

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



**TESE**

**Frações físicas e qualidade da matéria orgânica em  
agroecossistemas do Bioma Pampa**

**Daiane Carvalho dos Santos**

Pelotas, 2011

**DAIANE CARVALHO DOS SANTOS**

**Frações físicas e qualidade da matéria orgânica em  
agroecossistemas do Bioma Pampa**

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).

Orientador: Clenio Nailto Pillon – Embrapa Clima Temperado  
Co-orientadores: Cláudia Liane Rodrigues de Lima - UFPEL  
Flávia Fontana Fernandes - UFPEL

Pelotas, 2011

**Dados de catalogação na fonte:  
(Marlene Cravo Castillo – CRB-10/744)**

S237f Santos, Daiane Carvalho dos  
Frações físicas e qualidade da matéria orgânica em  
agrossistemas do Bioma Pampa / Daiane Carvalho dos  
Santos ; orientador Clenio Nailto Pillon; co-orientadores  
Cláudia Liane Rodrigues de Lima e Flávia Fontana  
Fernandes. - Pelotas, 2011.-147f. ; il.- Tese ( Doutorado ) –  
Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Faculdade de  
Agronomia Eliseu Maciel . Universidade Federal de Pelotas.  
Pelotas, 2011.

1. Carbono orgânico total 2. Preparo convencional  
3. Fracionamento físico 4. Sistema agrosilvipastoril  
5. Plantio direto I. Pillon, Clenio Nailto (orientador) II . Título.

CDD 631.42

**Banca examinadora:**

Dr. Clenio Nailto Pillon - Embrapa Clima Temperado (Presidente)

Dr. Jeferson Dieckow - UFPR

Dr<sup>a</sup>. Carla Machado da Rosa - UFRGS

Dr<sup>a</sup>. Ana Cláudia Rodrigues de Lima - UFPel

Dr. Luis Eduardo Akiyoshi Sanches Suzuki - UFPel - (Suplente)

A Vilmar Schmalfluss dos Santos e Vera  
Maria da Silva Carvalho (meus pais),  
Tatiana Carvalho dos Santos e Raphael  
Carvalho dos Santos (meus irmãos).

**DEDICO**

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer à Deus por ter me dado forças durante esta caminhada e permitir alcançar mais esta vitória.

À Universidade Federal de Pelotas que possibilitou a realização dos cursos de Mestrado e Doutorado.

À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Clima Temperado), e à Fundação de Apoio a Pesquisa e Desenvolvimento Edmundo Gastal pela concessão da área experimental e bolsa de estudos que possibilitou a realização deste trabalho.

Ao meu Orientador, pesquisador Doutor Clenio Nailto Pillon, pela oportunidade, confiança, incentivo, pela amizade e pela liberdade de crescer.

Às minhas Co-orientadoras, Prof<sup>a</sup>. Cláudia Liane Rodrigues de Lima e Prof<sup>a</sup>. Flávia Fontana Fernandes pela amizade e por proporcionarem maior conhecimento técnico.

Aos demais professores do Departamento de Solos da Universidade Federal de Pelotas em especial a Professora Rosa Maria Castilhos e ao Professor Luis Eduardo Suzuki pela amizade, carinho, respeito e ensinamentos transmitidos.

Aos pesquisadores Carlos Alberto Flores e José Maria Filippini Alba da Embrapa Clima Temperado e ao pesquisador Jorge Ribaski da Embrapa Florestas pela atenção, acompanhamento e colaboração.

Aos Pesquisadores Wilson Tadeu Lopes da Silva e Débora Marcondes Bastos Pereira Milori, pelos ensinamentos repassados e por disponibilizarem os laboratórios da Embrapa Instrumentação Agropecuária, São Carlos, SP, para a realização das análises espectroscópicas de Ressonância Magnética Nuclear e Fluorescência Induzida à Laser.

Ao analista Marcelo Luiz Simões e ao doutorando Cleber Hilário dos Santos da Embrapa Instrumentação Agropecuária, pelo apoio na realização das análises.

Ao professor Antônio Sálvio Mangrich, a Betânia Fraga Pereira, às estagiárias Estela Mari Cunha Cardoso, Jaqueline Nicolini, Alessandra Mira Leal e Jeniffer Vanelle dos Santos, do laboratório de Projetos e Processos Ambientais do Departamento de Química da UFPR, Curitiba, PR, pelo apoio nas análises espectroscópicas de Infravermelho com Transformada de Fourier e Ressonância Paramagnética Eletrônica.

Às Dr<sup>as</sup>. Carla Machado da Rosa (UFRGS) e Ana Cláudia Rodrigues de Lima (UFPEL) e ao Dr. Jeferson Dieckow (UFPR) por contribuírem na minha formação fazendo parte da banca examinadora.

Às minhas amigas, “irmãs”, queridas Carla Machado da Rosa, Cláudia Liane Rodrigues de Lima e Katiúscia Fonseca. Carla e Cláudia por não medirem esforços e colaborarem incansavelmente com a minha formação. Katiúscia pela amizade e apoio nesta trajetória, não só para que este trabalho tenha se realizado, mas também para meu crescimento pessoal, a vocês meu agradecimento eterno.

À Marla de Oliveira Farias e Juliana Brito pelo carinho e amizade.

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

Ao meu querido amigo José Carlos Leite pela amizade, pelo apoio, pelo conhecimento profissional e acima de tudo pela tua dedicação e companheirismo.

Aos funcionários do Laboratório de Física do Solo da Embrapa Clima Temperado, José Carlos e Paulão, e aos estagiários que por esta casa passaram Patrícia, William, Tati, Betânia, Loren, Esmael e Lenon, em especial à Roberta pela colaboração, dedicação e confiança.

Aos funcionários da Embrapa Clima Temperado Sérgio (tampinha), João Carlos L. da Silva (Le), Claudio Ruas e Elton Teixeira (Índio) pela colaboração na impressão e encadernação da Tese.

Ao meu namorado Alessandro pela paciência, amor, apoio e incentivo.

Aos meus sogros Sidnei e Regina e aos amigos Hamilton, Simone e Laura pela amizade e carinho.

Em especial agradeço aos meus queridos pais Vilmar e Vera, e aos meus irmãos Tatiana e Raphael pelo suporte emocional, carinho, paciência, incentivo, confiança, apoio incondicional, enfim, pelo amor, sem o qual seria impossível trilhar este caminho e pelo qual não há obstáculo que torne impossível a caminhada e por terem sempre acreditado em mim.

À minha segunda família Maria Clara Abelaira e Pablo Abelaira pelo carinho e amizade.

E a todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram de alguma forma para realização deste trabalho.

*Uma sociedade sustentável é aquela  
que satisfaz suas necessidades sem diminuir  
as perspectivas das gerações futuras.*

Capra, 1996



## RESUMO

SANTOS, Daiane Carvalho. **Frações físicas e qualidade da matéria orgânica em agroecossistemas do Bioma Pampa**. 2011. 141f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Solos. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

Escassos são os estudos que avaliam a dinâmica e a qualidade da matéria orgânica (MO) do solo em agroecossistemas do Bioma Pampa. Sistemas conservacionistas de manejo baseados na redução das operações de preparo do solo e na elevada e contínua adição de resíduos culturais, contribuem para a manutenção e melhoria da qualidade do solo e do ambiente. Neste trabalho, desenvolveram-se os seguintes estudos: os estudos 1 e 2 estão relacionados à avaliação das frações físicas da MO sob o ponto de vista quantitativo e qualitativo no solo inteiro e em classes de agregados, em áreas arenizadas do Sudoeste do estado do Rio Grande do Sul, em um Argissolo Vermelho sob cultivo de floresta homogênea de eucalipto (FH), sistema agrosilvipastoril (SA) e campo nativo (CN); os estudos 3 e 4 objetivaram avaliar quantitativamente e qualitativamente as frações físicas da MO no solo inteiro e em classes de agregados porém, em um Planossolo Háplico, sob cultivo de azevém (*Lolium multiflorum* Lam) + cornichão (*Lotus corniculatus*), como culturas de cobertura no inverno e rotação soja (*Glycine Max* L.)/milho (*Zea mays* L.)/sorgo (*Sorghum vulgare*) no verão em preparo convencional (PC) e plantio direto (PD). Como área de referência, amostrou-se uma área sob campo nativo (CN). Para ambos os estudos, o solo foi coletado nas camadas de 0,000 – 0,025m e de 0,025 – 0,075m seco ao ar e peneirado em malha de 8,00mm e em classes de agregados (8,00 – 4,76, 4,76 – 2,00, 2,00 – 1,00, 1,00 – 0,50, 0,50 – 0,25 e <0,25mm). Foram avaliados os estoques de carbono orgânico total (COT) e realizado o fracionamento físico granulométrico e densimétrico da MO para obtenção do carbono da fração grosseira (CFG), carbono associado aos minerais (CAM), fração leve livre (FLL), fração leve oclusa (FLO) e fração pesada (FP). No estudo 1 concluiu-se que o cultivo de homogêneo de eucalipto (FH) promoveu o aumento do estoque de COT, NT no solo e nas frações CFG, CAM, FLL e FLO quando comparado ao CN na camada superficial. No SA as amostras de solo apresentaram MO mais humificada quando comparada ao CN e a FH. A FLO, protegida fisicamente no interior dos agregados do solo, apresentou maior proporção de compostos mais recalcitrantes em relação à FLL. No estudo 2 concluiu-se que a FH promoveu os maiores estoques de COT acumulados na camada de 0,000 a 0,075m nas classes de 8,00 a 1,00mm e para o CFG e CAM nas classes que compreendem de 8,00 a 0,50mm. A FLL mostrou-se sensível as mudanças de uso do solo na classe de agregados de 8,00 – 4,76mm, nas camadas estudadas. Para todos os sistemas de uso avaliados, o grau de humificação foi maior nas classes de menor diâmetro (0,50 a <0,25mm). Concluiu-se pelo estudo 3 que o o PD aumenta os estoques de CFG e de FLL em comparação ao PC, sendo este efeito restrito à camada superficial em curto prazo (quatro anos), neste período, os sistemas de manejo não afetaram o CAM e a FP. O mecanismo mais importante de proteção e estabilização da MO é a interação organomineral, seguido da oclusão e a recalcitrância química. Sob PC as amostras de solo apresentaram MO mais humificada quando comparado ao PD e CN. A FLL apresentou maior proporção de compostos mais lábeis em relação à FLO. No estudo 4 concluiu-se que o PC e o PD em agroecossistema de terras baixas, reduziram os estoques de COT, FLL e FLO

nas classes de agregados 4,76 a <0,25mm e de CFG nas classes de 2,00 a <0,25mm quando comparado ao CN. Incrementos no estoque de FLL sob PD foram obtidos nas classes de agregados de 0,50 a <0,25mm, na camada de 0,000 – 0,025m e para o acumulado de 0,000 a 0,075m, quando comparado a PC. Maior estoque de FLO na camada superficial foi verificado sob PD na classe e agregados de 8,00 – 4,76mm. O PC contribuiu para o incremento relativo na PF da MO. Os maiores estoques de COT, CFG, CAM, FLO e FP para o PC e o PD, foram encontrados nas classes de agregados de maior tamanho. O grau de humificação da MO aumentou com a redução do diâmetro dos agregados.

Palavras-chave: fracionamento físico, sistema agrosilvipastoril, plantio direto, preparo convencional, carbono orgânico total.

## ABSTRACT

SANTOS, Daiane Carvalho. **Fractions and physical quality of organic matter in agroecosystems of the Pampa Biome.** 2011. 141f. Thesis (Doctoral) - Agronomy Post - graduation Program. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

Few studies evaluate the dynamics and quality of soil organic matter (OM) in agroecosystems of the Pampa Biome. Conservation tillage systems based on the reduction of tillage operations and addition of crop residues, contribute to maintaining and improving soil quality and the environment. In this work, the studies 1 and 2 are related to evaluation of physical fractions of organic matter from the point of view of quantity and quality in the whole soil and in aggregates under areas arenizadas in the southwest of RS, This studies was done in an Paleudult under cultivation of eucalyptus forest homogeneous (FH) system agrosilvopasture (SA) and native (CN). The studies 3 and 4 aimed evaluating quantitatively and qualitatively the physical fractions of organic matter in whole soil and in aggregate in an Albaqualf under cultivation of ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam) + birdsfoot trefoil (*Lotus corniculatus*), as cover crops in winter and rotation soybean (*Glycine max* L.) / maize (*Zea mays* L.) / sorghum (*Sorghum vulgare*) in the summer in conventional tillage (CT) and no-tillage (NT). As reference area, was sampled an native area (CN). For both studies, soil was collected in the layers from 0.000 to 0.025m and 0.025 to 0.075m depth. The soil was air-dried and sieved at 8.00mm mesh and in aggregate classes (8.00 to 4.76, 4.76 - 2.00, 2.00 to 1.00, 1.00 to 0.50, 0.50 to 0.25 and <0.25mm). The stocks were determined from total organic carbon (TOC) in layers from 0.000 to 0.025m and 0.025 to 0.075m. The physical fractionation and granulometric densimetric SOM were realized to obtain the coarse fraction (CGC), carbon associated with minerals (CAM), free light fraction (FLF), occluded light fraction (OLF) and heavy fraction (HF). The first one study it was concluded that cultivation of FH in sandy soils caused increase in the stock of TOC, total nitrogen (TN) in the soil and fractions CFG, CAM, FLF and OLF when compared to CN in the surface layer. The SA in the soil samples showed more humified OM compared to CN and FH. The OLF, physically protected within the soil aggregates, presented higher proportion of more recalcitrant compounds in relation to FLF. In study 2 concluded that the FH showed the highest values of TOC accumulated in the layer from 0.000 to 0.075m depth in classes of 8.00 to 1.00mm and for the CFG and CAM in theclasses 8.00 to 0,50mm. The FLF was sensitive to changes in land use in the aggregates from 8.00 to 4.76mm at depths from 0.000 to 0.025m 0.025 to 0.075m, and these increments to the FH and CN, respectively. For all systems evaluated (FH, SA and CN), the degree of humification was higher in smaller diameter classes (0.50 - <0.25mm). The OLF showed higher free radical semiquinone, indicating humification. It was concluded from the study 3 that the NT in lowland soils increases the stock of CFG and FLF in comparison to the CT. This effect was restricted to the superficial layer, and these fractions were more sensitive than the TOC to changes in land management. In four years of experiment, te management systems had no effect on the stock of CAM and HF. By Laser Induced Fluorescence (LIF), under CT soil samples showed humified OM compared to the NT and CN. The FLF had a higher proportion of more labile compounds in relation to the OLF. In the study 4 it was concluded that the management systems under CT and NT in lowlands, reduced TOC, FLF and OLF in the aggregates of 4.76 to <0.25mm and a CFG in the classes

of 2.00 to <0.25mm compared to CN. Increases in stock of the FLF under NT were obtained in aggregates from 0.50 to <0.25mm in the layer from 0.000 to 0.025m for 0.000 to 0.075m, compared with CT. The largest stock of OLF in the surface layer was observed under NT in the class of the aggregates of 8.00 to 4.76mm. The increases in HF were obtained under the CT. The highest TOC, CGC, CAM, OLF and HF for the CT and NT were found in the classes of larger size aggregates (8.00 to 2.00mm), while a reduction in these stocks declined as the size of aggregates. Through the LIF and the EPR, the humification degree of OM increased with decreased the aggregate classes.

Key words: physical fractionation, agrosilvopasture, no tillage, conventional tillage, total organic carbon

## LISTA DE ABREVEATURAS

AES - Agregados estáveis seco  
AF - Ácido fúlvico  
AH - Ácido húmico  
C - Carbono  
CAM - Carbono associado aos minerais  
CFG - Carbono da fração grosseira  
CN - Campo nativo  
COM - Complexos organominerais  
COP - Carbono orgânico particulado  
COT - Carbono orgânico total  
EPR - Ressonância Paramagnética Eletrônica  
FH - Floresta homogênea  
FIL - Fluorescência Induzida à Laser  
FLL - Fração leve livre  
FLO - Fração leve oclusa  
FP - Fração pesada  
FTIR - Infravermelho com Transformada de Fourier  
HF - Ácido Fluorídrico  
HU - Humina  
MAM - Matéria orgânica associada aos minerais  
MO - Matéria orgânica  
MOP - Matéria orgânica particulada  
N - Nitrogênio  
NT - Nitrogênio total  
PC - Preparo convencional  
PD - Plantio direto  
RLO - Radical livre orgânico  
RMN - Ressonância Magnética Nuclear  
SA - Sistema agrosilvipastoril

## SUMÁRIO

RESUMO.....	9
ABSTRACT.....	11
SUMÁRIO.....	14
1 INTRODUÇÃO GERAL.....	16
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	18
2.1 Características do Bioma Pampa.....	18
2.1.1 Sistemas de uso e manejo do solo no Bioma Pampa.....	19
2.2 Matéria orgânica e a qualidade do solo.....	20
2.3 Dinâmica e função da matéria orgânica do solo.....	21
2.4 Matéria orgânica e a agregação.....	22
2.5 Mecanismos de proteção da matéria orgânica no solo.....	25
2.6 Proteção física em diferentes tipos de solo.....	27
2.7 Fracionamento da matéria orgânica do solo.....	28
2.7.1 Fracionamento químico da matéria orgânica do solo.....	28
2.7.2 Fracionamento físico da matéria orgânica do solo.....	29
2.7.2.1 Fracionamento físico granulométrico da matéria orgânica do solo.....	29
2.7.2.2 Fracionamento físico densimétrico da matéria orgânica do solo.....	31
2.8 Efeito do manejo nas frações da matéria orgânica do solo.....	32
2.9 Caracterização qualitativa da matéria orgânica do solo.....	34
2.9.1 Fluorescência Induzida à Laser (FIL).....	34
2.9.2 Espectroscopia de Infravermelho com Transformada Fourier por Transmitância (FTIR).....	35
2.9.3 Ressonância Paramagnética Eletrônica (EPR).....	37
2.9.4 Ressonância Magnética Nuclear (RMN).....	39
3 ESTUDO 1. Estoque e qualidade da matéria orgânica de um Argissolo Vermelho derivado de arenito no Bioma Pampa.....	41
3.1 Introdução.....	41
3.2 Material e Método.....	42
3.4 Resultados e Discussão.....	47
3.5 Conclusões.....	58
4 ESTUDO 2. Frações Físicas e humificação da matéria orgânica em agregados de um Argissolo Vermelho derivado de arenito.....	60

4.1	Introdução.....	60
4.2	Material e Método.....	61
4.3	Resultados e Discussão.....	62
4.5	Conclusões.....	79
5	ESTUDO 3. Distribuição e qualidade da matéria orgânica em um Planossolo Háplico sob preparo convencional e plantio direto.....	80
5.1	Introdução.....	80
5.2	Material e Método.....	81
5.3	Resultados e Discussão.....	84
5.4	Conclusões.....	97
6	ESTUDO 4. Frações físicas e humificação da matéria orgânica em agregados de um Planossolo Háplico sob sistemas de manejo.....	98
6.1	Introdução.....	98
6.2	Material e Método.....	99
6.3	Resultados e Discussão.....	100
6.4	Conclusões.....	117
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	118
8	ESTUDOS FUTUROS.....	121
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	112
	ANEXOS.....	136
	APÊNDICES.....	140

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

A configuração da paisagem brasileira, principalmente no Rio Grande do Sul, tem mudado nos últimos anos. As pastagens no Bioma Pampa ocupavam cerca de 60% do território, este, por sua vez, tem apresentado uma taxa de redução gradativa, especialmente pelo cultivo da soja, milho e arroz, restando cerca de 30% dos campos originais. Recentemente o avanço do florestamento pode diminuir ainda mais a área de campo natural (NABINGER et al., 2009).

A substituição de vegetação natural para o estabelecimento de culturas anuais, pastagens e florestas comerciais pode levar a um decréscimo nos estoques de matéria orgânica (MO) do solo devido ao aumento da sua decomposição, à redução no aporte de material vegetal e qualidade dos resíduos (LIMA et al., 2008). No entanto, sistemas conservacionistas de uso e de manejo podem contribuir para melhorar a qualidade dos solos, pois podem proporcionar aumentos no estoque de MO e na estabilidade dos agregados.

A MO é um dos atributos do solo de maior relevância, pois exerce papel fundamental sobre a qualidade do solo, sendo sensível às condições ambientais e às mudanças no manejo, estando intimamente relacionada aos atributos químicos, físicos e biológicos do solo, como: estrutura, retenção de água, ciclagem de nutrientes, troca de cátions e atividade biológica (STEVENSON, 1994).

A MO compreende todo o carbono orgânico presente no solo na forma de resíduos frescos ou em diversos estágios de decomposição que, quando associados às partículas minerais, formam agregados estáveis, os quais fornecem proteção física a MO à decomposição microbiana. Alterações na distribuição e estabilidade de agregados, nos estoques de carbono orgânico total (COT) e de nitrogênio total (NT) constituem-se indicadores sensíveis às práticas de manejo a médio e longo prazo. Em curto prazo, alterações na proporção das frações lábeis da MO do solo, como o carbono da fração leve livre (FLL) e da fração leve oclusa (FLO), obtidas por técnicas de fracionamento físico densimétrico e/ou do carbono da fração grosseira (CFG) também conhecido como carbono orgânico particulado (COP) ou matéria orgânica particulada (MOP), obtido por fracionamento físico granulométrico, podem fornecer informações importantes sobre a sustentabilidade ambiental e sobre a qualidade do solo em agroecossistemas, permitindo correções nas estratégias de uso e manejo a serem adotadas.



O melhor entendimento das alterações promovidas no solo por diferentes sistemas de uso e manejo, pode fornecer subsídios sobre o desenvolvimento de sistemas de manejo mais adequados, de forma a maximizar os benefícios gerados pela MO, com vista à qualidade do solo e à produtividade biológica.

No contexto do Bioma Pampa, Zschornack (2007) analisou as frações físicas da MO de solos de várzea sob campo natural da Planície Costeira Interna e Campanha na região Sul do Estado e Rosa (2010) avaliou um Planossolo Háplico sob diferentes sistemas de manejo do arroz irrigado. Entretanto, escassos são os estudos que avaliam a dinâmica da MO, bem como os impactos da ação antrópica sobre as alterações no estoque de carbono e na qualidade do solo em agroecossistemas representativos do Bioma Pampa.

