	5,34	1,47	5,30	21,68	78,32
	4	1,89	3,31	1,92	3,39	36,21	63,79
Média		**1,76**	**4,01**	**1,68**	**3,90**	**31,16**	**68,84**
APC	1	1,46	3,90	1,46	3,92	27,19	72,81
	2	2,20	5,03	2,08	4,74	30,49	69,51
	3	2,22	4,26	2,26	4,35	34,21	65,79
	4	1,42	2,81	1,46	2,95	33,04	66,96
Média		**1,83**	**4,00**	**1,81**	**3,99**	**31,23**	**68,77**
APD	1	8,66	1,49	8,52	1,46	85,34	14,66
	2	6,42	7,26	6,43	7,29	46,88	53,12
	3	7,84	1,43	7,85	1,46	84,33	15,67
	4	6,13	5,56	5,99	5,43	52,45	47,55
Média		**7,26**	**3,93**	**7,20**	**3,91**	**67,25**	**32,75**
SN	1	7,10	8,48	7,10	8,48	45,58	54,42
	2	7,34	14,35	7,34	14,35	33,83	66,17
	3	6,69	7,11	6,69	7,11	48,46	51,55
	4	7,17	12,68	7,17	12,68	36,11	63,89
Média		**7,07**	**10,66**	**7,07**	**10,66**	**41,00**	**59,01**

ST = Sistema tradicional de cultivo: um ano arroz (preparo convencional) seguido de dois anos com pousio; APC = Sistema de cultivo contínuo de arroz (preparo convencional); APD = Sucessão de azevém x arroz sob plantio direto; SN = Solo mantido em condições naturais, sem cultivo.

Apêndice 8. Estoques de carbono, calculados e corrigidos, da fração grosseira (FG), da fração associada aos minerais (CAM) e proporção destas em relação ao carbono orgânico total (COT) de um Planossolo sob diferentes sistemas de manejo do arroz irrigado, na camada de 0,025-0,05 m, Capão do Leão - RS

Sistema de manejo	Bloco	FG	CAM	FG	CAM	FLL/COT	FLO/COT
		- calculado (Mg ha^{-1}) -		- corrigido (Mg ha^{-1}) -		-------- % ---------	
ST	1	1,21	3,74	1,22	3,79	24,34	75,66
	2	1,15	3,12	1,29	3,05	29,76	70,24
	3	1,24	3,08	1,26	3,14	28,60	71,40
	4	1,40	3,30	1,49	3,58	29,44	70,56
Média		**1,25**	**3,31**	**1,32**	**3,39**	**28,04**	**71,97**
APC	1	1,06	2,82	1,06	2,87	27,03	72,97
	2	1,08	3,26	1,15	3,38	25,42	74,58
	3	1,41	3,31	1,49	3,53	29,74	70,26
	4	0,77	2,93	0,86	3,12	21,55	78,45
Média		**1,08**	**3,08**	**1,14**	**3,23**	**25,93**	**74,07**
APD	1	6,75	3,45	6,90	3,49	66,43	33,57
	2	2,42	5,19	2,40	5,15	31,76	68,24
	3	2,12	5,68	2,36	5,99	28,25	71,75
	4	2,97	5,09	3,13	5,34	36,96	63,04
Média		**3,56**	**4,85**	**3,70**	**4,99**	**40,85**	**59,15**
SN	1	3,07	3,52	3,07	3,52	46,60	53,40
	2	4,59	1,34	4,59	1,34	77,45	22,55
	3	3,97	5,82	3,97	5,82	40,58	59,42
	4	4,55	3,42	4,55	3,42	57,06	42,94
Média		**4,05**	**3,52**	**4,05**	**3,52**	**55,42**	**44,58**

ST = Sistema tradicional de cultivo: um ano arroz (preparo convencional) seguido de dois anos com pousio; APC = Sistema de cultivo contínuo de arroz (preparo convencional); APD = Sucessão de azevém x arroz sob plantio direto; SN = Solo mantido em condições naturais, sem cultivo.