Com base no exposto, o presente trabalho apresenta como objetivo geral avaliar a dinâmica e qualidade da matéria orgânica do solo inteiro e suas frações físicas sob sistemas de uso e manejo em agroecossistemas representativos do Bioma Pampa. Para tanto, o trabalho foi estruturado em Introdução Geral, Revisão Bibliográfica e quatro estudos, finalizando com as Considerações Finais e Estudos Futuros.

O primeiro estudo objetivou avaliar quantitativamente e qualitativamente as frações físicas, bem como a contribuição relativa dos mecanismos de proteção da matéria orgânica em um Argissolo Vermelho quando em uso com sistema agrosilvipastoril e eucalipto no município de Alegrete, RS.

O segundo estudo visou avaliar o estoque de carbono orgânico total do solo, nas frações físicas e o grau de humificação da matéria orgânica em classes de agregados de um Argissolo Vermelho quando em uso com sistema agrosilvipastoril e eucalipto no município de Alegrete RS.

O terceiro estudo objetivou avaliar o estoque de carbono orgânico e nitrogênio total do solo e avaliar quantitativamente e qualitativamente as frações físicas bem como a contribuição relativa dos mecanismos de proteção da matéria orgânica em um Planossolo Háplico sob diferentes sistemas de manejo.

O quarto estudo visou avaliar o estoque de carbono orgânico total do solo, o estoque de carbono nas frações físicas da matéria orgânica e o grau de humificação em classes de agregados de um Planossolo Háplico sob preparo convencional e plantio direto.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 Características do Bioma Pampa**

Bioma é um conjunto de vida (vegetal e animal) constituído pelo agrupamento de tipos de vegetação próximos e identificáveis em escala regional, com condições de solo e clima similares e história compartilhada de mudanças, o que resulta em uma diversidade biológica própria daquela região (IBGE, 2009).

O Brasil apresenta seis biomas denominados: Bioma Amazônia, Bioma Mata Atlântica, Bioma Caatinga, Bioma Cerrado, Bioma Pantanal e Bioma Pampa.

Os campos da região Sul do Brasil são denominados como “pampa”, termo de origem indígena para “região plana”. O Pampa não tem limite nacional e está presente no Brasil, Argentina e Uruguai. No Brasil, está localizado na porção Sul do Estado do Rio Grande do Sul e se caracteriza por apresentar cobertura vegetal predominante de campos naturais, com matas de galeria e áreas de relevo suave e ondulado, como na Campanha e Missões, ou formando mosaicos de campo e floresta, em áreas de relevo forte ondulado, como na Serra do Sudeste. O clima é úmido ao longo do ano, havendo uma tendência à seca de verão em direção ao interior do estado, em especial na Fronteira Oeste. As pastagens naturais são apropriadas para criação extensiva de gado (HASENACK, 2009).

As pastagens no Rio Grande do Sul ocupavam cerca de 60% do território gaúcho. Estas, por sua vez, tem apresentado uma taxa de redução gradativa, restando cerca de 30% dos campos originais, especialmente pelo cultivo da soja, milho e arroz e recentemente, o florestamento (DALL’AGNOL, 2007).

No Sudoeste do estado do Rio Grande do Sul existem extensas áreas com solos arenosos que vêm sofrendo pressão antrópica, resultando em degradação do ecossistema regional (Bioma Pampa) devido à redução da cobertura vegetal, facilitando o processo de erosão. A fragilidade natural desses solos, aliada a sua baixa aptidão agrícola e o uso tradicional da terra para a criação extensiva de gado, têm agravado o processo erosivo, ampliando gradativamente as áreas com vegetação rarefeita e campos arenizados.

### 2.1.1 Sistemas de uso e manejo do solo no Bioma Pampa

A cultura do eucalipto têm sido empregada em larga escala em programas de florestamentos e sistemas agrossilvipastoris desde o início do século passado. Todavia, sua expansão tem sido impulsionada a partir da década de 60 com o estabelecimento do programa de incentivos fiscais, que visa à sua utilização como matéria-prima nas indústrias, sobretudo para obter celulose e energia (LIMA, 1987).

O Brasil possui 509 milhões de hectares de florestas naturais dos quais, 6,8 milhões de hectares são de florestas plantadas (PORTAL DO AGRONEGÓCIO, 2010). As florestas plantadas estão distribuídas estrategicamente, em sua maioria, nos Estados do Paraná, Rio Grande do Sul, Santa Catarina, São Paulo, Minas Gerais e Espírito Santo (MEDRADO, 2008).

O Bioma Pampa têm enfrentado também a introdução de espécies como acácia-negra, capim-braquiária, pinus, entre outros. A invasão de ecossistemas por espécies exóticas é considerada a segunda maior causa de perda de biodiversidade em todo o planeta, logo atrás da degradação ambiental causada pelo homem (REVISTA IBAMA, 2005).

A escala de conversão do Pampa para agricultura preocupa os ambientalistas. O avanço da soja convencional reduz o espaço dos campos naturais. O Rio Grande do Sul é o terceiro maior produtor de soja do Brasil, de acordo com os dados de 2006, com 14,4% da produção nacional (ATLAS SÓCIO ECONÔMICO DO RS, 2008).

O Rio Grande do Sul é o maior produtor nacional de arroz e sua participação na produção nacional vem aumentando de 46,5% para 49,8% e de 49,8% para 50,6% do total produzido, respectivamente, nos períodos de 2001 a 2003 e de 2004 a 2006, chegando a 6.408.555 toneladas (ATLAS SÓCIO ECONÔMICO DO RS, 2008), cobrindo um área de aproximadamente 779.543 hectares (IRGA, 2009).

A rápida expansão em especial dos sistemas de produção de grãos, se deu sem um sistema adequado de preparo, resultando em erosão e outros problemas que se agravam progressivamente. Atualmente, os campos que já representaram 2,4% da cobertura vegetal do país, são amplamente utilizados para a produção de arroz, milho, trigo e soja, às vezes em associação com a criação de bovinos e ovinos. O uso e manejo inadequado do solo em agroecossistemas frágeis tem

levado à desertificação, registrada em diferentes áreas do Rio Grande do Sul (WWF, 2008).

## **2.2 Matéria orgânica e a qualidade do solo**

Qualidade do solo é a capacidade de um solo funcionar dentro dos limites de um ecossistema natural ou manejado, sustentar a produtividade de plantas e de animais, manter ou aumentar a qualidade do ar e da água e promover a saúde das plantas, dos animais e dos homens (DORAN; PARKIN, 1994; DORAN, 1997).

A avaliação da qualidade do solo parte da premissa de que o solo é resultado de complexas interações entre os minerais, as plantas e a biota edáfica. Como sistema aberto, possui um fluxo de energia e matéria, que é dirigido pelo fluxo de compostos orgânicos. A partir da entrada de compostos orgânicos, o sistema se auto-organiza, através de relações entre os minerais, as plantas e a biota edáfica, e atinge estados de ordem em diferentes níveis de organização, conforme o fluxo que passa por ele. Os estados de ordem são representados pelos processos de agregação do solo, onde ocorre a estruturação por interações organominerais e ação direta das plantas e da biota edáfica. A estruturação do solo possui níveis de ordem, que aumentam conforme aumentam as interações. O estado de ordem em nível alto é caracterizado pela presença de estruturas complexas e diversificadas, representados pelos macroporos do solo e grande quantidade de energia e matéria retida na forma de compostos orgânicos, gerando propriedades emergentes que capacitam o sistema solo exercer suas funções e, assim, atingir qualidade (VEZZANI, 2001). Em conformidade com esta idéia, a MO passa a ser um fator determinante da qualidade do solo, pois as funções que ela exerce estão intimamente associadas com as propriedades emergentes que promovem a qualidade do solo (VEZZANI et al., 2008).

Sistemas de manejo que visam a conservação e recuperação do solo e a expressão da sua qualidade devem atender os seguintes requisitos: (i) proporcionar elevada cobertura do solo durante o ano, por plantas ou seus resíduos, com ênfase nos períodos de maior precipitação e insolação; (ii) proporcionar aporte contínuo e abundante de resíduos culturais para contrabalancear a rápida decomposição da MO e dos resíduos culturais e (iii) promover o mínimo revolvimento do solo,

permitindo o máximo de resíduos na superfície e redução das reações de oxidação da MO do solo (MIELNICZUK, 1988).

A recuperação da capacidade do solo exercer suas funções em áreas degradadas é um dos principais objetivos da pesquisa em manejo de solos. Quando o solo é degradado a níveis que não possa desempenhar suas funções, a recuperação de sua qualidade é lenta, por muitas vezes cara e incerta (NORTCLIFF, 2002). A utilização de experimentos de longa duração permite avaliar a influência do sistema de manejo sobre a dinâmica da MO e, por consequência, sobre a qualidade do solo no decorrer do tempo (ARSHAD; MARTIN, 2002), servindo como uma ferramenta de suporte para a tomada de decisão pelos produtores, técnicos e pesquisadores (VEZZANI et al., 2008).

### **2.3 Dinâmica e função da matéria orgânica do solo**

A dinâmica da MO no solo se dá através da deposição de resíduos orgânicos principalmente de origem vegetal, os quais contêm, em média, 40% de carbono (C) na matéria seca. Através da fotossíntese, as plantas captam o CO<sub>2</sub> atmosférico, fixando-o na forma de compostos orgânicos no tecido vegetal. Através da liberação de exsudatos radiculares no perfil do solo, durante o período de crescimento dos vegetais, parte do C fixado fotossinteticamente é incorporado ao solo. O restante é depositado sobre o solo ou no seu interior pelas raízes das plantas, na sua senescência ou morte (PILLON; MIELNICZUK; MARTIN NETO, 2004).

Quando resíduos vegetais são depositados ao solo, estes sofrem inicialmente, a ação da fauna e, posteriormente, dos microrganismos decompositores que utilizam os compostos orgânicos presentes nos resíduos como fonte de C e energia para seu metabolismo. A oxidação desses substratos na cadeia respiratória dos microrganismos resulta em perda de grande parte do C na forma de CO<sub>2</sub>, que retorna à atmosfera, onde cerca de 20% permanece na MO (PILLON, MIELNICZUK, MARTIN NETO, 2004, PILLON 2006).

Quando a adição de resíduos vegetais no solo é pequena, como nos sistemas que apresentam pousio de inverno ou de verão, os microrganismos do solo, para sua sobrevivência, utilizam parte do C armazenado na MO presente no solo como fonte de C e de energia. Neste processo, uma porcentagem do C é

oxidado, liberando CO<sub>2</sub> e água, constituindo a taxa básica de mineralização anual da MO. Esta taxa é maior para solos arenosos (média de 5% ao ano) do que para os argilosos (média de 2 a 3% ao ano) (dados de regiões subtropicais), e é maior em regiões de clima quente e úmido do que em regiões de clima frio e/ou seco. Como resultado da ação microbiana sobre o C adicionado ou já existente no solo, ocorrem fluxos de C dos compartimentos mais lábeis (resíduos vegetais em decomposição) para compartimentos mais estáveis da MO (matéria orgânica associada à fração mineral ou frações de maior grau de humificação) (PILLON; MIELNICZUK; MARTIN NETO, 2004).

Em regiões tropicais e subtropicais, o equivalente a 50% da MO previamente acumulada é perdida por diversos processos físicos, químicos e biológicos nos primeiros anos de cultivo (SANCHES, 1976; DALAL; MAYER, 1986; ANDREUX, 1996; MIELNICZUK, 2008). A MO está relacionada à maioria dos atributos do solo e às suas funções básicas (DORAN, 1997), dentre eles a estabilidade dos agregados e da estrutura, infiltração e retenção de água, resistência do solo à erosão, atividade biológica, capacidade de troca de cátions (CTC), disponibilidade de nutrientes para as plantas e liberação de CO<sub>2</sub> e outros gases para a atmosfera (MIELNICZUK, 2008).

A velocidade e quantidade de adições e perdas de C no solo determinam a direção à sua sustentabilidade ou à sua degradação. Em geral, o revolvimento do solo aumenta as perdas. No entanto, o revolvimento mínimo do solo é determinante para o acúmulo de C (BAYER; MIELNICZUK, 1997).

A quantidade de MO que é armazenada no solo depende das características edafoclimáticas da região, da vegetação e/ou espécie cultivada e do manejo utilizado. Sistemas de cultivos que tem a capacidade de adicionar MO em maiores profundidades via biomassa radicular, contribuem significativamente para o armazenamento de COT no solo (BAYER et al. 2000a).

## **2.4 Matéria orgânica e a agregação**

Para explicar a relação existente entre a agregação e a MO, Tisdall e Oades (1982) propuseram um modelo de hierarquia de agregação. Conforme esse modelo, a MO desempenha importante papel na estabilidade de agregados <2µm através de interações entre seus grupos funcionais carboxila e hidroxila com a superfície de

partículas minerais de tamanho argila, processo também denominado de interação organomineral.

O papel da MO em termos de estabilização de microagregados (2 - 250 $\mu$ m) está associado à ação de mucilagens e exsudatos de origem microbiana e vegetal em associação com o efeito aditivo das interações organominerais de superfície. O tempo médio de resistência dessas mucilagens e exsudatos, constituídos principalmente de polissacarídeos, é de alguns dias a semanas (JENKINSON; RAYNER, 1977), representado entre 5 a 25% da MO (GUERRA et al., 2008). É necessário o aporte contínuo de material orgânico ao solo, para a manutenção da atividade biológica e liberação de mucilagens, e a presença contínua de plantas para a liberação de exsudatos radiculares.

A rizosfera também é um importante sítio de produção de mucilagens. Materiais orgânicos liberados pelas raízes no solo podem atingir de 40 a 79% do seu peso seco (BARBER; MARTIN, 1976) e são considerados como substâncias estabilizadoras dos agregados devido à ação cimentante (OADES, 1978).

Diversos autores têm utilizado a teoria de hierarquia de agregação proposta por Tisdall e Oades (1982) para explicar a relação existente entre a agregação e a MO. Christensen (1996a, 2001); Golchin; Baldock; Oades, (1997); Roscoe e Machado (2002) e Roscoe, Madar e Machado (2006) postulam que a MO pode estar livre ou ligada à partículas minerais do solo, formando complexos organominerais (COM), sendo chamados primários, quando resultante da interação direta entre partículas minerais primárias e orgânicas. A união de vários COM primários resulta na formação de microagregados (COM secundários <250 $\mu$ m). Neste processo, pode ocorrer o aprisionamento de parte da MO no interior dos COM secundários, dando origem a uma divisão da MO em: livre, na superfície ou entre agregados, e oclusa, dentro dos agregados.

A subdivisão dos microagregados em classes 53 – 20 $\mu$ m, 20 – 2 $\mu$ m e <2 $\mu$ m, permite a definição de compartimentos relacionados aos COM primários do tamanho silte e argila. A formação de estruturas de dimensões entre 2 - 20 $\mu$ m por materiais orgânicos persistentes leva a formação de microagregados muito estáveis que são mais difíceis de serem destruídos pela atividade agrícola (CHRISTENSEN, 2000).

Segundo a hipótese hierárquica de formação e estabilização de agregados descrita por Golchin; Baldock e Oades, (1997), um terceiro nível hierárquico de agregação ocorreria em solo onde a MO é o principal agente agregante. COM

secundários <250µm (microagregados) unidos por materiais orgânicos transitórios como exsudatos radiculares e microbianos (OADES, 1984; BAYER; MIELNICZUK, 1999 e 2008; SIX et al., 2002a), pelo entrelaçamento de hifas de fungos (TISDALL, 1991) e pela própria ação do sistema radicular (SILVA; MIELNICZUK, 1997) resultam na formação de macroagregados (COM secundários >250µm). Assim, admitem-se duas classes de COM secundários, os micro e macroagregados.

A comprovação da existência da hierarquia da agregação foi conseguida experimentalmente por Oades e Waters (1991), pela exposição dos macroagregados a níveis crescentes de energia obtida mediante agitação em água após umedecimento lento (capilaridade) ou rápido (imersão), agitação horizontal em agentes dispersantes e sonicação, reduzindo à estruturas menores. Em solos onde ocorreu a hierarquia de agregação dominada pela MO, os agregados romperam-se em microagregados antes de serem rompidos em COM primários. Para solos onde as argilas e óxidos foram os principais responsáveis pela estabilidade dos agregados a hierarquia de agregação não foi observada.

Uma alteração no modelo hierárquico foi proposto por Oades (1984) postulando que a MOP é o núcleo ao redor do qual as partículas primárias do solo são incrustadas formando macroagregados. Com a decomposição desses núcleos de MOP pela ação dos microrganismos, ocorre um enfraquecimento das ligações estabilizadoras dos macroagregados e eles se rompem, formando microagregados. Devido a incorporação de exsudatos microbianos durante o processo de decomposição da MOP, os microagregados oriundos de macroagregados são enriquecidos em MO (GOLCHIN; BALDOCK; OADES, 1997).

Diversos estudos têm comprovado que associado ao incremento de MO tem-se verificado o aumento da agregação do solo (CARPENEDO; MIELNICZUK, 1990; SILVA; MIELNICZUK, 1997; SALTON, 2005; CONCEIÇÃO, 2006; SALTON et al., 2008; PILLON et al. 2008), devido ao fato da MO estar parcial ou completamente associada com partículas minerais para formar agregados estáveis (KEMPER; ROSENAU, 1986). Em geral, o revolvimento do solo aumenta as perdas de MO em virtude do rompimento dos agregados, aumentando a liberação de CO<sub>2</sub> (ADU; OADES, 1978) e expondo a MO a decomposição pelos microrganismos, fazendo com que ocorra uma redução do estoque de MO. Por outro lado, o revolvimento mínimo do solo é determinante para o acúmulo de MO.



## 2.5 Mecanismos de proteção da matéria orgânica do solo

Três mecanismos de proteção são responsáveis pela manutenção ou acúmulo de MO no solo: recalcitrância molecular, proteção física e proteção coloidal (CHRISTENSEN, 1996a).

A recalcitrância molecular ou química das moléculas que compõe a MO é definida como uma resistência da molécula em ser decomposta e depende da sua conformação, presença de grupos funcionais e sua composição elementar (TISDALL; OADES, 1982). Estruturas aromáticas derivadas de lignina ou compostos humificados, por possuírem uma forte energia de ligação no seu anel, são mais resistentes à decomposição, sendo mais recalcitrantes no ambiente que as cadeias alifáticas de carboidratos (BALDOCK et al., 1992). Este mecanismo de proteção atua em todos os reservatórios da MO, independente da sua localização na matriz do solo e sua ligação/complexação com as partículas minerais (ROSCOE; MADAR; MACHADO, 2006; CONCEIÇÃO, 2006; ZSCHORNACK, 2007).

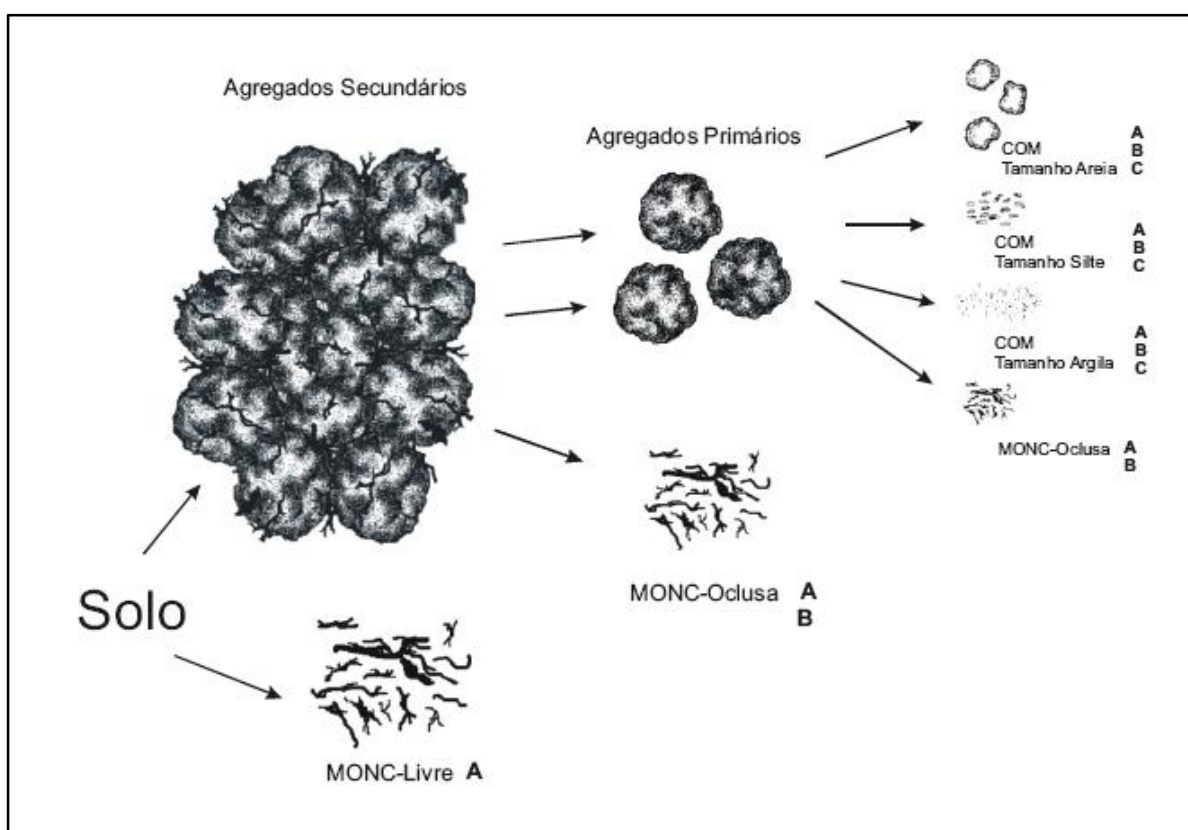
A proteção física está relacionada à formação e estabilidade de agregados, seja pela encapsulação no interior dos microagregados ou em microporos inacessíveis (TISDALL; OADES, 1982). Isso ocorre devido aos agregados do solo dificultarem a ação dos microrganismos e de suas enzimas sobre o substrato orgânico, por atuar como barreira física e diminuir a disponibilidade de O<sub>2</sub> para os processos oxidativos de decomposição (BALDOCK et al. 1992).