Apêndice 9. Estoques de carbono, calculados e corrigidos, da fração grosseira (FG), da fração associada aos minerais (CAM) e proporção destas em relação ao carbono orgânico total (COT) de um Planossolo sob diferentes sistemas de manejo do arroz irrigado, na camada de 0,05-0,10 m, Capão do Leão - RS

Sistema de manejo	Bloco	FG	CAM	FG	CAM	FLL/COT	FLO/COT
		- calculado (Mg ha^{-1}) -		- corrigido (Mg ha^{-1}) -		--------- % ---------	
ST	1	2,75	6,69	2,68	6,538	29,09	70,91
	2	2,21	6,03	2,23	6,092	26,78	73,22
	3	1,76	5,40	1,77	5,444	24,55	75,45
	4	2,31	6,46	2,34	6,844	25,44	74,56
Média		**2,26**	**6,15**	**2,25**	**6,229**	**26,47**	**73,53**
APC	1	1,78	7,30	1,78	7,328	19,51	80,49
	2	2,06	7,42	2,13	7,649	21,74	78,26
	3	1,98	4,84	1,91	4,821	28,37	71,63
	4	2,10	5,52	2,05	5,683	26,52	73,48
Média		**1,98**	**6,27**	**1,97**	**6,370**	**24,04**	**75,97**
APD	1	3,29	5,38	3,30	5,427	37,79	62,21
	2	1,58	5,96	1,58	5,964	20,98	79,02
	3	5,63	7,49	5,53	7,694	41,83	58,17
	4	1,60	8,57	1,62	8,694	15,73	84,27
Média		**3,03**	**6,85**	**3,01**	**6,945**	**29,08**	**70,92**
SN	1	2,49	11,24	2,49	11,240	18,11	81,89
	2	2,94	5,12	2,94	5,115	36,48	63,52
	3	1,59	6,02	1,59	6,016	20,90	79,10
	4	2,01	6,92	2,01	6,921	22,49	77,51
Média		**2,26**	**7,32**	**2,26**	**7,323**	**24,50**	**75,50**

ST = Sistema tradicional de cultivo: um ano arroz (preparo convencional) seguido de dois anos com pousio; APC = Sistema de cultivo contínuo de arroz (preparo convencional); APD = Sucessão de azevém x arroz sob plantio direto; SN = Solo mantido em condições naturais, sem cultivo.

Apêndice 10. Estoques de carbono, calculados e corrigidos, da fração grosseira (FG), da fração associada aos minerais (CAM) e proporção destas em relação ao carbono orgânico total (COT) de um Planossolo sob diferentes sistemas de manejo do arroz irrigado, na camada de 0,10-0,20 m, Capão do Leão - RS

Sistema de manejo	Bloco	FG	CAM	FG	CAM	FLL/COT	FLO/COT
		- calculado (Mg ha^{-1}) -		- corrigido (Mg ha^{-1}) -		--------- % ---------	
ST	1	2,50	13,00	2,43	12,35	16,43	83,57
	2	1,79	9,98	1,91	10,31	15,64	84,36
	3	1,99	9,35	2,02	9,51	17,52	82,48
	4	2,25	10,96	2,31	11,24	17,05	82,95
Média		**2,13**	**10,82**	**2,17**	**10,85**	**16,66**	**83,34**
APC	1	2,57	14,80	2,44	14,06	14,81	85,19
	2	2,77	15,43	2,83	15,77	15,20	84,80
	3	2,18	10,74	2,10	10,34	16,85	83,15
	4	1,84	11,50	1,85	11,60	13,78	86,22
Média		**2,34**	**13,12**	**2,31**	**12,94**	**15,16**	**84,84**
APD	1	2,16	10,84	2,20	11,05	16,61	83,39
	2	1,84	9,45	1,91	9,83	16,30	83,70
	3	3,57	12,18	3,66	12,51	22,65	77,35
	4	2,07	10,83	2,07	10,85	16,03	83,97
Média		**2,41**	**10,82**	**2,46**	**11,06**	**17,90**	**82,10**
SN	1	3,10	11,42	3,10	11,42	21,37	78,63
	2	3,26	9,59	3,26	9,59	25,38	74,62
	3	1,94	9,31	1,94	9,31	17,22	82,78
	4	2,96	10,21	2,96	10,21	22,45	77,55
Média		**2,82**	**10,13**	**2,82**	**10,13**	**21,61**	**78,39**

ST = Sistema tradicional de cultivo: um ano arroz (preparo convencional) seguido de dois anos com pousio; APC = Sistema de cultivo contínuo de arroz (preparo convencional); APD = Sucessão de azevém x arroz sob plantio direto; SN = Solo mantido em condições naturais, sem cultivo.