A proteção física da MO ocorre em agregados de diferentes tamanhos. Segundo o modelo conceitual de hierarquia da agregação proposto por Tisdall e Oades (1982), o tempo de estabilização da MO protegida fisicamente depende diretamente da estabilidade de agregados e dos seus agentes ligantes. De acordo com este modelo, os microagregados são unidos e estabilizados por agentes transitórios (polissacarídeos) e temporários (raízes e hifas de fungos), formando macroagregados, sendo aplicável em solos onde a MO é o principal agente de estabilização.

A proteção coloidal, também chamada de estabilização química ou interação, constitui-se por associações entre moléculas orgânicas e argilas silicatadas e/ou óxidos e hidroxidos de ferro e alumínio que promovem uma eficiente proteção contra a decomposição (CHRISTENSEN, 2001). Nesse caso, os microrganismos têm acesso ao substrato orgânico, porém encontram dificuldade em

removê-lo da superfície mineral onde está adsorvido, pois geralmente ocorre inativação das exoenzimas na superfície dos minerais (CHRISTENSEN, 1996a).

Em termos de dinâmica e grau de decomposição dos diferentes reservatórios representados na Fig. 1, geralmente, observam-se maiores taxas de decomposição e menor grau de humificação para a MO não complexada livre, onde somente a recalcitrância intrínseca estaria atuando como mecanismo de proteção. A MO não complexada oclusa ocupa uma posição intermediária, sendo que, além da recalcitrância, a oclusão nos agregados estaria atuando na sua proteção. A MO não complexada oclusa em agregados secundários estaria mais disponível que em agregados primários, em virtude da maior estabilidade dos últimos. Os COM são constituídos, geralmente por materiais mais humificados e com baixas taxas de decomposição, sendo estabilizados pela ligação direta entre as frações orgânicas e minerais (BALDOCK, et al.; 1992; CHRISTENSEN, 1996b; BALDOCK et al., 1997).



**Figura 1.** Modelo descritivo do arranjo espacial de partículas minerais e orgânicas do solo. As letras próximas a cada fração representam os mecanismos de proteção contra a decomposição: A, recalcitrância; B, oclusão; e C, complexação/ligação com as partículas minerais.

Fonte: Roscoe; Madar e Machado (2006), baseado em Christensen (1996a, 2001).

## 2.6 Proteção física em diferentes tipos de solo

Nos Latossolos, além da alta proteção física da MO pela maior capacidade de formação de agregados, a MO encontra-se em grande parte associada às superfícies minerais de óxidos e argilas, sendo esses os principais agentes de estabilização da MO, a qual é pouco afetada pelo preparo do solo devido a sua alta estabilidade química. Nesse caso a teoria da hierarquia da agregação não se aplica (OADES et al., 1989; OADES; WATERS, 1991).

Nos Argissolos, entretanto, a capacidade do solo em proteger fisicamente a MO é menor, além da sua menor estabilidade química, devido ao menor teor de óxidos de ferro (Fe) do solo. Neste tipo de solo, o revolvimento promove a exposição dos agregados a ciclos de umedecimento e secagem e o impacto direto das gotas da chuva (BADESDENT; CHENU; BALABANE, 2000), o que determina maior disponibilidade da MO, anteriormente protegida no interior dos agregados, à ação dos microrganismos e de suas enzimas. Como consequência, a redução do revolvimento do solo mantém a agregação, refletindo numa maior proteção física da MO e, portanto, recuperação dos estoques de C e nitrogênio (N).

Em solos de textura arenosa, a maior distância entre as partículas devido à presença de mineral quartzo, o qual possui pequena capacidade de manter quimicamente outras partículas ligadas a si, diminui a estabilidade estrutural comparativamente a solos de textura argilosa. O arranjo das partículas nos solos arenosos resulta em uma distribuição de poros de maior tamanho, facilitando o acesso microbiano à MO. Desta forma, a oxidação se dá mais facilmente e a estabilidade dos agregados se torna extremamente dependente da adição e manutenção de resíduos ao solo (CONCEIÇÃO, 2006).

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. Por este motivo, há uma situação bastante peculiar com relação às alterações químicas, físicas e biológicas que ocorrem no solo, bem como com a dinâmica da MO. Em consequência do alagamento, o suprimento de O<sub>2</sub> para o solo é lento e muito pequeno, provocando uma mudança da microbiota do solo que passa a ser, predominantemente anaeróbia. Para estes microrganismos a decomposição da MO se dá por respiração anaeróbia e fermentação, mais lenta do que a decomposição aeróbia. Os produtos finais da decomposição da MO são

distintos em solos bem drenados (dióxido de carbono, nitrato, sulfato e húmus) e em solos alagados (dióxido de carbono, metano, amônia, aminas, gás sulfídrico, ácidos orgânicos e resíduos parcialmente modificados) (VAHL; SOUZA, 2004).

Rosa (2010) analisou um Planossolo Háplico e concluiu que o sistema de cultivo do arroz irrigado em plantio direto (PD) sobre a palha do azevém preserva os teores e os estoques de COT do solo e do CFG. No entanto, os sistemas com preparo convencional (PC) provocam perdas acentuadas no estoque de COT e do CFG nas camadas de 0,000 - 0,025 e 0,025 - 0,05m. Além disso, nestas duas camadas, no sistema natural e na sucessão de azevém x arroz sob plantio direto, cada fração granulométrica representou aproximadamente metade do COT, evidenciando a alta labilidade da MO decorrente da baixa taxa de decomposição dos resíduos, no ambiente anaeróbio. Nos sistemas com PC, em todas as camadas, predominou a fração associada aos minerais.

## **2.7 Fracionamento da matéria orgânica do solo**

A MO do solo consiste de um conjunto heterogêneo de compostos orgânicos diferindo em composição, grau de disponibilidade para microbiota e função no ambiente (CARTER, 2001). Os diversos tipos de fracionamento de solo utilizados em estudos da MO buscam justamente reduzir essa heterogeneidade, procurando separar frações homogêneas quanto à natureza, dinâmica e função (CHRISTENSEN, 2001). A escolha do método de fracionamento depende do objetivo do estudo que se conduz, seja ele para caracterização e identificação química de componentes específicos da MO ou para quantificação de compartimentos da MO importantes e sua relação com funções essenciais como a ciclagem e liberação de nutrientes (COLLINS et al., 1997).

### **2.7.1 Fracionamento químico da matéria orgânica do solo**

O fracionamento químico em estudos da MO é um procedimento bastante conhecido. Com base na solubilidade de compostos orgânicos em diferentes pHs, três frações da MO são obtidas pelo fracionamento químico: a fração ácido húmico (AH), solúvel em meio alcalino e insolúvel em meio ácido; a fração ácido fúlvico (AF), solúvel em meio ácido e básico e a fração humina (HU), insolúvel em qualquer pH, a

qual representa a MO associada a fração mineral do solo (STEVENSON; COLE, 1999).

Estudos da MO através da extração e fracionamento de substâncias húmicas têm contribuído para o entendimento da pedogênese, da melhoria das propriedades físicas do solo, das interações organominerais e do impacto da agricultura sobre indicadores da qualidade do solo. Entretanto, os métodos de fracionamento químico pouco têm contribuído para a identificação de compartimentos da MO que diminuam sua magnitude sob manejo intensivo e de modo distinto ao longo do tempo, em virtude de que os AH e AF, em geral, apresentam baixa taxa de transformação e, assim, dificilmente se relacionam com processos de curto prazo (de alguns dias a décadas) (ROSCOE; MACHADO, 2002).

### **2.7.2 Fracionamento físico da matéria orgânica do solo**

Diversos autores têm demonstrado que técnicas de fracionamento físico do solo possibilitam a separação da MO com diferente composição e grau de associação à matriz mineral do solo (CHRISTENSEN, 2001). Tais métodos vêm sendo amplamente utilizados em estudos da MO visando a separação de reservatórios (ROSCOE; MACHADO, 2002).

O fracionamento físico da MO possibilita avaliar a eficiência dos sistemas de manejo em aportar MO lábil ao solo, que posteriormente vai abastecer o compartimento estável da MO (associada aos minerais) (MIELNICZUK, 1999; SALTON et al., 2005).

Os métodos físicos são considerados menos destrutivos e mais relacionados com a função e estrutura da MO *in situ* do que os métodos químicos (CHRISTENSEN, 1996b, 2001). Os métodos de fracionamento físico podem ser granulométricos ou densimétricos, ou a combinação de ambos (ROSCOE; MACHADO, 2002).

#### **2.7.2.1 Fracionamento físico granulométrico da matéria orgânica do solo**

No fracionamento físico granulométrico, a MO é separada com base nos diferentes tamanhos das frações minerais do solo (areia, silte e argila). A fração da MO de tamanho areia ( $>53\mu\text{m}$ ), conhecida como MOP, COP ou CFG, é composta

por materiais orgânicos não complexados, principalmente resíduos vegetais pouco decompostos e facilmente identificados (AMADO et al., 2006; GREGORICH et al., 2006). Em solos cultivados de clima temperado, o CFG corresponde aproximadamente a 10% da MO, enquanto que, em áreas sob vegetação permanente esta fração contribui de forma mais significativa (CHRISTENSEN, 2001). A fração particulada é a fração lábil da MO, aquela que responde prontamente aos sistemas de manejo e uso do solo, especialmente ao aporte de material orgânico ao solo e operações de preparo que alterem os fluxos de água e ar no interior do solo.

A MO recuperada na fração areia apresenta pouca ou nenhuma associação organomineral 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 (SHANG; TIESSEN, 1997; PILLON, 2000) e, devido a essa sensibilidade, pode servir como indicador da qualidade do solo na avaliação de sistemas de manejo e uso (BAYER et al., 2004; CONCEIÇÃO, 2006).

A fração da matéria orgânica associada aos minerais (MAM) ou carbono orgânico associado aos minerais (CAM), é a fração mais estável da MO do solo, não apresentando sensibilidade, em curto prazo, à alterações de práticas de manejo do solo (SALTON et al., 2005). Compõe-se das frações de tamanho silte e argila (<53 $\mu$ m), constituídas de material orgânico mais humificado, como por exemplo, compostos orgânicos remanescentes do processo de degradação e produtos de origem microbiana, e concentram grandes proporções da MO, basicamente por formarem facilmente associações organominerais 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 MO 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 MO.

Outra estratégia metodológica para estudos da dinâmica da MO consiste no fracionamento físico da massa de solo em classes de agregados (SALTON, 2005; ROSCOE; MADAR; MACHADO, 2006). Esta estratégia permite rastrear a movimentação do COT no solo obedecendo a hierarquia de sua organização/associação entre as estruturas orgânicas e inorgânicas (fração mineral).

### 2.7.2.2 Fracionamento físico densimétrico da matéria orgânica do solo

O fracionamento físico densimétrico fundamenta-se na diferença de densidade que há entre a fração orgânica ( $<1,5\text{g cm}^{-3}$ ) e a fração mineral do solo ( $\approx 2,65\text{g cm}^{-3}$ ) (CHRISTENSEN, 1992; ROSCOE; MACHADO, 2002; ROSCOE, MADARI; MACHADO, 2006). Dessa forma, o fracionamento da MO pela flotação em líquidos densos permite separá-la em frações distintas de acordo com sua localização no solo e estágio de decomposição/humificação, com o objetivo de inferir sobre sua dinâmica (GOLCHIN et al., 1994; CONCEIÇÃO, 2006).

A separação da MO por densidade vem sendo utilizada com o objetivo de separar as frações leve e pesada. A fração leve compreende a FLL e FLO da MO, ou seja, a FLL é constituída por materiais orgânicos derivados principalmente de resíduos vegetais, mas contendo quantidades razoáveis de subprodutos microbianos e da microfauna, inclusive hifas fúngicas, esporos, esqueletos, peletes fecais, fragmentos de raízes e sementes. Esta fração pode ser encontrada livre na matriz do solo ou oclusa no interior de agregados (FLO). A FLO compreende um diversificado conjunto de compostos orgânicos, incluindo também resíduos de plantas, peletes fecais, grãos de pólen, pêlos radiculares e estruturas fúngicas, com um tamanho reduzido e um grau de decomposição mais avançado em comparação à FLL (GOLCHIN; BALDOCK; OADES, 1997).

A fração pesada (FP) é constituída por materiais orgânicos em avançado estágio de decomposição fortemente ligados à fração mineral do solo. Esses materiais são, predominantemente, compostos orgânicos com elevada recalcitrância e materiais resistentes, sintetizados pela microbiota durante a decomposição (ROSCOE; MACHADO, 2002).

Como mencionado anteriormente, a FLL é composta por materiais orgânicos ligeiramente decompostos (GOLCHIN et al., 1994) e o único mecanismo de estabilização envolvido na sua proteção é a recalcitrância molecular (ROSCOE; MACHADO, 2002). A FLO (pelo fato de estar oclusa no interior dos agregados) é constituída de materiais orgânicos menores e em estágio mais avançado de decomposição em relação à FLL, incluindo assim resíduos de plantas, estruturas fúngicas e pêlos radiculares (GOLCHIN et al., 1994). No caso da FLO, os mecanismos que atuam na sua estabilização, segundo Roscoe e Machado (2002), são a recalcitrância molecular e a proteção física. A FP, é a fração mais estável no

solo, devido à atuação dos três mecanismos de proteção (ROSCOE; MACHADO, 2002).

A separação e obtenção dessas frações ocorre pela imersão da amostra de solo geralmente em soluções salinas, como o iodeto de sódio (NaI) ou politungstato de sódio  $[\text{Na}_6(\text{H}_2\text{W}_{12}\text{O}_{40})\cdot\text{H}_2\text{O}]$ , com densidades que variam de 1,4 a  $2,2\text{g cm}^{-3}$  (ROSCOE; MACHADO, 2002). Através de uma agitação branda antes da dispersão da amostra, o material que estiver sobrenadando no líquido corresponde à FLL. Em seguida, é procedida a dispersão da amostra (sonicação ou agitação), rompendo-se todos os agregados presentes, obtendo-se a FLO. O material remanescente é denominado de FP (ROSCOE; MACHADO, 2002; DIEKOW, 2003; CONCEIÇÃO, 2006).

## **2.8 Efeito do manejo nas frações da matéria orgânica do solo**

A dinâmica da MO e suas frações no solo, são influenciadas pelo manejo da seguinte forma: inicialmente, nos sistemas com baixa adição de resíduos, ocorre uma rápida mineralização nas frações mais lábeis ( $>53\mu\text{m}$ ). Mantendo-se o revolvimento do solo e a pequena adição de resíduos, ocorrem perdas acentuadas na estabilidade de agregados e a MO localizada no interior dos agregados é mineralizada. Os produtos desta mineralização inicialmente são incorporados nas frações mais finas (silte e argila) e um pequeno decréscimo é observado nos primeiros anos nestas frações. Este processo de perda continua até que a atividade microbiana diminua consideravelmente, atingindo um novo estado de equilíbrio, com baixos estoques de MO. Por outro lado, quando as adições de resíduos ao sistema são maiores que as perdas, inicialmente ocorre acúmulo de MO nas frações mais lábeis, com incremento da estabilidade de agregados. Neste caso, em solos arenosos a formação de macroagregados é importante para a estabilização da MO, enquanto que, em solos argilosos, rapidamente são formados microagregados, os quais protegem a MO do ataque microbiano (PILLON; MIELNICZUK; MARTIN-NETO, 2002).

A composição e o grau de associação da MO com as frações minerais do solo determinam a magnitude do efeito do manejo ao longo do tempo. Em geral, todas as frações de tamanho da MO são afetadas pelo manejo ao longo do tempo. No entanto, os maiores efeitos são observados nas frações mais



grosseiras (BAYER, 1996; PILLON, 2000). Bayer (1996) verificou que a taxa de decomposição da MO na fração  $>53\mu\text{m}$  em PC e PD em um Argissolo Vermelho, foi respectivamente de 4,5 e 3,4 vezes maior do que nas frações de tamanho  $<53\mu\text{m}$ .

Guo e Gifford (2002) e Mendham et al. (2004) também concluíram que o CFG pode ser usado como indicador sensível à mudança de uso do solo, quando observaram que a concentração de CFG foi maior no solo sob eucalipto, em virtude da maior deposição de resíduo orgânico por essa cultura quando a mata nativa foi substituída por eucalipto e ao comparar plantios de *Eucalyptus globulus* com idade de 11–14 anos com pastagem.

Em um Latossolo sob experimento de longa duração (21 anos) em PD e PC, Costa et al. (2004) observaram que as maiores alterações nos estoques de C ocorreram na camada superficial do solo (0,00 – 0,05m), onde o CFG apresentou-se 58% superior no PD em relação ao PC, enquanto que para o COT foi de apenas 32%. O aumento relativo dos estoques de CFG foi relativamente maior que para o COT, demonstrando que a fração lábil da MO foi mais sensível às mudanças do manejo que a MO total do solo.

Pinheiro et al. (2004a), trabalhando em um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso observaram que os teores de C e N da FLL apresentaram diferenças nos sistemas de preparo e cobertura vegetal, seguindo na ordem gramínea>cultivo mínimo>plantio em nível = plantio convencional e sem cobertura vegetal, e que os teores de C da FLL demonstraram ser mais sensíveis quando comparados aos da FLO na avaliação dos diferentes sistemas de preparo do solo, podendo a FLL se utilizada como indicador da redução do estoque de MO.

Lima et al. (2008) observaram que o estoque de C na FLL foi maior para solos sob eucalipto na camada de 0,00 – 0,10m em relação ao solo sob pastagem, mas não observaram diferença entre o solo sob mata nativa e a área sob eucalipto. Assim, esses incrementos de C da FLL sob cultivo de eucalipto, principalmente nas camadas superficiais, em comparação à pastagem, refletem maior deposição de resíduos no solo, evidenciando que a FLL pode ser utilizada como indicador sensível para detectar mudanças na qualidade do solo com diferentes sistemas de uso e manejo.

## **2.9 Caracterização qualitativa da matéria orgânica do solo**

O uso de técnicas espectroscópicas para a análise de fibras e proteínas em forragens e grãos têm sido estudada há décadas e o interesse em aplicá-las para estudos qualitativos de características e propriedades do solo é recente (MADARI et al., 2006), fato que possivelmente se deve ao grande volume de informações sobre os estoques de MO comparando com as informações referentes à influência das práticas de manejo sobre suas características qualitativas, como recalitrância molecular, concentração de grupos funcionais e outras (DIECKOW et al., 2005).

As características químicas da MO indicam a qualidade das práticas de manejo adotadas. A labilidade da MO, por exemplo, reflete a ação de mecanismos de proteção física das estruturas orgânicas mais lábeis contra o ataque microbiano por mecanismos como a agregação do solo, o qual é normalmente intensificado por sistemas conservacionistas de manejo. Por outro lado, a maior concentração de estruturas recalitrantes é um indicativo de que o material lábil está sendo mineralizado de forma acelerada, um processo típico em solos manejados convencionalmente através do preparo com arações e gradagens (DIECKOW et al., 2005).

A seguir, são descritas as técnicas de Fluorescência Induzida à Laser (FIL), Espectroscopia com Transformada de Fourier por Transmissão (FTIR), Ressonância Paramagnética Eletrônica (EPR) e Ressonância Magnética Nuclear (RMN). Técnicas estas utilizadas na avaliação da qualidade da MO.

### **2.9.1 Fluorescência Induzida a Laser (FIL)**

A técnica de Fluorescência Induzida à Laser (FIL) aplicada a solos é um método relativamente novo, que tem se mostrado eficiente na análise da MO de solo inteiro, sendo uma técnica ágil, limpa e em condições próximas às naturais do solo (MILORI et al., 2006). Segundo estes autores, a origem da fluorescência induzida à laser é a MO, excitando-se preferencialmente as estruturas mais recalitrantes, ou seja, cuja concentração aumenta no processo de humificação, sendo principalmente grupos funcionais ricos em ligações insaturadas, tais como OH fenólicos livres e ligados, estruturas de quinona, grupos carboxílicos ligados e anéis aromáticos que estão presentes na MO mais humificada.

Simplicidade, sensibilidade e rapidez são vantagens do uso desta técnica, além de não ter impedimento analítico, como a Ressonância Paramagnética Eletrônica (EPR), a Ressonância Magnética Nuclear (RMN) e o Infravermelho com Transformada de Fourier, em relação ao Fe paramagnético podendo, por isso, ser usada para determinar o grau de humificação do solo sem a necessidade da extração ácida (FAVORETTO et al. 2008).

Favoretto et al. (2008) analisaram por FIL um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de manejo e verificaram que o solo sob PD apresentou menor humificação quando comparado com o cultivo mínimo e preparo convencional.

### **2.9.2 Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier por Transmitância (FTIR)**

A espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier por Transmitância (FTIR) é uma técnica rápida, econômica, não destrutiva e muito utilizada em mineralogia e em ciência do solo (RUSSELL; FRASER, 1994). Esta técnica, aplicada ao estudo de análises químicas estruturais é baseada na absorção de radiação infravermelha pelos modos de vibração das ligações entre os átomos.

A espectroscopia de FTIR se baseia no fato que os diversos tipos de ligações químicas e de estruturas moleculares existentes numa molécula absorvem radiação eletromagnética na região do infravermelho, em comprimentos de onda característicos e, como consequência, os átomos envolvidos entram em vibração. Num espectrofotômetro de FTIR, a percentagem de radiação transmitida pela amostra num intervalo de comprimento de onda de 2,5 a 25 $\mu\text{m}$  (infravermelho fundamental, número de onda de 4000 a 400 $\text{cm}^{-1}$ ) é registrada, resultando num espectro contínuo de bandas de absorção (CERETA et al., 2008). Na análise de amostras de solo e/ou MO, esta espectroscopia é utilizada para identificar grupos carboxilas, hidroxilas, aminas, amidas, estruturas alifáticas e aromáticas, dentre outros (Tab. 1) (STEVENSON, 1994; GUIMARÃES, 2006).

**Tabela 1.** Atribuição das principais bandas de absorção no infravermelho de substâncias húmicas.

Nº de ondas (cm <sup>-1</sup> )	Atribuições
3400 - 3300	Estiramentos O-H e N-H inter e intamolecular.
2940 - 2840	Estiramento C-H alifáticos.
1725 - 1720	Estiramento C=O de COOH e cetonas (traços).
1660 - 1630	Estiramentos C=O de amidas (amida I), C=O de quinona e/ou C=O ligados ao H de cetonas conjugadas.
1630 - 1600	Estiramento C=C aromático.
1650 - 1580	Estiramento COO <sup>-</sup> simétrico.
1590 - 1517	Deformação N-H e estiramento C=N.
1460 - 1435	Estiramento C-H alifático e de grupos metila.
1400 - 1380	Deformação OH e estiramento C-O de OH fenólico, deformação C-H de CH <sub>2</sub> e CH <sub>3</sub> , estiramento COO <sup>-</sup> assimétrico.
1280 - 1200	Estiramento C-O e deformação OH de COOH, estiramento C-O (de aril-éteres, ésteres, aromático e fenólico).
1170 - 1100	Estiramento C-O de estruturas tipo polissacarídeos.
1031	Estiramento Si-O (impurezas inorgânicas).

Fonte: CERETA et al., (2008).

A importância da espectroscopia de infravermelho no estudo de substâncias húmicas reside no fato de, através dela, ser possível: i) obter informações sobre a natureza, a reatividade e o arranjo estrutural dos grupos funcionais oxigenados presentes; ii) identificar a ocorrência de estruturas de carboidratos e proteínas; iii) estabelecer a presença ou ausência de impurezas inorgânicas (metais, argilo-minerais); iv) realizar análises qualitativas sob condições controladas e; v) analisar as interações entre MO – metal e MO - pesticida (STEVENSON, 1994).

Silva; Dick e Inda Júnior (2008) analisaram por FTIR diferentes tipos de solo coletados na camada de 0,00 a 0,10m sob campo nativo da região de Campos de Cima da Serra do RS. Em todos os espectros dos solos analisados, esses autores observaram bandas em 3697 e 3622cm<sup>-1</sup>, atribuídas às vibrações OH da ligação Al-OH, além de uma banda em 1084cm<sup>-1</sup> referente às vibrações O-Al-OH. Essas bandas indicam a presença de caulinita, que foi confirmada pela vibração de Si-O

em  $1009\text{cm}^{-1}$ . A banda em  $1635\text{cm}^{-1}$  é usualmente atribuída à presença de água estrutural e a banda em  $1034\text{cm}^{-1}$  é atribuída a ligação Si-O de quartzo. Um triplete entre  $3600$  e  $3400\text{cm}^{-1}$  foi observado no Neossolo, típico de vibração O-Al-OH da gibbsita, indica a presença deste mineral neste solo. No espectro da amostra do Gleissolo, as bandas de caulinita e da gibbsita foram menos pronunciadas devido ao alto teor de MO, neste solo as bandas de absorção devido à MO foram comparativamente melhor definidas, destacando-se:  $3438\text{cm}^{-1}$  (estiramento de O-H em sobreposição à banda de gibbsita),  $2922$  e  $2855\text{cm}^{-1}$  (estiramento C-H de grupos alifáticos),  $1728\text{cm}^{-1}$  (estiramento de C=O de COOH), dubleto em  $1635$  e  $1390\text{cm}^{-1}$  (estiramento C=O de  $\text{COO}^-$ , em sobreposição à de  $\text{H}_2\text{O}$  estrutural). Essa composição foi semelhante em todos os solos analisados, e é típica de MO humificada.

Dick et al. (2008a), avaliaram amostras de um Latossolo Vermelho nas camadas  $0,00$  a  $0,20\text{m}$ ,  $0,20$  a  $0,40\text{m}$  e  $0,40$  a  $0,60\text{m}$  e observaram nos espectros de FTIR do solo não tratado com ácido fluorídrico, que apenas na camada  $0,00$  a  $0,05\text{m}$  foram observadas bandas de absorção referentes à presença da MO. Nessas amostras, as bandas de estiramento dos grupos C-H foram identificadas na região de  $2.922$  e  $2.850\text{cm}^{-1}$ . Nas outras camadas, o teor de MO foi insuficiente para se sobrepor à absorção dos minerais, cujas principais bandas foram em  $3.697$  e  $3.627\text{cm}^{-1}$ , atribuídos aos estiramentos externo e interno de Al-OH da caulinita, e  $1.094$ ,  $1.034$ ,  $1.009$  e  $915\text{cm}^{-1}$  das vibrações do Si-O da caulinita e do quartzo. Os espectros de FTIR da MO tratada com ácido fluorídrico apresentaram padrão típico de MO humificada, cujas principais bandas de absorção foram semelhantes às observadas nos espectros da vegetação. Os espectros diferiram, entretanto, quanto à posição de algumas bandas de absorção. O estiramento C=O da carboxila na MO tratada com ácido fluorídrico (HF) ocorreu em número de onda  $1.717\text{cm}^{-1}$ , menor do que na vegetação ( $1.733\text{cm}^{-1}$ ), indicando que, na MO humificada, este grupo funcional encontra-se conjugado às estruturas mais condensadas comparativamente à vegetação.

### **2.9.3 Ressonância Paramagnética Eletrônica (EPR)**

Os materiais orgânicos e as substâncias húmicas apresentam radicais livres orgânicos em sua estrutura, os quais podem estar envolvidos em processos

químicos, bioquímicos e fotoquímicos do solo. Os radicais livres e os metais paramagnéticos ( $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{V}^{4+}$  e  $\text{Mn}^{2+}$ ), possuem um ou mais elétrons desemparelhados e podem produzir sinais de EPR (PILLON; MIELNICZUK; MARTIN NETO, 2002).

A espectroscopia de EPR é não destrutiva e pode fornecer informações sobre: i) a natureza e concentração de radicais livres presentes nas moléculas orgânicas e suas mudanças em função de fatores ambientais e de sua interação com o meio e; ii) o tipo e a simetria dos sítios de coordenação, a identificação dos átomos e grupos ligantes e as formas e estabilidade dos ligantes envolvidos na associação de substâncias húmicas com metais paramagnéticos (SENESI, 1990).

A técnica de EPR tem sido utilizada na quantificação do número de radicais livres semiquinona (MARTIN-NETO et al., 1991) em AH e AF, o que se caracteriza numa avaliação qualitativa da fração húmica da MO. A técnica também tem sido utilizada no estudo da MO, em amostras de solo fracionadas fisicamente (MARTIN-NETO et al., 1994; BAYER, 1996). Neste caso, o objetivo principal é reduzir o risco de alterações da MO, as quais podem ocorrer durante o fracionamento químico.

Bayer et al. (2000b) avaliaram o efeito dos sistemas de cultura após 12 anos sob PD, sobre o estoque e a qualidade da MO da camada de 0,00 – 0,25m do solo, medidos através do grau de humificação da MO em agregados organominerais e nos AH. Os resultados indicaram menor grau de humificação da MO de amostras de agregados organominerais ( $<53\mu\text{m}$ ) e dos AH dos sistemas com maior adição de resíduos culturais, indicando um caráter menos condensado, mais alifático das substâncias orgânicas adicionadas ao solo pelos sistemas de cultura, quando comparado à MO nativa do solo.

Bayer (1996) avaliou através de EPR, o efeito dos sistemas de manejo sobre a concentração de radicais livres semiquinona na MO em três solos (Argissolo Vermelho amarelo, Argissolo Vermelho escuro e Latossolo Roxo) aplicando a técnica de EPR em agregados organominerais de diferentes tamanhos de partículas ( $>150\mu\text{m}$ ,  $53 - 150\mu\text{m}$ ,  $20 - 53\mu\text{m}$ ,  $2 - 20\mu\text{m}$  e  $<2\mu\text{m}$ ) obtidos por fracionamento físico. No Argissolo Vermelho escuro, as amostras foram coletadas em experimentos com nove anos de duração, sob PD e PC. Os espectros apresentaram um sinal típico de radical livre estável que, conforme suas características foram identificados como oriundos de radicais livres semiquinona presente na fração húmica da MO. O sinal praticamente não foi observado nas frações  $>150\mu\text{m}$  e  $53 - 150\mu\text{m}$  e aumentou

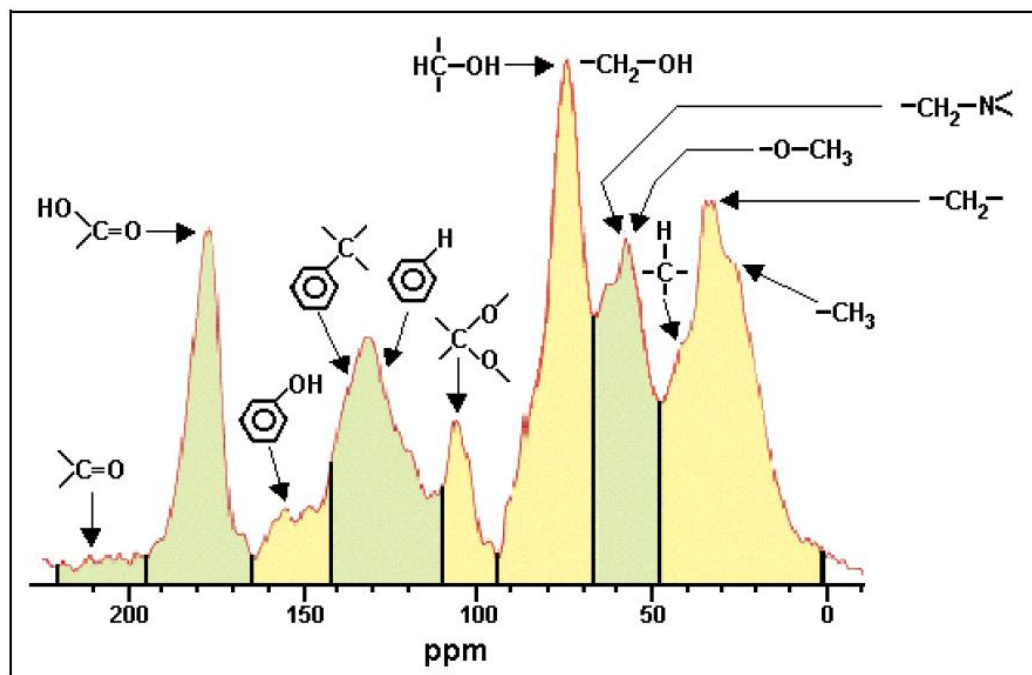
de intensidade com a diminuição do tamanho da partícula dos agregados organominerais, o que foi atribuído ao maior grau de humificação da MO presente nas frações <53µm. Nas frações 20 - 53µm e 2 - 20µm, ocorreu um aumento da concentração de radicais semiquinona com a utilização do PC, comparativamente ao PD, o que deve-se à decomposição preferencial das frações orgânicas alifáticas em relação às aromáticas. Na fração <2µm, esse comportamento não foi observado devido à estabilização física da MO nessa fração ser predominante, decorrente da maior concentração de minerais, como óxidos de Fe e caulinita.

#### **2.9.4 Ressonância Magnética Nuclear (RMN)**

Através da Espectroscopia de Ressonância Magnética Nuclear do  $^{13}\text{C}$  (RMN), 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. Desta forma, pode-se monitorar as alterações químicas e estruturais da MO decorrentes do tipo de uso e manejo do solo. A RMN  $^{13}\text{C}$  no estado sólido é bastante utilizada porque possibilita o estudo de substâncias pouco solúveis além de ser uma análise não destrutiva, preservando a amostra para outras determinações (ABREU JR. et al., 2009).

Os principais grupos funcionais detectados por RMN  $^{13}\text{C}$  no estado sólido são: 0 - 45ppm: grupos alifáticos; 45 - 60ppm: metoxil e N-alifáticos; 60 - 110ppm: O-alifáticos; 110 - 140ppm: aromáticos; 140 - 160ppm: fenólicos; 160 - 185ppm: carboxílicos; e 185 - 230ppm: carbonílicos (Fig. 2) (ABREU JR. et al., 2009).

Dick et al. (2008b) avaliaram por espectroscopia de RMN  $^{13}\text{C}$  amostras de MO de Neossolos, Gleissolos, Cambissolos e Latossolos sob pastagem nativa nos Campos de Cima da Serra e verificaram a predominância de grupos C-alquil substituído (C-di-O-alquil/C-O-alquil + N-alquil/C- metoxil), cuja proporção variou de 52% a 59%. Em sequência, os grupos C-alquil foram os mais abundantes (18% a 23%), seguidos de estruturas aromáticas (15% a 19%), de carboxilas (6,4% a 8,5%) e de carbonilas (0,3% a 1,4%). As elevadas percentagens de estruturas C-O-alquil totais nos solos estudados indicaram a presença em abundância de estruturas tipo polissacarídeos na MO.



**Figura 2.** Espectro de RMN  $^{13}\text{C}$  típico de ácido húmico (AH) mostrando os grupos funcionais associados às bandas correspondentes (SKJEMSTAD; JANIK; TAYLOR, 1998).

A razão entre as proporções de C-O-álquil/C-álquil pode ser um indicativo do grau de decomposição dos compostos orgânicos. Esta razão foi calculada por Rosa (2010) que verificou decréscimo na ordem FLL>FLO, evidenciando maior grau de humificação da FLO. Os maiores valores para a razão C-O-álquil/C-álquil foram observados no sistema natural, tanto na FLL como na FLO, indicando que os sistemas submetidos ao cultivo agrícola, independente da forma de preparo, proporcionaram uma maior decomposição dos resíduos orgânicos.

No presente trabalho, algumas técnicas analíticas e espectroscópicas são utilizadas para compreender a dinâmica da MO, com ênfase aos mecanismos de proteção e estabilização, os quais determinam o seu acúmulo no solo e a contribuição dos sistemas de uso e de manejo para a qualidade ambiental. A possibilidade da realização de estudos detalhados em áreas do Bioma Pampa com potencial para uso agrícola, pecuária ou florestal representa uma oportunidade para compreender a dinâmica da MO em ambiente subtropical.



### **3 ESTUDO 1. ESTOQUE E QUALIDADE DA MATÉRIA ORGÂNICA DE UM ARGISSOLO VERMELHO DERIVADO DE ARENITO NO BIOMA PAMPA**

#### **3.1 Introdução**

A região Sudoeste do Estado do Rio Grande do Sul, área considerada de alta vulnerabilidade sócio-econômica, por possuir extensas áreas de formações areníticas as quais sofrem alterações dos padrões de vegetação devido à redução da cobertura vegetal e, conseqüentemente, o aumento da erosão desses solos, resultam em degradação do ecossistema regional (Bioma Pampa). A fragilidade natural desses solos aliada a sua baixa aptidão para agricultura e o uso tradicional da terra para a criação extensiva de gado, têm acelerado o processo de erosão, ampliando gradativamente as áreas com vegetação rarefeita e os campos arenizados (RIBASKI et al. 2009).

Os sistemas agrosilvipastoris são uma estratégia alternativa de utilização dessas áreas, e consistem em uma combinação natural ou uma associação deliberada de um ou de vários componentes lenhosos (arbustivos e/ou arbóreos) dentro de uma pastagem de espécies de gramíneas e de leguminosas herbáceas nativas ou cultivadas, e sua utilização por ruminantes e herbívoros em pastoreio (RIBASKI et al. 2009).

O desenvolvimento de sistemas agrosilvipastoris tem sido preconizado como uma importante alternativa de uso sustentável da terra, principalmente em áreas sujeitas à degradação (RIBASKI et al., 2005). A deposição de folhas pela parte aérea pode influenciar na quantidade e disponibilidade de nutrientes pela maior quantidade de MO depositada (BURESH e TIAN, 1997).

A quantidade e a qualidade dos resíduos culturais aportados pelos sistemas de uso do solo têm fundamental importância na manutenção ou recuperação da qualidade do solo. De acordo com Skorupa (2001), a quantidade média de serrapilheira em plantações de eucalipto em idade comercial no Brasil está em torno de  $11 \text{ Mg ha}^{-1}$  por ocasião do corte, e resíduos de colheita podem aportar  $30 \text{ Mg ha}^{-1}$  adicionais na forma de raízes, folhas, galhos e cascas. Entretanto, a maior concentração de lignina e as altas relações C/N no tecido vegetal das plantas de eucalipto influenciam a atividade microbiana do solo (MENDHAM et al., 2004), e

podem dificultar a conversão de resíduos culturais em MO, possivelmente pela baixa disponibilidade de N (FORRESTER et al., 2006).

Neste sentido, as características químicas da MO indicam a qualidade das práticas de manejo adotadas. A labilidade da MO, por exemplo, reflete a natureza, a composição química dos resíduos culturais e a ação de mecanismos de proteção física das estruturas orgânicas mais lábeis contra o ataque microbiano por mecanismos como a agregação do solo, o qual é normalmente intensificado por sistemas conservacionistas de manejo. Por outro lado, a maior concentração de estruturas recalcitrantes é um indicativo de que o material lábil está sendo mineralizado de forma acelerada, um processo típico em solos manejados convencionalmente através do preparo com arações e gradagens (DIECKOW et al., 2005).

Considerando limitado o número de trabalhos técnicos científicos em solos arenosos do Sudoeste do estado do Rio Grande do Sul, o presente estudo visa avaliar quantitativamente e qualitativamente as frações físicas, bem como a contribuição relativa dos mecanismos de proteção da matéria orgânica em um Argissolo Vermelho quando em uso com sistema agrosilvipastoril e eucalipto no município de Alegrete, RS.

### **3.2 Material e Métodos**

O estudo foi realizado na estância Sá Brito no Município de Alegrete (RS). O clima da região é subtropical, temperado quente, com chuvas bem distribuídas e estações bem definidas (Cfa na classificação de Köppen). A temperatura média anual é de 18,6°C, variando entre 13,1°C em julho e 35,8°C em Janeiro. A formação de geadas ocorrem eventualmente entre Maio e Setembro.

O solo da área é um Argissolo Vermelho Eutrófico arênico A moderado textura arenosa/média fase relevo suave ondulado (SANTOS et al., 2006). A distribuição granulométrica, teor de carbono orgânico total (COT), saturação de bases (V) e soma de bases (S) nos horizontes superficiais do solo, anterior a instalação dos sistemas de uso encontram-se na Tabela 1.

**Tabela 1.** Teor de areia, silte, argila, carbono orgânico total (COT), saturação de bases (V) e soma de bases (S) de horizontes de um Argissolo Vermelho. Alegrete-RS, 2008. Média de três repetições.

Horizonte	Camadas	Areia	Silte	Argila	COT	V	S
	m	----- g kg <sup>-1</sup> -----				%	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>
A <sub>1</sub>	0 – 0,26	900	30	70	11,0	27	0,9
A <sub>2</sub>	0,26 – 0,71	860	30	110	8,4	42	1,3
Bt <sub>1</sub>	0,71 – 1,12	800	30	170	5,0	49	2,2
Bt <sub>2</sub>	1,12 – 2,00	740	20	240	3,8	52	3,2

A implantação dos sistemas de uso do solo ocorreu no mês de julho de 2002 sob campo nativo. A coleta de solo ocorreu em fevereiro de 2007 em três áreas.

A área sob floresta homogênea de eucalipto (FH) está localizada entre as coordenadas 29°59'55" S e 55°47'29" W (Anexo A), representa um florestamento homogêneo de *Eucalyptus grandis* (Anexo B) implantado em uma área de aproximadamente um hectare. A distância entrelinhas de plantio é de 3m e entre plantas de 1,5m, sendo a densidade do eucalipto de 1.111 plantas ha<sup>-1</sup>. A amostragem de solo, nesta área foi realizada na entrelinha de plantio do eucalipto.

A área sob sistema agrosilvipastoril (SA) está localizada entre as coordenadas 29°59'53" S e 55°47'34" W (Anexo A). Neste sistema, foram utilizadas linhas de plantio triplas de *Eucalyptus grandis* distanciadas de 3m em 3m; o espaçamento entre plantas nas linhas foi de 1,5m. As linhas triplas de plantio de *Eucalyptus grandis* foram distanciadas entre si por uma faixa de 14m (entrelinha do sistema agrosilvipastoril). Nesta faixa de 14m nos dois primeiros anos de implantação dos sistemas de uso, o produtor optou pelo cultivo de grãos em rotação de aveia (*Avena L.*), sorgo (*Sorghum bicolor L.*) e milho (*Zea mays*) em plantio direto. Nos anos seguintes, foi cultivado grama forquilha (*Paspalum notatum* Flugge) e aveia preta (*Avena stringosa*) como coberturas de inverno, milheto (*Pennisetum glaucum*) e consorcio de pensacola (*Paspalum notatum* Saurae) + braquiária brizanta (*Brachiaria brizantha*) como coberturas de verão. A densidade do eucalipto neste sistema é de 1.000 plantas ha<sup>-1</sup>, distribuídos em uma área de aproximadamente quatro hectares. As amostras de solo nesta área foram coletadas na entrelinha, ou seja, nos 14 m, cujas espécies de forrageiras são utilizadas para pecuária extensiva. A intensidade de pastejo é de uma cabeça de gado por hectare.

A área de campo nativo (CN) é adjacente às demais, está localizada nas coordenadas 29°59'57" S e 55°47'29" W (Anexo A), representa cobertura remanescente de vegetação nativa da região, composta principalmente por grama forquilha (*Paspalum notatum* Flugge). Assim como o sistema agrosilvipastoril, esta área também apresentava-se em uso pela pecuária, sendo também a intensidade de pastejo de uma cabeça de gado por hectare.

Em cada área, amostraram-se três trincheiras alocadas aleatoriamente sendo coletadas amostras de solo em duas camadas (0,000 - 0,025m e 0,025 - 0,075m). As amostras deformadas e indeformadas serviram para a quantificação de carbono orgânico total e da densidade do solo, respectivamente. As análises de densidade do solo foram realizadas conforme Embrapa (1997). Os dados de densidade (Apêndice B) foram utilizados para auxílio no cálculo dos estoques de carbono (C) e nitrogênio (N).

A distribuição granulométrica, realizada conforme Embrapa (1997) nas camadas de 0,000 - 0,025m e de 0,025 - 0,075m, encontra-se na Tabela 2.