Apêndice 11. Estoques de carbono, calculados e corrigidos, da fração leve livre (FLL), leve oclusa (FLO), fração pesada (FP) e proporção destas em relação ao carbono orgânico total (COT) de um Planossolo sob diferentes sistemas de manejo do arroz irrigado, na camada de 0-0,025 m, Capão do Leão - RS

Sistema de manejo	Bloco	FLL	FLO	FP	FLL	FLO	FP	FLL/COT	FLO/COT	FP/COT
		-- calculado (Mg ha^{-1}) --			-- corrigido (Mg ha^{-1}) --			---------- % ----------		
ST	1	0,473	1,554	3,658	0,455	1,497	3,523	8,32	27,34	64,34
	2	0,493	0,691	4,201	0,436	0,610	3,713	9,15	12,83	78,02
	3	0,593	1,541	4,681	0,590	1,532	4,648	8,72	22,62	68,66
	4	0,583	0,709	3,902	0,591	0,725	3,995	11,12	13,66	75,22
Média		**0,535**	**1,124**	**4,111**	**0,518**	**1,091**	**3,970**	**9,33**	**19,11**	**71,56**
APC	1	0,370	0,891	4,099	0,382	0,918	4,080	7,10	17,06	75,84
	2	0,586	1,471	5,171	0,553	1,388	4,877	8,11	20,35	71,54
	3	0,401	1,415	4,667	0,405	1,427	4,774	6,13	21,60	72,27
	4	0,451	0,840	2,933	0,458	0,870	3,080	10,38	19,74	69,87
Média		**0,452**	**1,154**	**4,218**	**0,449**	**1,151**	**4,203**	**7,93**	**19,69**	**72,38**
APD	1	4,536	2,820	2,792	4,462	2,774	2,747	44,70	27,79	27,52
	2	3,147	1,596	8,940	3,150	1,600	8,972	22,95	11,66	65,39
	3	2,600	1,346	5,319	2,603	1,354	5,352	27,96	14,55	57,49
	4	2,852	2,363	6,474	2,785	2,308	6,322	24,40	20,22	55,39
Média		**3,283**	**2,031**	**5,881**	**3,250**	**2,009**	**5,848**	**30,00**	**18,55**	**51,45**
SN	1	1,741	0,588	13,250	1,741	0,588	13,250	11,18	3,77	85,05
	2	1,554	0,814	19,322	1,554	0,814	19,322	7,17	3,75	89,08
	3	1,443	2,442	9,910	1,443	2,442	9,910	10,46	17,70	71,84
	4	1,615	0,701	17,530	1,615	0,701	17,530	8,14	3,53	88,33
Média		**1,588**	**1,136**	**15,003**	**1,588**	**1,136**	**15,003**	**9,24**	**7,19**	**83,58**

ST = Sistema tradicional de cultivo: um ano arroz (preparo convencional) seguido de dois anos com pousio; APC = Sistema de cultivo contínuo de arroz (preparo convencional); APD = Sucessão de azevém x arroz sob plantio direto; SN = Solo mantido em condições naturais, sem cultivo.

Apêndice 12. Estoques de carbono, calculados e corrigidos, da fração leve livre (FLL), leve oclusa (FLO), fração pesada (FP) e proporção destas em relação ao carbono orgânico total (COT) de um Planossolo sob diferentes sistemas de manejo do arroz irrigado, na camada de 0,025-0,05 m, Capão do Leão - RS

Sistema de manejo	Bloco	FLL	FLO	FP	FLL	FLO	FP	FLL/COT	FLO/COT	FP/COT
		--- calculado (Mg ha^{-1}) ---			---corrigido (Mg ha^{-1}) ---			---------- % ----------		
ST	1	0,356	0,956	3,637	0,363	0,985	3,667	7,24	19,65	73,11
	2	0,334	0,864	3,076	0,348	0,831	3,162	8,01	19,14	72,84
	3	0,312	0,900	3,107	0,319	0,917	3,162	7,25	20,85	71,90
	4	0,317	0,674	3,701	0,355	0,720	4,001	7,00	14,18	78,82
Média		**0,330**	**0,848**	**3,380**	**0,346**	**0,863**	**3,498**	**7,37**	**18,46**	**74,17**
APC	1	0,449	0,618	2,804	0,456	0,628	2,845	11,62	16,00	72,40
	2	0,324	0,893	3,128	0,341	0,930	3,259	7,52	20,54	71,94
	3	0,161	0,471	4,090	0,210	0,535	4,280	4,17	10,64	85,19
	4	0,139	0,609	2,948	0,185	0,668	3,129	4,65	16,78	78,57
Média		**0,269**	**0,648**	**3,242**	**0,298**	**0,690**	**3,378**	**6,99**	**15,99**	**77,02**
APD	1	1,012	1,115	8,070	1,087	1,165	8,132	10,47	11,22	78,32
	2	0,631	0,756	6,223	0,626	0,751	6,175	8,29	9,94	81,77
	3	0,573	1,382	5,843	0,637	1,443	6,269	7,63	17,28	75,09
	4	0,884	0,923	6,249	0,963	1,006	6,493	11,38	11,89	76,73
Média		**0,775**	**1,044**	**6,596**	**0,828**	**1,091**	**6,767**	**9,44**	**12,58**	**77,97**
SN	1	0,793	0,860	4,939	0,793	0,860	4,939	12,03	13,05	74,92
	2	0,857	1,369	3,701	0,857	1,369	3,701	14,46	23,09	62,44
	3	0,681	1,527	7,579	0,681	1,527	7,579	6,96	15,61	77,44
	4	1,012	0,895	6,068	1,012	0,895	6,068	12,69	11,23	76,08
Média		**0,836**	**1,163**	**5,572**	**0,836**	**1,163**	**5,572**	**11,54**	**15,74**	**72,72**