**Tabela 2.** Teores de areia, silte e argila ( $\text{g kg}^{-1}$ ) e classe textural de um Argissolo Vermelho sob sistemas de uso e camadas. Alegrete - RS, 2008.

Sistemas*	Areia	Silte	Argila	Classe textural
0,000 – 0,025m				
FH	883,67	41,90	76,43	Areia
SA	892,67	43,43	63,90	Areia
CN	886,33	57,90	55,77	Areia
0,025 – 0,075m				
FH	898,67	25,83	77,50	Areia
SA	908,33	27,23	64,43	Areia
CN	897,67	30,17	72,17	Areia

\*FH = floresta homogênea de eucalipto; SA = sistema agrosilvipastoril na entrelinha e CN = campo nativo.

As amostras deformadas foram espalhadas em bandejas para secagem a sombra até atingirem a umidade correspondente ao ponto de friabilidade, sendo, destorroadas manualmente de forma suave para não provocar compactação ou ruptura dos agregados. Posteriormente, as amostras de solo foram peneiradas em malha de 8,00mm de diâmetro e divididas em duas partes, a primeira foi macerada

em almofariz de ágata para a determinação de COT e NT, e a outra foi destinada ao fracionamento físico granulométrico e densimétrico.

O fracionamento físico granulométrico foi realizado conforme Cambardella e Elliott (1992) (Anexo C). O C oriundo do material retido na peneira (0,053mm) correspondeu ao carbono da fração grosseira (CFG), enquanto que, o carbono associado aos minerais (CAM) foi obtido por diferença entre o COT e o CFG.

O fracionamento físico densimétrico foi realizado conforme Conceição et al. (2008) (Anexo D), utilizando-se uma solução de politungstato de sódio de  $2,0\text{g cm}^{-3}$ . A energia de dispersão por ultra-som foi de  $250\text{J mL}^{-1}$ , a qual, foi determinada previamente através de uma curva de dispersão onde foram aplicados níveis crescentes de energia, com o objetivo de determinar o ponto de dispersão total de agregados do solo em partículas primárias. O C da fração pesada (FP) foi obtido por diferença entre o COT do solo e o carbono da fração leve livre (FLL) adicionado do carbono da fração leve oclusa (FLO).

Os teores de COT e de NT presentes na massa de solo, no CFG, na FLL e FLO foram quantificados por oxidação a seco em um analisador elementar da marca LECO. A quantificação do estoque foi estabelecida pelo produto de carbono e de nitrogênio, pela massa considerando a densidade e o volume de cada camada de solo.

Para o cálculo total acumulado na camada de 0,000 - 0,075m somaram-se os valores obtidos nas duas camadas amostradas.

A avaliação do grau de humificação da MO do solo na camada superficial (0,000 - 0,025m), foi realizada através da espectroscopia de Fluorescência Induzida à Laser (FIL). O equipamento foi desenvolvido pela Embrapa Instrumentação Agropecuária e possui um laser de diodo (Coherent - CUBE) emitindo em 405nm com potência máxima de 50mW, acoplado a um cabo óptico composto por seis fibras ópticas (Ocean Optics) que excitam a amostra e uma fibra óptica central que coleta o sinal de fluorescência do solo.

Para a realização das medidas de FIL, amostras de solo da camada superficial, peneiradas (8,00mm) e moídas foram colocadas em um porta-amostra com janela de quartzo, onde foram realizadas três medidas por 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 sob o espectro de emissão de fluorescência

(ACF), compreendida entre 475 e 800nm, e o valor do teor de COT presente na amostra (MILORI et al., 2006).

As amostras provenientes do fracionamento físico densimétrico (FLL e FLO) da camada superficial (0,000 - 0,025m) foram submetidas ao tratamento com solução aquosa de HF 10%, segundo metodologia descrita em Dick et al. (2005; 2006). Após o tratamento com HF, foi realizada a análise de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR), Ressonância Paramagnética Eletrônica (EPR) e Ressonância Magnética Nuclear (RMN).

Os espectros de FTIR por absorvância foram registrados em espectrofotômetro Bomem FTIR, série MB100 utilizando-se pastilhas preparadas com misturas de aproximadamente 1mg de amostra e 99mg de KBr de grau espectroscópico. Para cada espectro foram somadas 32 varreduras com resolução de  $2\text{cm}^{-1}$  na região de  $4000$  a  $400\text{cm}^{-1}$ .

Para a análise de EPR, as amostras foram finamente pulverizadas e colocadas em tubos de quartzo de 4mm de diâmetro. Os espectros foram registrados em temperatura ambiente ( $\sim 300\text{K}$ ) e de  $\text{N}_2$  líquido ( $77\text{K}$ ) utilizando-se espectrômetro BRUKER EMX micro operando em banda-X ( $9,5\text{GHz}$ ), empregando  $100\text{kHz}$  de frequência de modulação. Os dados de EPR foram submetidos à simulação e tratamento com auxílio dos programas Win-EPR<sup>®</sup> e SimFonia<sup>®</sup>. As análises de FTIR e de EPR, foram realizadas no Laboratório de Projetos e Processos Ambientais da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.

Os espectros de RMN  $^{13}\text{C}$  das frações FLL e FLO no estado sólido, foram obtidas por Polarização Cruzada com rotação segundo ângulo mágico (RMN  $^{13}\text{C}$  CP/MAS), em um espectrômetro Varian (Unity Inova 400), com sonda para amostras sólidas (5mm) operando em uma frequência para o  $^{13}\text{C}$  de  $100,57\text{MHz}$ . A velocidade de rotação no ângulo mágico foi de  $8\text{kHz}$ . As condições de análise foram: tempo de espera de 1s, tempo de contato de 1ms e tempo de aquisição  $12,8\text{ms}$ .

Os espectros foram divididos em sete regiões de deslocamento químico, que correspondem a diferentes tipos de carbono: 0 – 45ppm C-alquil (alifáticos não substituídos), 45 – 60ppm (metoxil e N-alifáticos), 60 – 110ppm (O-alifáticos), 110 – 140ppm (aromáticos), 140 – 160ppm (fenólicos), 160 – 185ppm (carboxílicos) e 185 – 230ppm (carbonílicos) (ABREU JR. et al., 2009). A quantificação relativa 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. Foi utilizado o Hexametil Benzeno (HMB) como referência de posição espectral (17,2ppm).

As análises de FIL e de RMN, foram realizadas na Embrapa Instrumentação Agropecuária, São Carlos, SP.

Os estoques de COT e NT do solo e das frações físicas da MO foram submetidos à análise de variância e comparados pelo teste t e diferença mínima significativa à 5% de probabilidade.

### **3.3 Resultados e Discussão**

Os diferentes sistemas de uso do solo influenciaram o estoque de COT, NT, CFG, CAM, FLL e FLO na camada superficial (0,000 - 0,025m) (Tab. 3), sendo que, de forma geral, os estoques mais elevados foram observados na floresta homogênea de eucalipto (FH). Este fato, possivelmente pode ser justificado pelo maior aporte de resíduos culturais depositados em superfície por este sistema, comparativamente aos demais.

Pulrolnik et al. (2009) verificaram aumento no estoque de COT e da FLL em um Latossolo Vermelho sob cultivo de eucalipto, cujo aporte de resíduos culturais e de matéria seca da serrapilheira foi de 46% e 64% superior ao Cerrado e a pastagem, respectivamente.

Segundo Six et al. (2002b), a FLL é composta basicamente por resíduos vegetais parcialmente decompostos e é fortemente influenciada pela quantidade e qualidade de resíduo depositado no solo. Assim, esses incrementos da fração FLL, principalmente nas camadas superficiais nos solos sob eucalipto, em comparação à pastagem, refletem a maior deposição de resíduos culturais que, ao contrário da pastagem, ocorre principalmente na superfície do solo (LIMA et al., 2008).

Comportamento semelhante foi observado por Lima et al. (2008) trabalhando em um Latossolo Vermelho no Vale do Rio Doce em MG, onde os maiores estoques de COT e FLL foram obtidos no solo sob cultivo de eucalipto em relação a pastagem. Porém de forma oposta ao observado no presente trabalho, os mesmos autores avaliando a distribuição do C das frações lábeis no perfil não observaram diferenças no estoque de C da FLO quando compararam o solo sob eucalipto com mata nativa e pastagem.

**Tabela 3.** Estoque de carbono orgânico total (COT), nitrogênio total (NT), relação carbono/nitrogênio (C/N), carbono da fração grosseira (CFG), carbono associado aos minerais (CAM), carbono da fração leve livre (FLL), carbono da fração leve oclusa (FLO) e carbono da fração pesada (FP) de um Argissolo Vermelho sob sistemas de uso e camadas. Alegrete - RS, 2008.

Sistemas*	COT	NT	C/N	CFG	CAM	FLL	FLO	FP
	----- Mg ha <sup>-1</sup> ----			----- Mg ha <sup>-1</sup> -----				
	0,000 – 0,025m							
FH	3,82 a	0,33 a	11,36	1,89 a	1,93 a	1,57 a	0,79 a	1,45 a
SA	2,88 b	0,17 c	18,80	1,48 b	1,40 c	1,12 b	0,46 c	1,30 a
CN	3,03 b	0,29 b	10,39	1,33 b	1,70 b	0,62 c	0,65 b	1,76 a
	0,025 – 0,075m							
FH	5,50 a	0,53 a	10,46	2,22 a	3,28 a	0,48 a	0,45 b	4,57 a
SA	4,68 b	0,34 c	13,66	2,02 b	2,66 a	0,26 b	0,32 c	4,10 a
CN	5,23 a	0,42 b	12,57	2,15 a	3,08 a	0,45 a	0,57 a	4,21 a
	0,000 – 0,075m**							
FH	9,32 a	0,86 a	10,84	4,11 a	5,21 a	2,05 a	1,24 a	6,02 a
SA	7,56 c	0,51 c	14,82	3,49 b	4,06 c	1,38 b	0,78 b	5,40 a
CN	8,26 b	0,71 b	11,63	3,48 b	4,78 b	1,07 b	1,22 a	5,97 a

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna em cada camada não diferem entre si pelo teste t que considera diferença mínima significativa a 5%.

\*FH = floresta homogênea de eucalipto; SA = sistema agrosilvipastoril na entrelinha e CN = campo nativo.

\*\*Valores obtidos pela soma das duas camadas amostradas.

O maior estoque de NT na FH, corrobora com Rangel e Silva (2007), que encontraram maior estoque sob cultivo de eucalipto em um Latossolo Vermelho, atribuindo ao maior aporte de resíduos culturais adicionados ao solo e, adicionalmente ao maior estoque de COT observado neste sistema.

Analisando os valores da camada superficial, menor estoque de COT, NT, CAM, FLO e FP, foram verificados no sistema agrosilvipastoril (SA) (Tab. 3), fato este, justificado possivelmente pelas reduções no aporte de resíduos da biomassa vegetal e/ou consequência do cultivo em que a área foi submetida nos dois primeiros anos. Neves et al. (2004) também encontraram menores teores de COT em SA, atribuindo o efeito ao pastejo o qual contribui para a redução da biomassa vegetal sobre o solo.

Na camada de 0,025 - 0,075m, observou-se maior estoque de COT, CFG e FLL na FH e no CN, enquanto que, o NT foi maior somente na FH e a FLO no CN



(Tab. 2). Diante deste contexto, Guo e Gifford (2002) não observaram diferenças nos estoques de COT do solo quando a mata nativa foi substituída por eucalipto. Mesma tendência foi verificada por Mendham et al. (2004) quando compararam plantações de eucalipto com pastagem. Essas tendências podem sofrer alterações com o decorrer do tempo, já que em sistemas conservacionistas, os incrementos significativos na MO ocorrem em superfície para os primeiros anos e em maiores profundidades com o decorrer do tempo (SANTOS; TOMM, 2003).

Mendham et al. (2004) observaram que o estoque de CFG foi maior no solo sob eucalipto, comparativamente a pastagem indicando alto potencial desta cultura em depositar resíduos culturais na superfície do solo, atribuindo essa diferença a natureza física e química da serrapilheira de eucalipto, oriundo principalmente de materiais grosseiros, sendo menos susceptível à fragmentação devido a quantidade de lignina e tanino.

Na camada de 0,025 - 0,075m, a FLL da floresta homogênea (FH) não diferenciou do campo nativo (CN) (Tab. 3). Estes resultados estão de acordo com Lima et al. (2008), os quais observaram para um Latossolo da região do Vale do Rio Doce em Minas Gerais, que o estoque de C na FLL foi maior para o solo sob eucalipto até 0,10m em relação ao solo sob pastagem, não sendo observada diferença em relação ao solo sob mata.

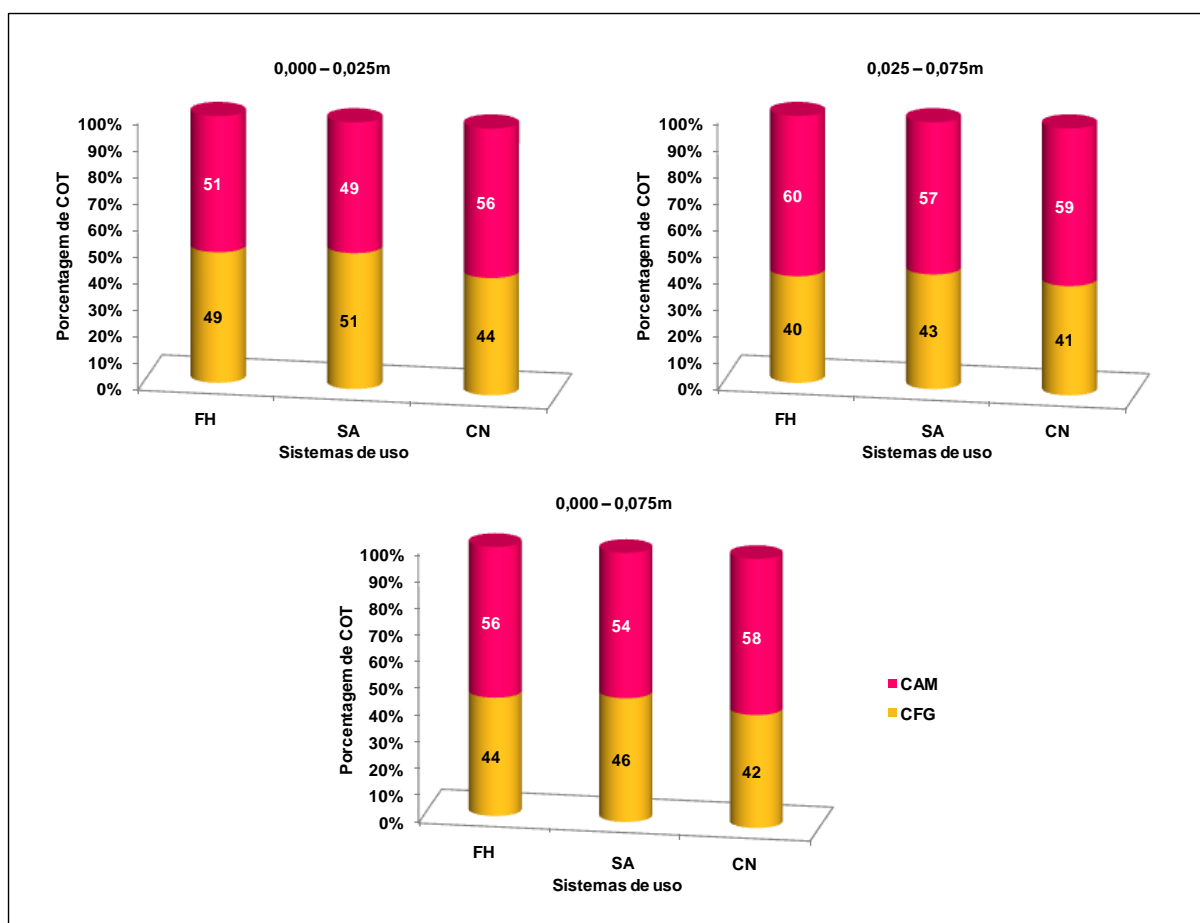
Diferenças foram observadas na camada de 0,025 - 0,075m, sendo que o estoque de C na FLO decresceu na ordem CN>FH>SA (Tab. 3), indicando possivelmente que sistemas naturais, de baixa intervenção antrópica, possuem maior capacidade para proteger fisicamente a MO no interior de agregados estáveis.

Conforme observado na Tabela 3, os sistemas de uso do solo influenciaram o estoque de COT, NT, CFG, CAM, FLL e FLO acumulado na camada 0,000 a 0,075m, sendo que, de forma geral, maiores estoques foram verificados na floresta homogênea de eucalipto (FH).

O C da FP não foi influenciado pelos sistemas de uso nas camadas de solo avaliadas (Tab. 3), possivelmente devido ao curto período de tempo após a implantação dos sistemas (cinco anos). A FP é constituída por materiais orgânicos em avançado estágio de decomposição, sendo fortemente ligados à fração mineral do solo (estabilidade química) e localizado no interior de microagregados estáveis (proteção física), além da sua maior recalcitrância química decorrente da sua composição (BAYER, 1996). Como a FP apresenta uma ciclagem lenta, faz-se

necessário um período maior para que sejam observadas alterações nos solos sob diferenciados sistemas de uso (BAYER et al. 2004).

O CFG é composto principalmente por resíduos culturais em vários estágios de decomposição. Em geral, se encontra em menor proporção, contribuindo com cerca de 3 a 20% do COT (SILVA; MENDONÇA, 2007). Nesse estudo, o CFG acumulado na camada de 0,000 a 0,075m, representou 42%, 44% e 46% do COT no CN, FH e SA respectivamente, (Fig. 1). Costa et al. (2004) encontraram valores entre 26% e 31% respectivamente em PC e PD na camada de 0,00 a 0,05m trabalhando em um Latossolo Vermelho.

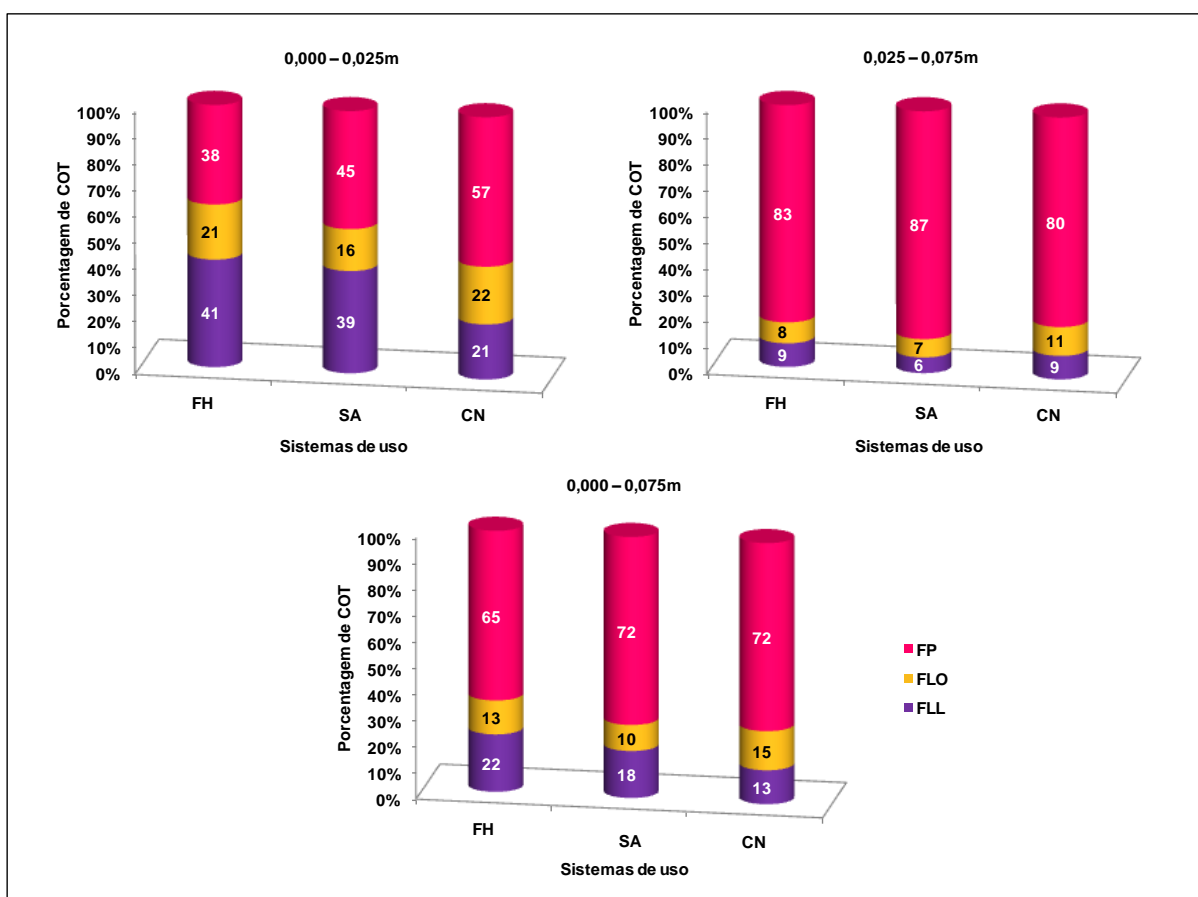


**Figura 1.** Proporção de carbono da fração grosseira (CFG) e carbono associado aos minerais (CAM) de um Argissolo Vermelho sob sistemas de uso e camadas. Alegrete - RS, 2008. FH = floresta homogênea de eucalipto; SA = sistema agrosilvipastoril na entrelinha e CN = campo nativo. Na camada de 0,000 a 0,075m são mostrados os valores obtidos pela soma das duas camadas amostradas.

Considerando que neste ambiente o solo apresenta baixa capacidade de proteção da MO, pois o teor de argila é baixo e a formação de agregados estáveis é

prejudicada pela presença de minerais de tamanho areia, maiores proporções relativas de CFG são coerentes com a baixa capacidade da fração mineral em manter um maior estoque relativo de CAM, o que impõe uma condição de alta vulnerabilidade deste agroecossistema, especialmente se as adições de resíduos culturais ao solo forem reduzidas ou sazonais.