ST = Sistema tradicional de cultivo: um ano arroz (preparo convencional) seguido de dois anos com pousio; APC = Sistema de cultivo contínuo de arroz (preparo convencional); APD = Sucessão de azevém x arroz sob plantio direto; SN = Solo mantido em condições naturais, sem cultivo.

Apêndice 13. Estoques de carbono, calculados e corrigidos, da fração leve livre (FLL), leve oclusa (FLO), fração pesada (FP) e proporção destas em relação ao carbono orgânico total (COT) de um Planossolo sob diferentes sistemas de manejo do arroz irrigado, na camada de 0,05-0,10 m, Capão do Leão - RS

Sistema de manejo	Bloco	FLL	FLO	FP	FLL	FLO	FP	FLL/COT	FLO/COT	FP/COT
		-- calculado (Mg ha^{-1}) --			-- corrigido (Mg ha^{-1}) --			---------- % ----------		
ST	1	0,632	1,789	7,016	0,619	1,749	6,854	6,71	18,96	74,33
	2	0,649	1,417	6,174	0,655	1,448	6,218	7,87	17,40	74,73
	3	0,385	1,265	5,515	0,386	1,288	5,542	5,35	17,84	76,81
	4	0,803	1,094	6,879	0,788	1,208	7,183	8,58	13,16	78,26
Média		**0,617**	**1,391**	**6,396**	**0,612**	**1,423**	**6,449**	**7,13**	**16,84**	**76,03**
APC	1	0,848	1,547	6,679	0,846	1,558	6,699	9,29	17,12	73,59
	2	0,683	2,030	6,767	0,703	2,084	6,987	7,20	21,32	71,48
	3	0,841	1,219	4,758	0,804	1,217	4,708	11,95	18,09	69,96
	4	0,852	1,451	5,320	0,843	1,451	5,440	10,90	18,76	70,34
Média		**0,806**	**1,562**	**5,881**	**0,799**	**1,578**	**5,959**	**9,83**	**18,82**	**71,34**
APD	1	0,629	1,688	6,361	0,628	1,695	6,401	7,20	19,43	73,37
	2	0,612	1,015	5,911	0,612	1,016	5,920	8,11	13,46	78,43
	3	1,497	1,506	10,115	1,460	1,539	10,227	11,04	11,64	77,32
	4	0,986	2,101	7,084	0,981	2,121	7,214	9,51	20,56	69,93
Média		**0,931**	**1,578**	**7,368**	**0,920**	**1,593**	**7,441**	**8,97**	**16,27**	**74,76**
SN	1	0,314	1,500	11,912	0,314	1,500	11,912	2,29	10,93	86,79
	2	0,700	1,773	5,579	0,700	1,773	5,579	8,70	22,02	69,29
	3	0,599	1,128	5,879	0,599	1,128	5,879	7,88	14,83	77,29
	4	0,523	1,659	6,747	0,523	1,659	6,747	5,86	18,58	75,56
Média		**0,534**	**1,515**	**7,529**	**0,534**	**1,515**	**7,529**	**6,18**	**16,59**	**77,23**

ST = Sistema tradicional de cultivo: um ano arroz (preparo convencional) seguido de dois anos com pousio; APC = Sistema de cultivo contínuo de arroz (preparo convencional); APD = Sucessão de azevém x arroz sob plantio direto; SN = Solo mantido em condições naturais, sem cultivo.