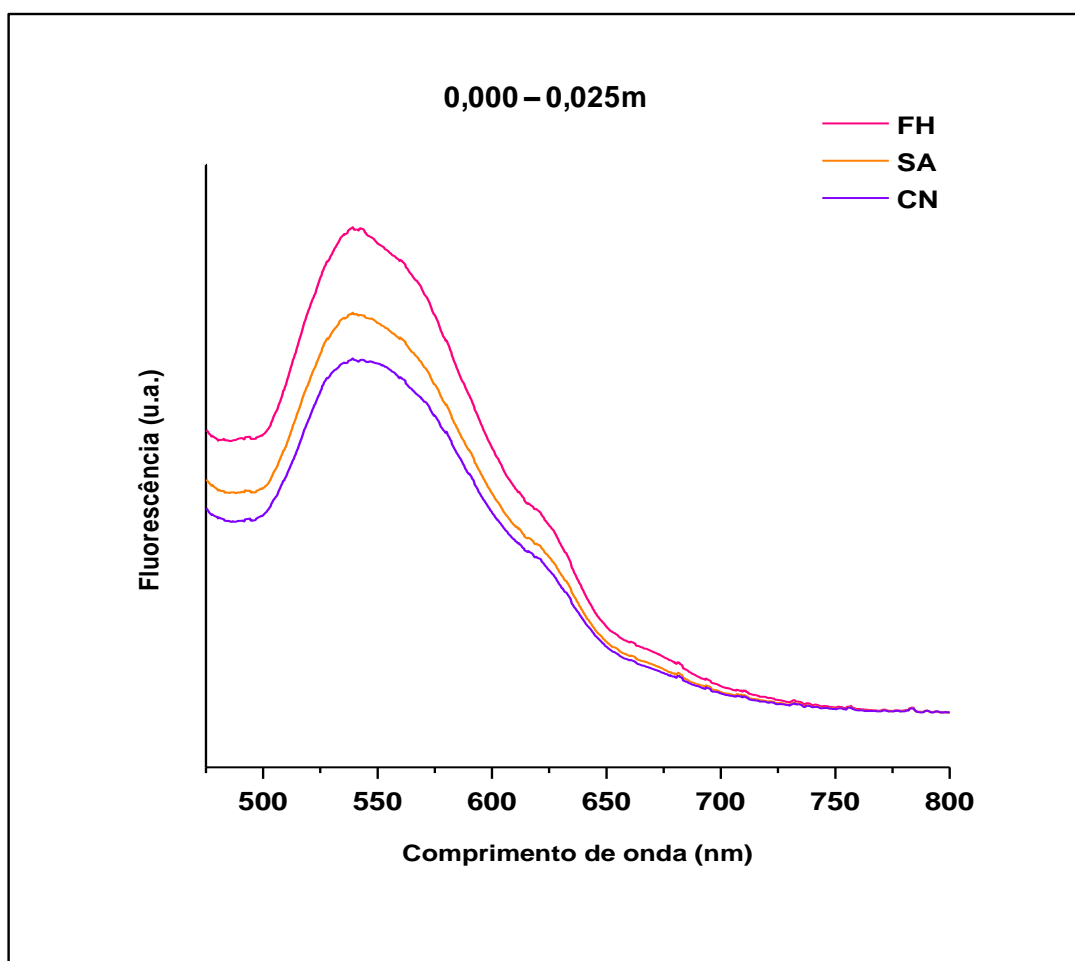
Observando as proporções de cada fração densimétrica no solo (Fig. 2) pode-se inferir sobre a magnitude dos mecanismos de estabilidade da MO. Com exceção do CN, na camada superficial (0,000 - 0,025m) a FLL representou, em média na FH e no SA, 40% do estoque de COT do solo, e a FP, representou, 42%, indicando que o mecanismo de recalitrância molecular da MO e a interação do material orgânico com os minerais do solo tem elevada importância diante da estabilidade decorrente da oclusão em agregados (FLO 19%).



**Figura 2.** Proporção de carbono da fração leve livre (FLL), fração leve oclusa (FLO) e fração pesada (FP) de um Argissolo Vermelho sob sistemas de uso e camadas. Alegrete-RS, 2008. FH = floresta homogênea de eucalipto; SA = sistema agrosilvipastoril na entrelinha e CN = campo nativo. Na camada de 0,000 a 0,075m são mostrados valores obtidos pela soma das duas camadas amostradas.

Para a camada de 0,025 - 0,075m e o acumulado na camada de 0,000 a 0,075m, o C da FP esteve mais atuante em todos os sistemas de uso (Fig. 2). Para a camada de 0,025 - 0,075m, essas maiores proporções de PF possivelmente estejam relacionadas ao aumento da fração argila nesta profundidade (Tab. 2), o que determina o incremento da interação da MO com os minerais do solo.

Na Figura 3 observam-se os espectros de FIL do solo sob sistemas de uso, a origem da Fluorescência Induzida à Laser é a MO, está preferencialmente nas estruturas mais recalcitrantes. As áreas sob as curvas, normalizadas pelo teor de C, fornecem um índice que pode ser diretamente relacionado com o grau de humificação da MOS ( $H_{FIL}$ ) (Tab. 4).



**Figura 3.** Espectros e Fluorescência Induzida à Laser (FIL) de um Argissolo Vermelho sob sistemas de uso. Alegrete - RS, 2010. FH = floresta homogênea de eucalipto; SA = sistema agrosilvipastoril na entrelinha e CN = campo nativo.

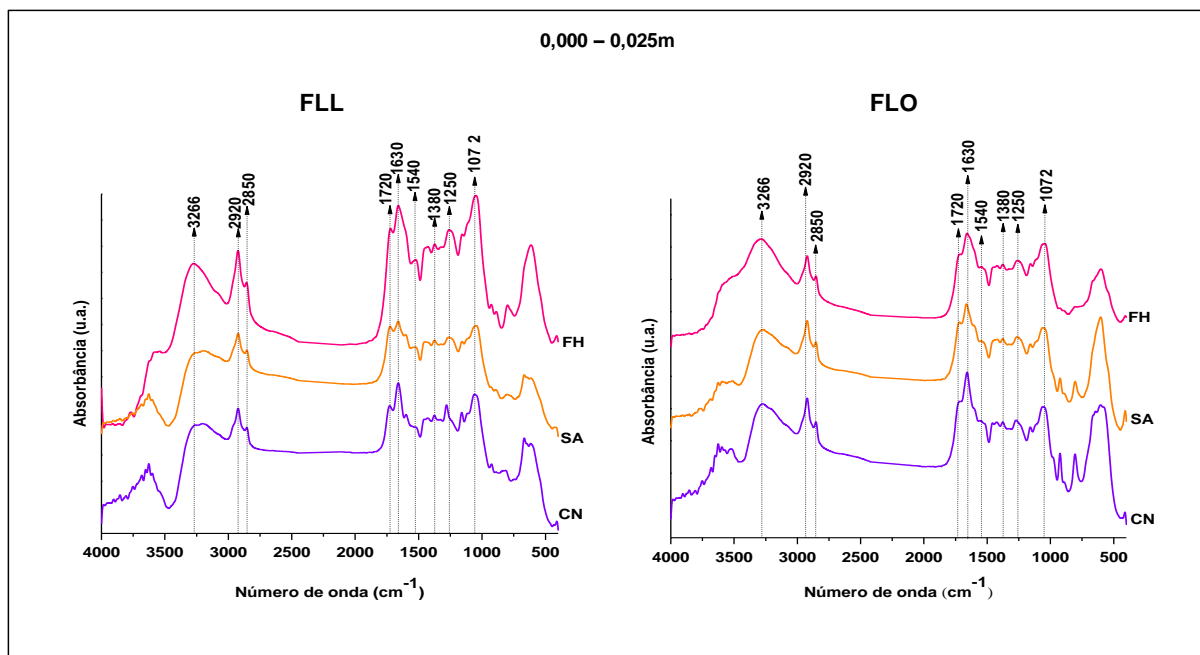
**Tabela 4.** Grau de humificação ( $H_{FIL}$ ) de um Argissolo Vermelho sob sistemas de uso na camada de 0,000 - 0,025m. Alegrete - RS, 2010.

Sistemas*	$H_{FIL}$
FH	26.685
SA	29.919
CN	24.534

\*FH = floresta homogênea de eucalipto; SA = sistema agrosilvipastoril na entrelinha e CN = campo nativo.

Nos sistemas analisados, o maior grau de humificação foi encontrado no sistema agrosilvipastoril (SA) seguido pela floresta homogênea (FH) (Tab. 4). O maior grau de humificação verificado no SA pode ser justificado pelo cultivo em que foi submetida a área nos dois primeiros anos. Possivelmente, durante o preparo, houve desagregação do solo e/ou redução da biomassa vegetal pela introdução do gado no sistema SA, com isso, reduziu a proteção física das frações mais lábeis, acelerando assim a sua decomposição. Milori et al. (2005) analisando amostras de solo por FIL sob diferentes sistemas de manejo, encontraram menor humificação da MO nos solos sob PD em comparação ao PC, evidenciando que o revolvimento do solo quebra os agregados e expõe a MO à decomposição.

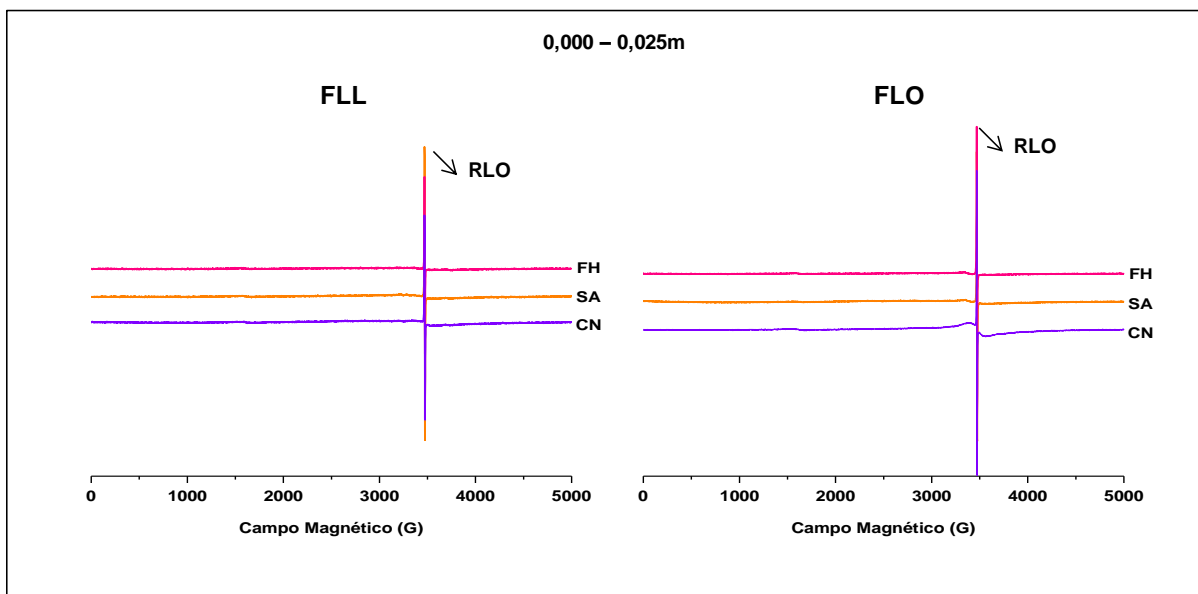
Os espectros de FTIR para as amostras da FLL e FLO da MO mostraram-se semelhantes para os sistemas de uso do solo (Fig. 4). Em função das amostras terem sido submetidas ao tratamento com HF 10%, as bandas atribuídas a estruturas inorgânicas (região de  $3700\text{cm}^{-1}$  e  $1000\text{cm}^{-1}$ ) apresentam-se pouco intensas. As seguintes bandas e respectivas atribuições foram identificadas: bandas de absorção em  $3266\text{cm}^{-1}$  atribuídas a grupamentos OH ligados a estruturas aromáticas que compõe a MO e as substâncias húmicas presentes no solo (SILVA; DICK; INDA JÚNIOR, 2008), além de estiramento vibracional ( $\nu$ ) de grupos AIO-H de argilas e oxihidróxidos ( $\nu$  FeO-H e  $\nu$  SiO-H de argilas) (SILVERSTEIN; WEBSTER 1998; NAYAKN; SINGH, 2007).



**Figura 4.** Espectros de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) da fração leve livre (FLL) e fração leve oclusa (FLO) de um Argissolo Vermelho sob sistemas de uso. Alegrete - RS, 2008. FH = floresta homogênea de eucalipto; SA = sistema agrosilvipastoril na entrelinha e CN = campo nativo.

Nas regiões de  $2920\text{cm}^{-1}$  e  $2850\text{cm}^{-1}$  encontram-se duas bandas referentes ao estiramento dos grupos C-H alifáticos de ésteres ou C=O de cetonas (Fig 4). A banda em  $1720\text{cm}^{-1}$  é atribuída ao estiramento C=O do grupo carboxílico e a banda em  $1630\text{cm}^{-1}$  refere-se à vibração C=C aromática, com contribuição de C=O de  $\text{COO}^-$ . Em  $1540\text{cm}^{-1}$  observa-se banda referente à deformação N-H e ao estiramento C=N. A banda pouco intensa observada na região entre  $1300$  e  $1400\text{cm}^{-1}$  é atribuída à ligação C-H alifático. Em  $1250\text{cm}^{-1}$  observa-se banda característica de estiramento C-O e à deformação OH de grupo carboxílico e a banda em  $1072\text{cm}^{-1}$  é atribuída à ligação C-O de carboidratos (DICK et al., 2008a).

Através dos espectros de EPR observam-se linhas estreitas referentes a presença de radical livre orgânico (RLO) (Fig. 5), tanto para a FLL como para a FLO. Segundo Kögel – Knaber; Zech e Hatcher (1991), o sinal de RLO oriundo de solos detectáveis através do EPR é atribuído a estruturas em sistema  $\pi$  orgânico. Quanto maior a concentração desses radicais, maior a humificação da MO. Normalmente a maior humificação está relacionada à formação de compostos aromáticos.



**Figura 5.** Espectros de Ressonância Paramagnética Eletrônica (EPR) da fração leve livre (FLL) e fração leve oclusa (FLO) de um Argissolo Vermelho sob sistemas de uso. Alegrete - RS, 2008. FH = Floresta homogênea de eucalipto; SA = Sistema agrosilvipastoril na entrelinha e CN = Campo nativo.

A partir dos espectros de EPR em 50G, foram calculados os valores de densidade de spins ( $\text{spin g}^{-1}$ ) e o fator g para a FLL e FLO da MO (Tab. 5). Os fatores g das amostras estudadas, em torno de 2,003, indicam que os RLO localizam-se próximos a átomos de carbono da estrutura orgânica do material, sugerindo a presença de estruturas aromáticas mais conjugadas (cadeias mais longas).

**Tabela 5.** Radical livre orgânico (RLO) e fator g calculado a partir da Ressonância Paramagnética Eletrônica (EPR) da fração leve livre (FLL) e fração leve oclusa (FLO) de um Argissolo Vermelho sob sistemas de uso na camada de 0,000 - 0,025m. Alegrete - RS, 2008.

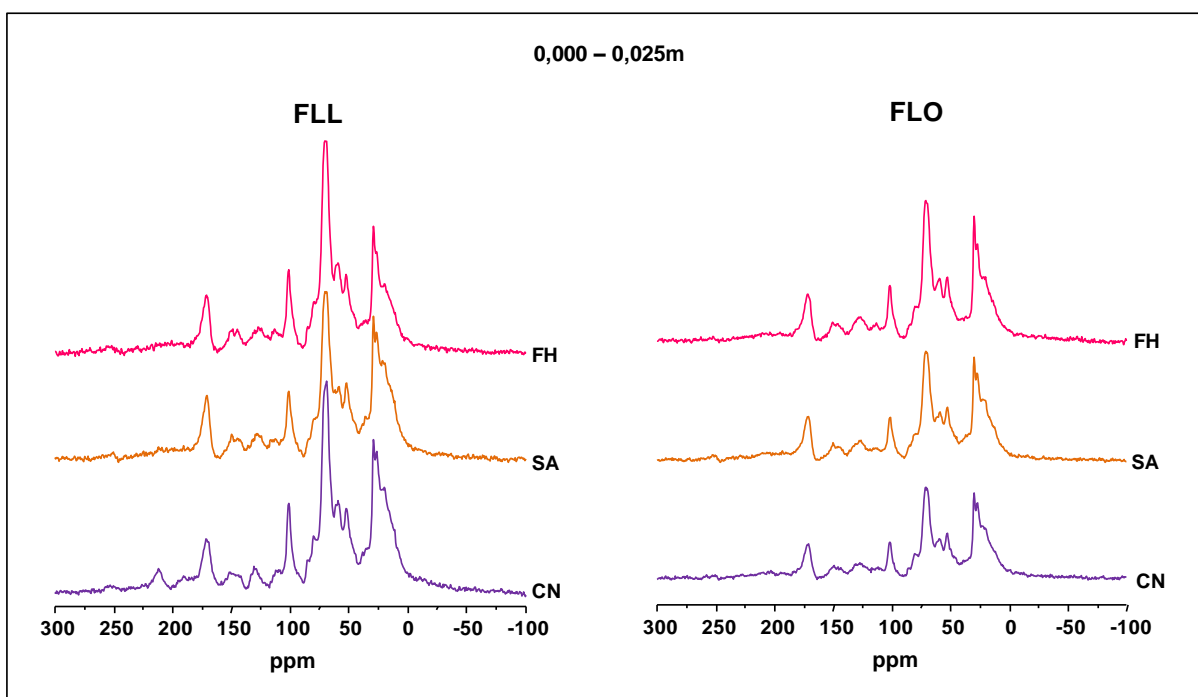
Sistemas*	RLO		RLO	
	(spins/g ( $10^{16}$ ))	Fator g	(spins/g ( $10^{16}$ ))	Fator g
	-----FLL-----		-----FLO-----	
FH	2,14	2, 0034	5,35	2, 0033
SA	3,31	2, 0033	3,68	2, 0031
CN	2,30	2, 0033	4,72	2, 0032

\*FH = floresta homogênea de eucalipto; SA = sistema agrosilvipastoril na entrelinha e CN = campo nativo.

Segundo Senesi (1990), este valor do fator  $g$  é característico de RLO possivelmente conjugado com anéis aromáticos na MO. As densidades de spins  $g^{-1}$  da FLL e FLO são relativamente baixas, mas típicas de material orgânico.

As densidades de spins da FLL e FLO são baixas, sendo que, para a FLO é um pouco mais alta (Tab. 5), indicando maior transformação de sua estrutura em decorrência do processo de humificação desta fração.

De modo geral, os espectros RMN do  $^{13}\text{C}$  da FLL e da FLO na camada de 0,000 - 0,025m, mostraram-se semelhantes para os diferentes sistemas de uso avaliados (Fig. 6). Na região entre 25-35ppm, o sinal de C-alkil é de metileno, derivado de longas cadeias alifáticas provenientes principalmente de óleos, ceras e ácidos graxos. A região compreendida entre 45 e 60ppm corresponde principalmente à fração metoxila (principalmente resíduos de lignina) e N-alkil proveniente de resíduos estáveis de proteína. Na região do C-O-alkil (60-110ppm), podem-se observar dois picos distintos, onde o pico em 72-75ppm é atribuído à celulose e em 105ppm, são derivados de hemicelulose e outros carboidratos. A intensidade do sinal entre 160-230ppm corresponde, em parte, a grupos carboxílicos de ácidos orgânicos (KÖGEL-KNABNER, 2002).



**Figura 6.** Espectroscopia de Ressonância Magnética Nuclear (RMN do  $^{13}\text{C}$ ) da fração leve livre (FLL) e fração leve oclusa (FLO) de um Argissolo Vermelho sob sistemas de uso. Alegrete - RS, 2010. FH = Floresta homogênea de eucalipto; SA = Sistema agrossilvipastoril na entrelinha e CN = Campo nativo.



A distribuição relativa dos grupos funcionais observados nos espectros pode ser visualizada na Tabela 6. Em todas as amostras, os principais sinais foram observados nos mesmos deslocamentos químicos. Em geral, nos diferentes sistemas de uso do solo, houve predominância de grupos C-alquil substituído (C-O-alquil/C-di-O-alquil + N-alquil/C-metoxil), cuja proporção variou de 41% a 50%, seguido do grupo C-alquil (27% a 34%). As estruturas aromáticas (C-aromático + C-fenólicos) contribuíram com aproximadamente 11% da composição das amostras, as carboxilas com 8% e as carbonil com 6%.

Similar a este estudo, Diekow (2003), Helfrich et al. (2006) e Dick et al. (2008b), também encontraram maiores proporções nas estruturas C-O-alquil/C-di-O-alquil avaliando o solo inteiro e as frações da MO em diferentes tipos de solos.

As elevadas porcentagens de grupos C-alquil substituídos nos sistemas de uso analisados, indicam a presença em abundância de estruturas provenientes principalmente de resíduos de estruturas alifáticas como óleos e ácidos graxos. Considerando que estes componentes são facilmente decompostos, pois são preferencialmente atacados pelos microrganismos, a MO do solo pode ser considerada de baixo grau de decomposição (DICK et al., 2008b).

**Tabela 6.** Distribuição percentual dos grupos funcionais de carbono (C) determinados por Ressonância Magnética Nuclear (RMN  $^{13}\text{C}$  CP/MAS) da fração leve livre (FLL) e fração leve oclusa (FLO) de um Argissolo Vermelho sob sistemas de uso na camada de 0,000 - 0,025m. Alegrete - RS, 2010.

Sistemas*	Distribuição de tipos de C/deslocamento químico (ppm)							
	N-alqui		C-O-alquil		C-aromático	C-fenólico	C-carboxil	C-carbonil
	C-alquil	C-metoxil	C-di-O- alquil					
0 - 45	45 - 60	60 - 110	110 - 140	140 - 160	160 - 185	185 - 230		
	FLL							
FH	33	11	32	7	4	8	5	
SA	32	11	35	5	4	7	6	
CN	27	11	39	7	4	7	5	
	FLO							
FH	32	14	28	8	4	8	6	
SA	32	11	31	8	4	8	6	
CN	30	11	34	8	4	8	5	

\*FH = floresta homogênea de eucalipto; SA = sistema agrosilvipastoril na entrelinha e CN = campo nativo.