Apêndice 14. Estoques de carbono, calculados e corrigidos, da fração leve livre (FLL), leve oclusa (FLO), fração pesada (FP) e proporção destas em relação ao carbono orgânico total (COT) de um Planossolo sob diferentes sistemas de manejo do arroz irrigado, na camada de 0,10-0,20 m, Capão do Leão - RS

Sistema de manejo	Bloco	FLL	FLO	FP	FLL	FLO	FP	FLL/COT	FLO/COT	FP/COT
		-- calculado (Mg ha^{-1}) --			--- corrigido (Mg ha^{-1}) --			---------- % ----------		
ST	1	0,982	1,502	13,011	0,938	1,466	12,374	6,35	9,92	83,7349
	2	0,586	1,964	9,212	0,623	2,044	9,559	5,09	16,72	78,1889
	3	0,311	4,489	6,540	0,316	4,564	6,648	2,74	39,59	57,6709
	4	0,449	2,572	10,189	0,460	2,637	10,448	3,40	19,47	77,1308
Média		**0,582**	**2,632**	**9,738**	**0,584**	**2,678**	**9,757**	**4,395**	**21,424**	**74,181**
APC	1	1,123	3,610	12,639	1,067	3,430	12,008	6,465	20,779	72,7561
	2	0,966	2,139	15,089	0,987	2,186	15,420	5,31	11,76	82,933
	3	0,596	2,849	9,474	0,573	2,743	9,119	4,61	22,06	73,3334
	4	1,003	2,050	10,284	1,011	2,067	10,370	7,52	15,37	77,1097
Média		**0,922**	**2,662**	**11,871**	**0,910**	**2,606**	**11,729**	**5,975**	**17,492**	**76,533**
APD	1	0,226	2,126	10,646	0,231	2,168	10,857	1,74	16,35	81,908
	2	0,262	1,844	9,180	0,273	1,918	9,551	2,328	16,338	81,3339
	3	0,687	2,267	12,792	0,705	2,329	13,141	4,36	14,40	81,2417
	4	0,353	2,219	10,320	0,354	2,223	10,340	2,74	17,21	80,0536
Média		**0,382**	**2,114**	**10,735**	**0,391**	**2,159**	**10,972**	**2,791**	**16,074**	**81,134**
SN	1	0,288	2,061	12,173	0,288	2,061	12,173	1,99	14,19	83,8252
	2	0,733	2,899	9,223	0,733	2,899	9,223	5,70	22,55	71,7433
	3	0,988	2,466	7,798	0,988	2,466	7,798	8,776	21,916	69,308
	4	0,710	2,505	9,951	0,710	2,505	9,951	5,39	19,03	75,5801
Média		**0,680**	**2,483**	**9,786**	**0,680**	**2,483**	**9,786**	**5,465**	**19,421**	**75,114**

ST = Sistema tradicional de cultivo: um ano arroz (preparo convencional) seguido de dois anos com pousio; APC = Sistema de cultivo contínuo de arroz (preparo convencional); APD = Sucessão de azevém x arroz sob plantio direto; SN = Solo mantido em condições naturais, sem cultivo.

Apêndice 15. Diâmetro médio ponderado (DMP) dos agregados de solo em um Planossolo sob diferentes sistemas de manejo do arroz irrigado, Capão do Leão - RS

Sistema de manejo	Bloco	DMP (mm) ---------- Profundifdades ----------			
		0-0,025 m	0,025-0,05 m	0,05-0,10 m	0,10-0,20 m
ST	1	2,44	1,70	3,02	3,03
	2	2,25	1,99	2,22	1,29
	3	2,76	3,16	1,89	1,43
	4	2,31	3,21	2,85	2,92
Média		**2,44**	**2,52**	**2,50**	**2,17**
APC	1	1,45	1,20	3,29	2,06
	2	2,00	1,48	1,83	2,19
	3	2,10	1,54	1,73	1,51
	4	2,50	1,09	2,00	1,76
Média		**2,01**	**1,33**	**2,21**	**1,88**
APD	1	3,07	4,69	1,11	1,25
	2	2,98	2,72	1,21	1,13
	3	2,15	4,45	1,24	0,90
	4	2,05	3,34	1,08	1,30
Média		**2,56**	**3,80**	**1,16**	**1,15**
SN	1	4,70	4,39	2,63	2,30
	2	3,86	3,43	2,10	1,53
	3	3,62	4,24	2,27	2,34
	4	3,36	2,52	2,31	1,63
Média		**3,89**	**3,65**	**2,33**	**1,95**

ST = Sistema tradicional de cultivo: um ano arroz (preparo convencional) seguido de dois anos com pousio; APC = Sistema de cultivo contínuo de arroz (preparo convencional); APD = Sucessão de azevém x arroz sob plantio direto; SN = Solo mantido em condições naturais, sem cultivo.