Analisando a composição química da FLL da MO, as proporções de C-O-alquil/C-di-O-alquil + N-alquil/C-metoxil, variaram de 43% a 50% para os sistemas FH e CN, respectivamente (Tab. 6). Para o C-alquil, estas proporções variaram de 27 a 33% para a CN e FH respectivamente. A maior proporção de C-O-alquil/C-di-O-alquil (60-110) observada no CN é esperada já que gramíneas são mais ricas em celulose que espécies lenhosas.

Com relação às estruturas aromáticas (C-aromático + C-fenólico), a composição química foi similar entre os sistemas de uso, aproximadamente 10%, com predominância na fração FLO (Tab. 6).

Essas maiores proporções verificadas no C-O-alquil/C-di-O-alquil + N-alquil/C-metoxil em relação às estruturas aromáticas, demonstram que os carboidratos são os principais constituintes orgânicos do solo, apesar de baixa recalitrância molecular. Este fato associado aos compostos aromáticos que correspondem a proporções menores é um indicativo de que a proteção coloidal e a proteção física da MO, estejam sobrepondo a magnitude da proteção por recalitrância (DIEKOW, 2003).

Na FLO foi verificada proporção similar entre os grupos funcionais de C em relação a FLL (Tab. 6). Porém, na média dos sistemas de uso do solo houve um decréscimo de 3% da FLL em relação a FLO para o grupamento C-alquil substituído, evidenciando decréscimos de estruturas alifáticas como por exemplo polissacarídeos e carboidratos da FLL para a FLO, corroborando com Kölbl e Kögel-Knabner (2004).

### **3.4 Conclusões**

O cultivo de eucalipto em solos com textura predominantemente arenosa promoveu o aumento do estoque de carbono orgânico total, nitrogênio total no solo, carbono da fração grosseira, carbono associado aos minerais e de carbono nas frações leve livre e leve oclusa da matéria orgânica quando comparado ao campo nativo na camada superficial.

Na camada superficial (0,000 – 0,025m), os mecanismos de proteção da matéria orgânica por recalitrância molecular e estabilização química estão sobrepondo a estabilidade decorrente da oclusão em agregados.

Para a camada de 0,025 – 0,075m a estabilidade da matéria orgânica deve-se principalmente a fração pesada.

No sistema agrosilvipastoril as amostras de solo apresentaram matéria orgânica mais humificada quando comparada com a floresta homogênea de eucalipto e o do campo nativo.

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.

## **4 ESTUDO 2. FRAÇÕES FÍSICAS E HUMIFICAÇÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA EM AGREGADOS DE UM ARGISSOLO VERMELHO DERIVADO DE ARENITO**

### **4.1 Introdução**

Na região da Fronteira Oeste do estado do Rio Grande do Sul, os solos originários das formações areníticas da Era Mesozóica apresentam limitações naturais relacionadas, principalmente, à fertilidade e às erosões eólica e hídrica, o que tem favorecido a formação de áreas arenizadas. Estes fatores, aliados à baixa aptidão agrícola e ao uso inadequado da terra, têm incrementado progressivamente a degradação dos solos, diminuindo a qualidade de vida dos agricultores desta região (RIBASKI et al., 2001).

Uma das alternativas identificadas pelos agricultores é a implantação de sistemas agrosilvipastoris. O emprego desses sistemas tem sido visualizado como uma importante estratégia de uso sustentável, principalmente em áreas potencialmente sujeitas a degradação e, também, como uma nova fonte de agregação de valor econômico na propriedade rural através da exploração da madeira (RIBASKI et al., 2009).

No Brasil, a maior área de florestas plantadas é constituída pelo eucalipto, que, além do suprimento de madeira, contribui para o sequestro de CO<sub>2</sub> da atmosfera. Todavia, há pouca informação sobre a taxa de acúmulo, dinâmica e qualidade da MO nos solos sob cultivo de eucalipto e como eles se comparam com outros sistemas de uso (PULROLNIK, et al. 2009).

A ligação da MO com os minerais do solo leva a formação de agregados estáveis (TISADALL; OADES, 1982). Neste processo de agregação, ocorrem diferentes tipos de interação entre partículas minerais e orgânicas. A magnitude dos mecanismos envolvidos nessa interação é que define 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 MO.

As alterações provocadas na MO pelo uso do solo podem ser quantificadas através do fracionamento físico da MO. Em curto prazo, alterações na proporção das frações lábeis da MO, como o carbono da fração grosseira (CFG), fração leve livre (FLL) e fração leve oclusa (FLO), fornecem informações importantes sobre a

sustentabilidade ambiental e sobre o sistema de uso e manejo. Adicionalmente, associado ao fracionamento físico, tem sido utilizadas diferentes técnicas espectroscópicas que permitem informações importantes sobre a qualidade e a humificação da MO, permitindo correções nas estratégias de uso e de manejo adotadas.

Neste contexto, o presente trabalho objetiva gerar informações sobre os sistemas de uso do solo, em áreas arenizadas do Bioma Pampa, no que diz respeito ao estoque de carbono orgânico total do solo, das frações físicas e o grau de humificação da matéria orgânica em classes de agregados de um Argissolo Vermelho quando em uso com sistema agrosilvipastoril e eucalipto no município de Alegrete, RS.

## **4.2 Material e Métodos**

A área de coleta, o tipo de solo, as camadas amostradas e os procedimentos de coleta correspondem aos mesmos apresentados no item 3.2 do Estudo 1.

As amostras deformadas foram espalhadas em bandejas para secagem a sombra até atingirem a umidade correspondente ao ponto de friabilidade, sendo, em seguida, destorroadas manualmente de forma suave para não provocar compactação ou ruptura dos agregados. Posteriormente, as amostras foram pesadas e peneiradas para a separação em classes de tamanho de agregados (8,00 - 4,76mm; 4,76 - 2,00mm; 2,00 - 1,00mm; 1,00 - 0,50mm; 0,50 - 0,25mm e <0,25mm). Após o peneiramento o solo retido em cada peneira foi pesado novamente.

O processo de peneiramento foi realizado manualmente, agitando-se o conjunto de peneiras por 15 vezes no sentido vai-e-vem, girando-as a 90° e repetindo-se mais 15 agitações.

O solo retido em cada peneira, depois de pesado, foi dividido em duas partes: a primeira foi macerada em almofariz de ágata para a determinação de COT, e a outra foi destinada ao fracionamento físico granulométrico e densimétrico, sendo estes, realizados conforme descritos no item 3.2 do Estudo 1.

Os teores de COT do solo, de CFG, da FLL e da FLO em cada classe de agregados foram quantificados pela oxidação a seco em um analisador elementar da marca LECO. A quantificação do estoque de C foi estabelecida pelo produto de C

correspondente à quantidade de agregados retidos em cada peneira pela massa de solo considerando a densidade e o volume de cada camada.

Para o cálculo do estoque de COT, CFG, FLL, FLO e FP acumulado na camada de 0,000 a 0,075m somaram-se os valores obtidos nas duas camadas amostradas.

A porcentagem de agregados estáveis seco (AES) foi obtida através da quantidade de solo retida em cada peneira dividindo-se pelo somatório obtido em todas as peneiras.

As análises de FIL, FTIR e EPR foram realizadas conforme descritas no capítulo item 3.2 do Estudo 1.

Devido ao elevado custo das técnicas e do tempo para realização das análises, foram selecionadas amostras provenientes do fracionamento físico densimétrico da MO (FLL e FLO) da camada superficial (0,000 – 0,025m) sob campo nativo para as análises de FTIR e EPR. Essas amostras foram submetidas ao tratamento com solução aquosa de HF 10%, segundo metodologia descrita em Dick et al. (2005; 2006).

Os estoques de C do solo e das frações físicas da MO foram submetidos à análise da variância, ao teste t e análises de regressão linear ao nível de 5%, com o auxílio do software SAS.

### **4.3 Resultados e Discussão**

Entre os sistemas de uso do solo, as diferenças estatísticas apontam maior estoque de COT na camada superficial para a floresta homogênea de eucalipto (FH) entre as classes de agregados de 8,00 a 2,00mm (Tab. 1). Mesmo não sendo verificadas diferenças entre as classes de agregados de 2,00 a 0,50mm, os valores absolutos demonstram que na FH observaram-se os maiores estoques de COT. Para o estoque acumulado na camada de 0,000 a 0,075m, a FH foi maior nas classes que compreendem de 8,00 a 1,00mm, possivelmente, em decorrência da maior deposição de resíduos culturais em superfície neste sistema.

**Tabela 1.** Estoque de carbono orgânico total (COT) ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) em classes de agregados de um Argissolo Vermelho sob sistemas de uso e camadas. Alegrete - RS, 2008.

Sistemas*	Classe de diâmetro (mm)					
	8,00 - 4,76	4,76 - 2,00	2,00 - 1,00	1,00 - 0,50	0,50 - 0,25	< 0,25
	0,000 – 0,025m					
FH	0,44 aBC	0,90 aAB	0,83 aABC	1,37 aA	0,64 aBC	0,25 aC
SA	0,16 bB	0,50 bB	0,51 aB	1,21 aA	0,72 aAB	0,33 aB
CN	0,24 bA	0,47 bA	0,33 aA	1,14 aA	0,87 aA	0,33 aA
	0,025 – 0,075m					
FH	0,55 aB	0,88 aB	0,66 aB	3,04 aA	0,98 aB	0,46 aB
SA	0,30 aB	0,45 aB	0,27 aB	3,62 aA	0,66 aB	0,49 aB
CN	0,48 aA	0,94 aA	0,91 aA	1,64 aA	1,18 aA	0,68 aA
	0,000 – 0,075m**					
FH	0,99 aB	1,78 aB	1,49 aB	4,41 aA	1,62 aB	0,72 aB
SA	0,45 aB	0,95 aB	0,78 aB	4,83 aA	1,39 aB	0,82 aB
CN	0,72 aA	1,42 aA	1,24 aA	2,78 aA	2,05 aA	1,01 aA

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna em cada camada e maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste t que considera a diferença mínima significativa a 5%.

\*FH = floresta homogênea de eucalipto; SA = sistema agrosilvipastoril na entrelinha e CN = campo nativo.

\*\*Valores obtidos pela soma das duas camadas amostradas

Pulrolnik et al. (2009) constataram que a substituição da vegetação de Cerrado no Vale do Jequitinhonha (MG) em um Latossolo Vermelho, pelo eucalipto não resultou em redução do estoque de COT, mas sim em aumento de 13% na camada de 0,00 a 0,10m. Neste sentido, Rangel e Silva (2007) em um Latossolo Vermelho também encontraram maior estoque de COT sob reflorestamento com eucalipto em relação à mata nativa.

Segundo Hernández-Hernández et al. (2008), o eucalipto tende a produzir maiores quantidades de biomassa vegetal quando comparado a plantas herbáceas, onde o aporte de resíduos culturais é menor e o material vegetal tem menor conteúdo de fibras. Estes autores verificaram que a contribuição ao COT no solo sob plantações de eucalipto foi maior quando comparada ao pinus e à vegetação de savana.

Guo e Gifford (2002) e Mendham et al. (2004) concluíram que o CFG pode ser usado como indicador sensível às mudanças de uso do solo, ao observar que o CFG foi maior no solo sob eucalipto com 11 e 14 anos, comparado com a mata nativa e pastagem, em virtude da maior deposição de resíduos culturais por essa cultura. No presente trabalho, não foram verificadas diferenças significativas para o estoque de CFG entre os sistemas de uso quando avaliado em classes de agregados (Tab. 2).

**Tabela 2.** Estoque de carbono da fração grosseira (CFG) ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) em classes de agregados de um Argissolo Vermelho sob sistemas de uso e camadas. Alegrete - RS, 2008.

Sistemas*	Classe de diâmetro (mm)					
	8,00 - 4,76	4,76 - 2,00	2,00 - 1,00	1,00 - 0,50	0,50 - 0,25	< 0,25
	0,000 – 0,025m					
FH	0,15 aC	0,48 aAB	0,35 aABC	0,60 aA	0,26 aBC	0,09 aC
SA	0,08 aC	0,30 aAB	0,17 aBC	0,48 aA	0,27 aBC	0,13 aBC
CN	0,11aC	0,20 aBC	0,22 aBC	0,49 aA	0,35 aAB	0,12 aBC
	0,025 – 0,075m					
FH	0,20 aB	0,27 aB	0,26 aB	0,95 aA	0,43 aB	0,18 aB
SA	0,12 aB	0,23 aB	0,11 aB	1,26 aA	0,30 aB	0,20 aB
CN	0,23 aA	0,37 aA	0,40 aA	0,62 aA	0,44 aA	0,26 aA
	0,000 – 0,075m**					
FH	0,35 aB	0,76 aB	0,61 aB	1,55 aA	0,69 aB	0,28 aB
SA	0,20 aC	0,53 aBC	0,28 aBC	1,74 aA	0,57 aB	0,33 aBC
CN	0,33 aA	0,57 aA	0,61 aA	1,10 Aa	0,80 aA	0,39 aA

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna em cada camada e maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste t que considera a diferença mínima significativa a 5%.

\*FH = floresta homogênea de eucalipto; SA = sistema agrosilvipastoril na entrelinha e CN = campo nativo.

\*\*Valores obtidos pela soma das duas camadas amostradas

Com exceção da camada superficial na classe de agregados 4,76 - 2,00mm e <0,25mm e nas camadas de 0,025 - 0,075mm e para o acumulado até 0,075m nas classes de 1,00 - 0,50mm e <0,25mm, analisando os valores absolutos de CFG, verificaram-se menores estoques para o sistema SA, quando comparado com o CN e FH (Tab. 2), possivelmente em decorrência do cultivo em que foi submetida a área nos dois primeiros anos e/ou devido ao menor aporte de biomassa vegetal ao solo. Segundo Salton et al. (2005), o menor estoque de CFG verificado em sistemas agrosilvipastoris, pode indicar que há pressão de pastejo acima da capacidade suporte do solo, contribuindo para menor aporte de resíduos culturais.

Para o estoque de CAM, também não foram verificadas diferenças estatísticas entre os sistemas de uso do solo (Tab. 3). Por ser a fração mais estável da MO, constituída de material orgânico mais humificado e fortemente ligado à fração mineral, o CAM não apresenta sensibilidade em curto prazo às alterações decorrentes do uso e manejo do solo (SALTON et al., 2005). Bayer et al. (2004) analisaram um Latossolo Vermelho submetido ao sistema PD e PC, e depois de seis anos de cultivo, não foram verificadas diferenças para o estoque de CAM.



**Tabela 3.** Estoque de carbono associado aos minerais (CAM) ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) em classes de agregados de um Argissolo Vermelho sob sistemas de uso e camadas. Alegrete - RS, 2008.

Sistemas*	Classe de diâmetro (mm)					
	8,00 - 4,76	4,76 - 2,00	2,00 - 1,00	1,00 - 0,50	0,50 - 0,25	< 0,25
	0,000 – 0,025m					
FH	0,29 aC	0,42 aBC	0,48 aC	0,77 aA	0,38 aAB	0,16 aBC
SA	0,08 aA	0,20 aA	0,34 aA	0,73 aA	0,46 aA	0,20 aA
CN	0,13 aA	0,27 aA	0,11 aA	0,65 aA	0,52 aA	0,21 aA
	0,025 – 0,075m					
FH	0,35 aB	0,61 aB	0,40 aB	2,09 aA	0,55 aB	0,28 aB
SA	0,18 aB	0,22 aB	0,16 aB	2,36 aA	0,36 aB	0,29 aB
CN	0,25 aA	0,57 aA	0,51 aA	1,02 aA	0,74 aA	0,42 aA
	0,000 – 0,075m**					
FH	0,64 aB	1,02 aB	0,88 aB	2,86 aA	0,93 aB	0,44 aB
SA	0,25 aBC	0,42 aBC	0,50 aC	3,09 aA	0,82 aB	0,49 aBC
CN	0,39 aA	0,85 aA	0,63 aA	1,68 aA	1,25 aA	0,62 aA

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna em cada camada e maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste t que considera a diferença mínima significativa a 5%.

\*FH = floresta homogênea de eucalipto; SA = sistema agrosilvipastoril na entrelinha e CN = campo nativo.

\*\*Valores obtidos pela soma das duas camadas amostradas

Analisando os valores absolutos de CFG e CAM da camada superficial, observam-se maiores estoques também para a FH entre as classes de 8,00 a 0,50mm (Tab. 2 e 3). Com relação ao CFG, Pulrolnik et al. (2009) encontraram maior quantidade de serrapilheira no eucalipto quando comparado ao cerrado e pastagem. Esses autores relatam que quando os componentes da planta são mais lignificados e aromáticos, se decompõem mais lentamente, favorecendo a manutenção de substâncias orgânicas no solo. Além disso, a alta relação C/N da serrapilheira do eucalipto contribui para uma lenta decomposição dos resíduos.

Para os estoques de CFG e CAM, acumulados na camada de 0,000 a 0,075m, os maiores valores absolutos foram verificados na FH nas classes que compreendem de 8,00 a 0,50mm. Maiores valores para o estoque de CFG e CAM nas classes de agregados entre 0,50 a <0,25mm, foram verificados no solo sob campo nativo (Tab. 2 e 3).

Diferenças estatísticas do estoque de FLL na camada superficial foram verificados entre os sistemas de uso, sendo superiores na FH na classe de agregados de 8,00 a 4,76mm (Tab. 4). Mesmo não sendo verificadas diferenças entre as classes de agregados de 4,76 a <0,25mm, os valores absolutos mostram que a FH obteve os maiores estoques nas classes entre 4,76 a 0,25mm.

**Tabela 4.** Estoque de carbono da fração leve livre (FLL) ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) em classes de agregados de um Argissolo Vermelho sob sistemas de uso e camadas. Alegrete-RS, 2008.

Sistemas*	Classe de diâmetro (mm)					
	8,00 - 4,76	4,76 - 2,00	2,00 - 1,00	1,00 - 0,50	0,50 - 0,25	< 0,25
	0,000 – 0,025m					
FH	0,15 aABC	0,33 aAB	0,33 aAB	0,37 aA	0,13 aBC	0,05 aC
SA	0,07 bA	0,25 aA	0,25 aA	0,27 aA	0,11 aA	0,06 aA
CN	0,05 bB	0,22 aA	0,16 aA	0,16 aA	0,06 aB	0,03 aB
	0,025 – 0,075m					
FH	0,04 bB	0,16 aA	0,16 aA	0,16 aA	0,05 aB	0,02 aB
SA	0,02 bA	0,28 aA	0,06 aA	0,11 aA	0,02 aA	0,02 aA
CN	0,11 aABC	0,21 aA	0,15 aAB	0,09 aBC	0,03 aC	0,02 aC
	0,000 – 0,075m**					
FH	0,19 aB	0,49 aA	0,49 aA	0,53 aA	0,18 aB	0,07 aB
SA	0,09 aC	0,53 aA	0,31 aABC	0,38 aAB	0,13 aBC	0,07 aC
CN	0,17 aCD	0,43 aA	0,31 aAB	0,25 aBC	0,09 aD	0,06 aD

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna em cada camada e maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste t que considera a diferença mínima significativa a 5%.

\*FH = floresta homogênea de eucalipto; SA = sistema agrosilvipastoril na entrelinha e CN = campo nativo.

\*\*Valores obtidos pela soma das duas camadas amostradas

Para o estoque da FLL acumulado na camada de 0,000 a 0,075m, a FH apresentou-se maior nas classes que compreendem de 8,00 a 4,76mm e de 2,00 a 0,25mm (Tab. 4). Segundo Six et al., (2002b), a FLL é composta basicamente por resíduos culturais parcialmente decompostos e é fortemente influenciada pela quantidade e qualidade de resíduos depositados no solo e pelas condições ambientais.

Neste sentido, Pulrolnik et al., (2009) encontraram superioridade na quantidade de fitomassa seca da serrapilheira do eucalipto quando comparado com a do cerrado e da pastagem, sendo o de C na FLL do eucalipto 58% superior ao solo sob cerrado e 41% no solo sob pastagem na camada de 0,00 a 0,10m.

Adicionalmente, os materiais com elevada relação C/N (>25) e altos teores de lignina e polifenóis sofrem decomposição mais lenta. Tais fatores associados contribuem para a preservação ou para o aumento do C na FLL (PULROLNIK et al. 2009).

Lima et al. (2008) observaram que o estoque de C na FLL foi maior para solos sob eucalipto na camada de 0,00 a 0,10m em relação ao solo sob pastagem, mas não observou diferença entre o solo sob mata nativa e a área sob eucalipto no Vale do Rio Doce (MG). Assim, esses incrementos de C da FLL sob cultivo de eucalipto, principalmente nas camadas superficiais, em comparação à

pastagem, refletem maior deposição de material vegetal no solo, evidenciando que a FLL pode ser utilizada como indicador sensível para detectar mudanças no sistema de uso e manejo do solo.

Rovira e Vallejo (2002) relatam que a resistência à hidrólise ácida é maior para os polímeros orgânicos recalcitrantes (ligninas, suberinas, resinas e ceras). Assim, os maiores estoques de CFG e FLL encontrados no solo sob FH podem também estar associados à qualidade dos resíduos adicionados ao solo, que, provavelmente, apresentam maiores proporções de C mais resistente do ponto de vista químico.

Não foram verificadas diferenças para o C da FLO entre os sistemas de uso do solo nas classes de agregados e nas camadas avaliadas (Tab. 5). Possivelmente a textura arenosa esteja afetando negativamente a capacidade deste Argissolo para formar agregados estáveis, os quais poderiam contribuir para a proteção e estabilização da MO na FLO em sítios inacessíveis aos microorganismos e suas enzimas. Similarmente, Lima et al. (2008) estudando as frações da MO após três décadas de cultivo de eucalipto no Vale do Rio Doce (MG), constataram que o C da FLO foi indicador pouco sensível de mudança na MO após a implantação do eucalipto.

**Tabela 5.** Estoque de carbono da fração leve oclusa (FLO) ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) em classes de agregados de um Argissolo Vermelho sob sistemas de uso e camadas. Alegrete - RS, 2008.

Sistemas*	Classe de diâmetro (mm)					
	8,00 - 4,76	4,76 - 2,00	2,00 - 1,00	1,00 - 0,50	0,50 - 0,25	< 0,25
0,000 – 0,025m						
FH	0,08 aA	0,14 aA	0,09 aA	0,19 aA	0,10 aA	0,03 aA
SA	0,02 aB	0,08 aAB	0,08 aAB	0,15 aA	0,08 aAB	0,03 aB
CN	0,05 aB	0,09 aB	0,06 aB	0,21 aA	0,11 aB	0,03 aB
0,025 – 0,075m						
FH	0,09 aA	0,13 aA	0,08 aA	0,18 aA	0,08 aA	0,03 aA
SA	0,03 aBC	0,05 aB	0,02 aBC	0,14 abA	0,03 aBC	0,02 aC
CN	0,06 aA	0,13 aA	0,12 aA	0,10 aA	0,06 aA	0,04 aA
0,000 – 0,075m**						
FH	0,17 aA	0,27 aA	0,17 aA	0,37 aA	0,18 aA	0,06 aA
SA	0,05 aB	0,12 aB	0,10 aB	0,30 aA	0,11 aB	0,05 aB
CN	0,11 aA	0,21 aA	0,18 aA	0,30 aA	0,17 aA	0,07 aA

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna em cada camada e maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste t que considera a diferença mínima significativa a 5%.

\*FH = floresta homogênea de eucalipto; SA = sistema agrosilvipastoril na entrelinha e CN = campo nativo.

\*\*Valores obtidos pela soma das duas camadas amostradas

Para o estoque de C da FP também não foram observadas diferenças entre os sistemas de uso do solo nas classes de agregados e camadas analisadas (Tab. 6). Sendo a FP constituída por materiais orgânicos em avançado estágio de decomposição e fortemente ligados à fração mineral do solo, esses materiais são, predominantemente, compostos orgânicos com elevada recalcitrância e materiais resistentes (ROSCOE; MACHADO, 2002), sendo pouco sensíveis as mudanças de uso do solo em curto período de tempo.

**Tabela 6.** Estoque de carbono da fração pesada (FP) ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) em classes de agregados de um Argissolo Vermelho sob sistemas de uso e camadas. Alegrete - RS, 2008.

Sistemas*	Classe de diâmetro (mm)					
	8,00 - 4,76	4,76 - 2,00	2,00 - 1,00	1,00 - 0,50	0,50 - 0,25	< 0,25
	0,000 – 0,025m					
FH	0,21 a A	0,43 aA	0,41 aA	0,81 aA	0,41 aA	0,18 aA
SA	0,06 aA	0,17 aA	0,18 aA	0,79 aA	0,53 aA	0,25 aA
CN	0,14 aB	0,17 aB	0,11 aB	0,76 aA	0,70 aA	0,26 aAB
	0,025 – 0,075m					
FH	0,42 aB	0,58 aB	0,42 aB	2,70 aA	0,86 aB	0,41 aB
SA	0,25 aB	0,11 aB	0,18 aB	3,37 aA	0,61 aB	0,46 aB
CN	0,30 aA	0,61 aA	0,60 aA	1,15 aA	1,09 aA	0,62 aA
	0,000 – 0,075m**					
FH	0,63 aB	1,01 aB	0,83 aB	3,50 aA	1,27 aB	0,59 aB
SA	0,31 aB	0,29 aB	0,37 aB	4,16 aA	1,14 aB	0,70 aB
CN	0,44 aA	0,77 aA	0,75 aA	2,22 aA	1,79 aA	0,88 aA

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna em cada camada e maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste t que considera a diferença mínima significativa a 5%.

\*FH = floresta homogênea de eucalipto; SA = sistema agrosilvopastoril na entrelinha e CN = campo nativo.

\*\*Valores obtidos pela soma das duas camadas amostradas

De modo geral, os maiores estoques de COT, CFG, CAM, FLO e FP em cada sistema de uso do solo, foram verificados na classe de agregados de 1,00 a 0,50mm (Tab. 1, 2, 3, 5 e 6). Possivelmente, o elevado teor partículas de tamanho areia deste solo possam afetar negativamente a formação de agregados estáveis de maior tamanho (VEZZANI, 2001).

Segundo Edwards e Bremner (1967) a organização do solo inicia com a interação da matriz mineral com os compostos orgânicos mais humificados, formando agregados na ordem de nanômetros. A organização prossegue com a interação destes agregados com os compostos orgânicos, resultando na formação de agregados em torno de 0,25mm de diâmetro (microagregados). Durante este processo, ocorre a retenção de MO no solo, devido à proteção química e física à decomposição microbiana. A formação

de agregados maiores que 0,25mm (macroagregados) é resultado da ação mecânica das raízes e das hifas de fungos (TISDALL; OADES, 1982).

O nível alto de organização é caracterizado pela presença de estruturas mais complexas, que são os macroagregados e grande quantidade de energia e matéria retida na forma de compostos orgânicos, gerando propriedades emergentes que capacitam o sistema solo exercer suas funções e, assim, atingir qualidade. O nível de ordem baixo é caracterizado pela presença de estruturas mais simples, que são os microagregados e menor quantidade de MO retida. Nesta situação, o solo tem baixa capacidade de produzir matéria vegetal e, conseqüentemente, de formar estruturas mais complexas (VEZZANI, 2001).

Pillon et al. (2008) analisaram um Argissolo Vermelho na região de Butiá – RS, sob cultivo de eucalipto com 13 e 20 anos, pastagem e mata nativa, verificaram que os maiores estoques de COT foram obtidos nas maiores classes de agregados (8,00 – 4,76mm).

Neste sentido, Madari et al. (2005) encontraram maiores estoques de COT nas classes de macroagregados em solo cultivado e sob floresta, na camada de 0,00 a 0,05m. O maior estoque de C determina maior estabilidade de agregados, e esta, por sua vez, promove maior proteção física a MO (COSTA et al., 2004). Wright e Hons (2005) também observaram maiores estoques de COT nas maiores classes de tamanho de agregados sob diferentes sistemas de manejo do solo.

Analisando Argissolos ligeiramente, moderadamente e severamente erodidos, da China, Huang et al. (2010) encontraram aumento no estoque de MO com o aumento do tamanho dos agregados para os solos ligeiramente e moderadamente erodidos. Para Huang et al. (2010), a formação dos macroagregados foi compreendida pela reunião de microagregados unidos por agentes cimentantes. A situação oposta foi verificada para os Argissolos severamente degradados, onde os maiores estoques de MO foram observados nos agregados de menor tamanho atribuindo a associação da MO com as partículas de tamanho argila. Além disso, a maioria das amostras coletadas no Argissolo severamente degradado apresentavam baixos estoques de MO. As diferentes distribuições do estoque de MO em função do tamanho dos agregados relacionados ao grau de erosão dos solos refletem diferenças nos mecanismos de formação e de estabilidade dos agregados.

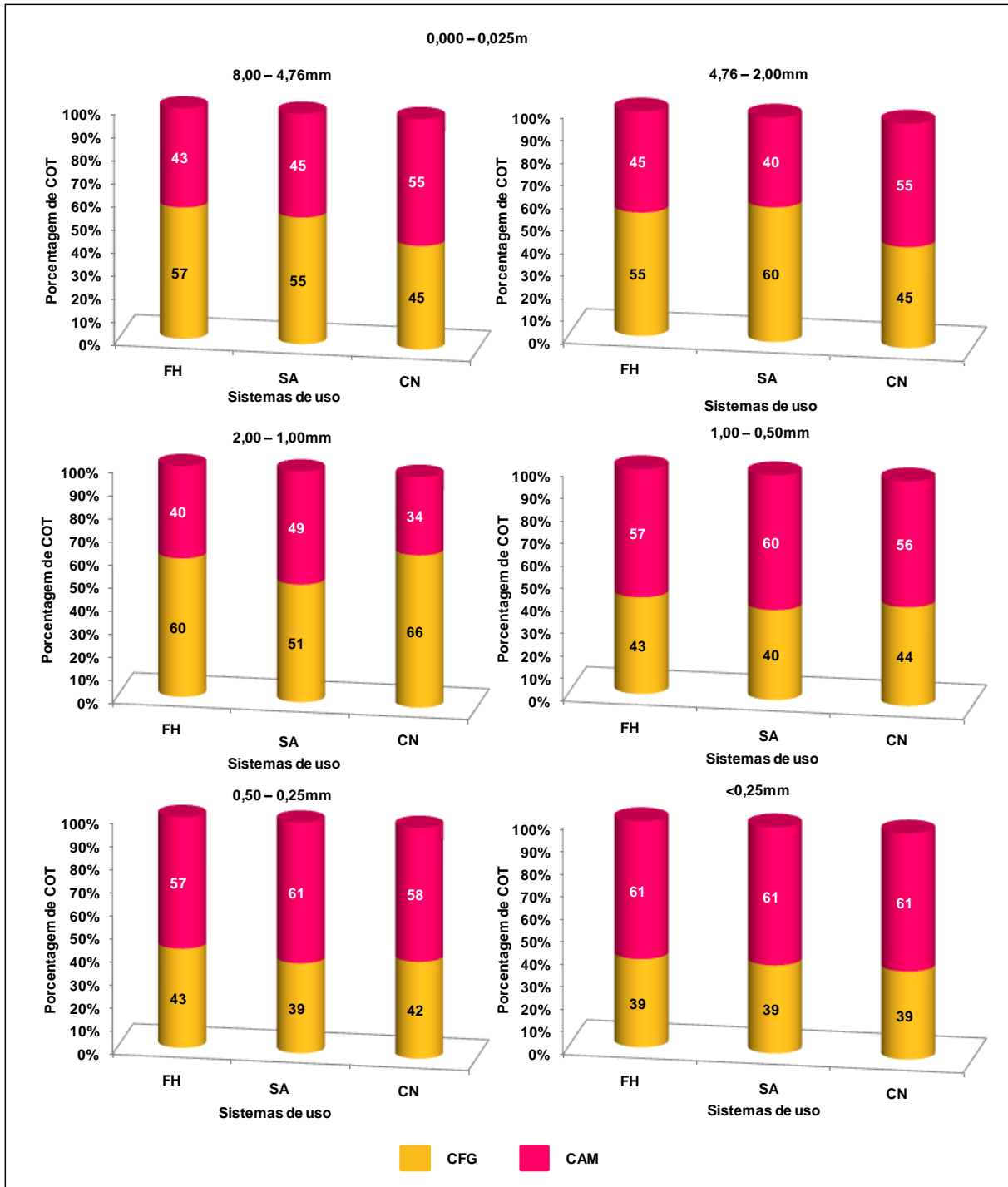
Os maiores estoques de COT, CFG, CAM, FLO e FP (Tab. 1, 2, 3, 5 e 6) verificados na classe de agregados de 1,00 a 0,50mm, estão de acordo com as maiores quantidades de agregados seco verificados nessas classes (Apêndice A).

Basicamente, as maiores proporções de CFG em relação ao COT, na camada superficial (Fig. 1), foram verificadas nas maiores classes de agregados. Na média de 52%, 53% e 59%, para as classes de 8,00 – 4,76mm, 4,76 – 2,00mm e de 2,00 – 1,00mm respectivamente.

Analisando a proporção de CAM em relação ao COT (Fig. 1), observa-se que os maiores percentuais de CAM (61%) encontram-se na classe de agregados inferior a 0,25mm, o que pode ser justificado pela maior interação organomineral e maior quantidade de MO mais humificada em relação às demais classes de agregados.

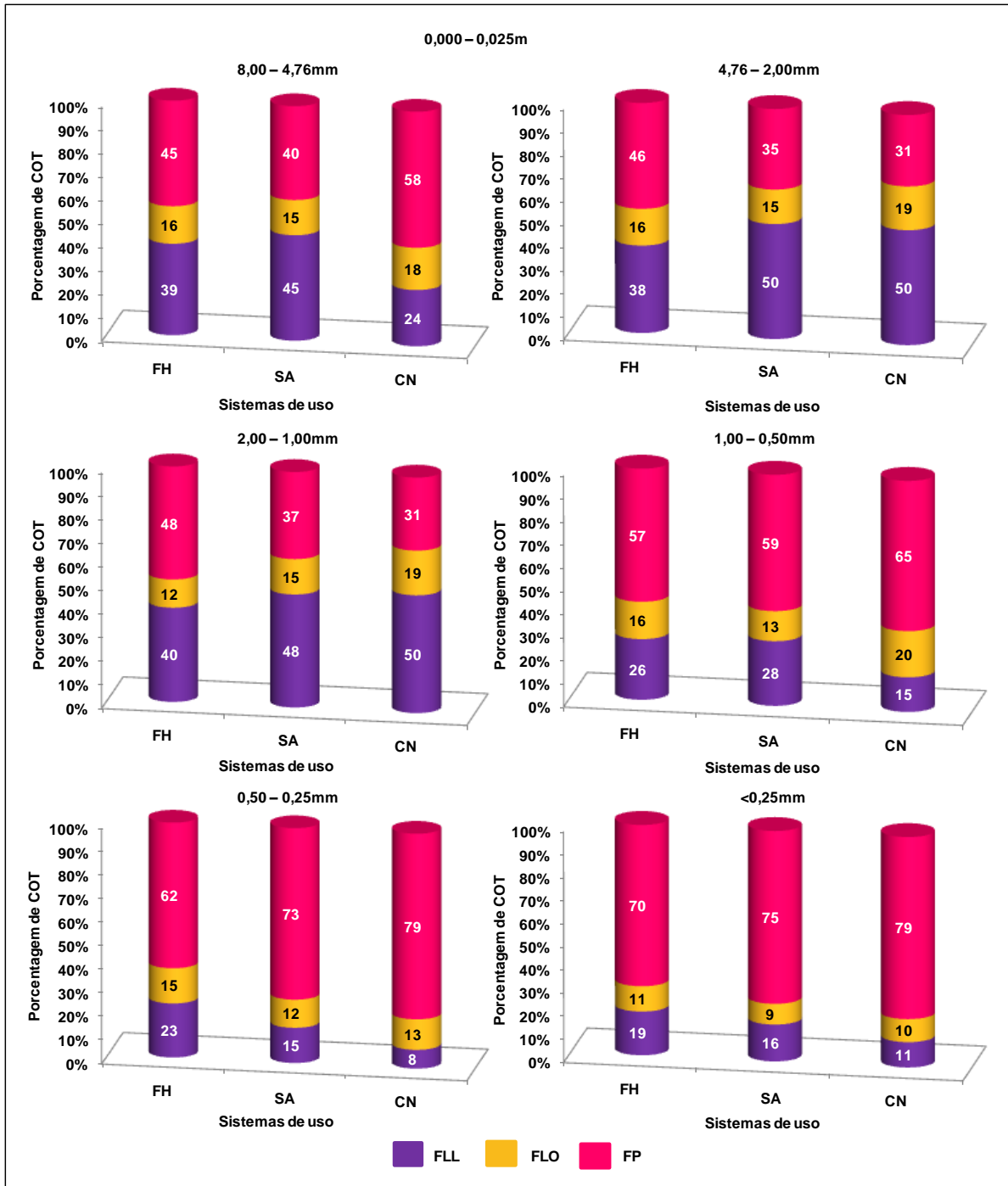
Analisando a Figura 2, observa-se dois grupos distintos quanto as proporções de COT em relação as frações físicas (FLL, FLO e FP). Nas classes de agregados que compreendem de 8,00 a 1,00mm, verifica-se maiores proporções da FLL (24% a 50%) em relação as classes de 1,00 a <0,25mm (8% a 28%). Para a FP essas proporções praticamente se invertem, nas classes de agregados de 8,00 a 1,00mm verifica-se menores proporções de COT (31% a 58%) em relação as classes de 1,00 a <0,25mm (57% a 79%).

Essas proporções evidenciam que nas classes de agregados de 8,00 a 1,00mm a proteção da MO por recalcitrância molecular é relativamente mais importante. No entanto, em relação às classes de agregados de 1,00 a <0,25mm a estabilização química devido a interação organomineral é mais dominante em comparação a recalcitrância molecular e a oclusão em agregados.



**Figura 1.** Proporção de carbono da fração grosseira (CFG) e carbono associado aos minerais (CAM) de um Argissolo Vermelho sob sistemas de uso. Alegrete - RS, 2008. FH = floresta homogênea de eucalipto; SA = sistema agrosilvipastoril na entrelinha e CN = campo nativo.

De modo geral, na Figura 2, verifica-se que as menores proporções de COT em relação às frações físicas são para a FLO, indicando que o mecanismo de recalcitrância molecular e a estabilização química têm elevada importância diante da estabilidade decorrente da oclusão em agregados.

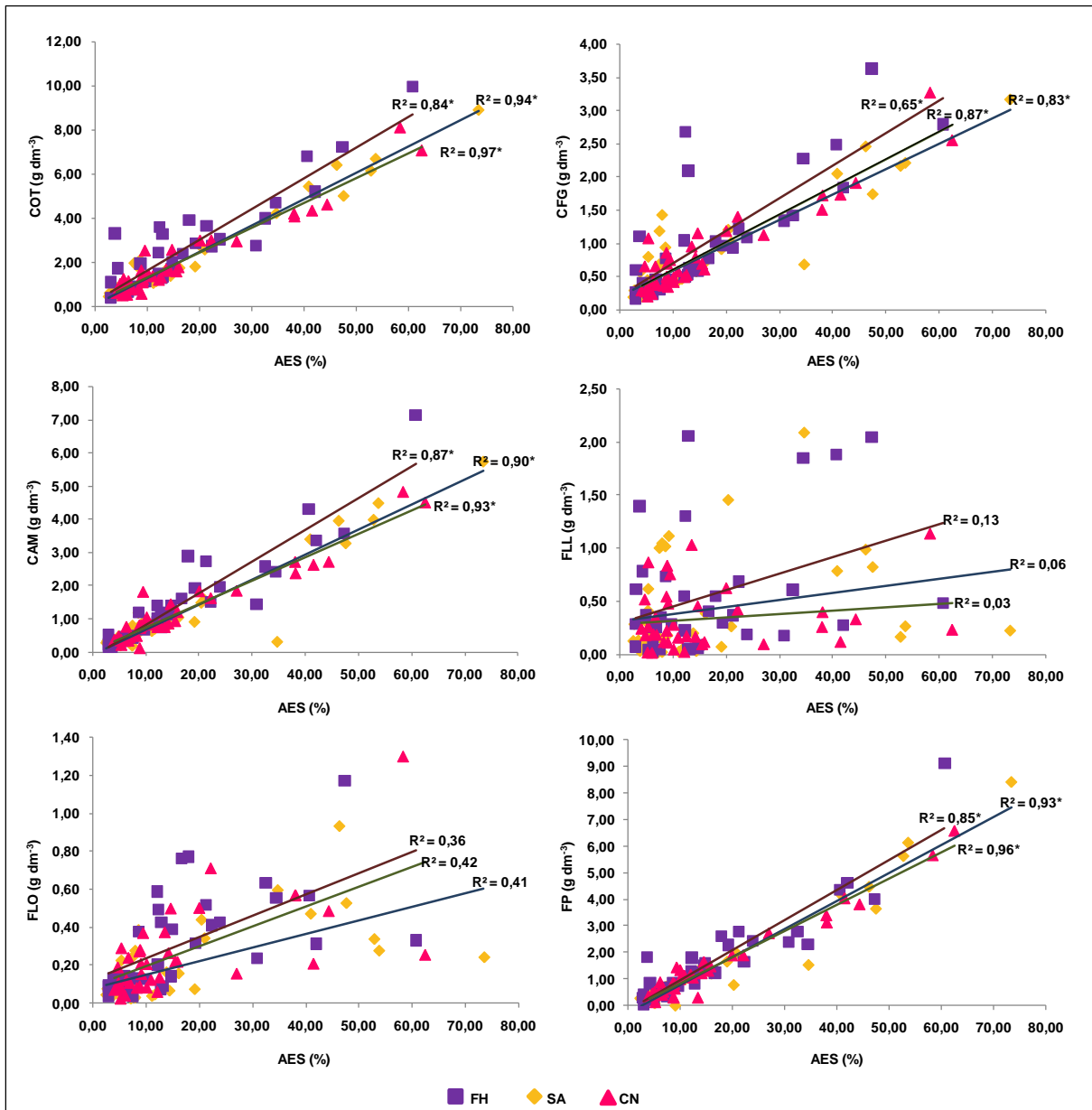


**Figura 2.** Proporção de carbono da fração leve livre (FLL), fração leve oclusa (FLO) e fração pesada (FP) de um Argissolo Vermelho sob sistemas de uso. Alegrete - RS, 2008. FH = floresta homogênea de eucalipto; SA = sistema agrosilvipastoril na entrelinha e CN = campo nativo.

Verificou-se correlação positiva e significativa entre os valores de agregados estáveis a seco (AES) e o COT, CFG, CAM e FP (Fig. 3). A proteção do CAM e da FP pelos agregados é justificada pela maior dificuldade à decomposição, uma vez que além da interação organomineral, o acesso dos microrganismos e



principalmente a aeração é restringida em comparação aos compostos orgânicos livres (fração grosseira) (SALTON et al., 2005).



**Figura 3.** Relação entre agregados estáveis à seco (AES) e o carbono orgânico total (COT), carbono da fração grosseira (CFG), carbono associado aos minerais (CAM), fração leve livre (FLL), fração leve oclusa (FLO) e fração pesada (FP) de um Argissolo Vermelho sob sistemas de uso. Alegrete - RS, 2010. FH = floresta homogênea de eucalipto; SA = sistema agrosilvipastoril na entrelinha e CN = campo nativo.

\*Significativo < 1% de probabilidade.

Similar relação (74%) foi encontrada por Wendling et al. (2005) entre o diâmetro médio ponderado de agregados úmidos e o teor de COT de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo e uso do solo na camada de

0,00 a 0,10m. Rozane et al., (2010) encontraram, correlação ( $R = 0,65$ ) entre o diâmetro médio ponderado de agregados úmidos e o estoque de COT sob diferentes sistemas de uso em um Latossolo Vermelho indicando a importância do COT na estabilidade dos agregados dos solos.

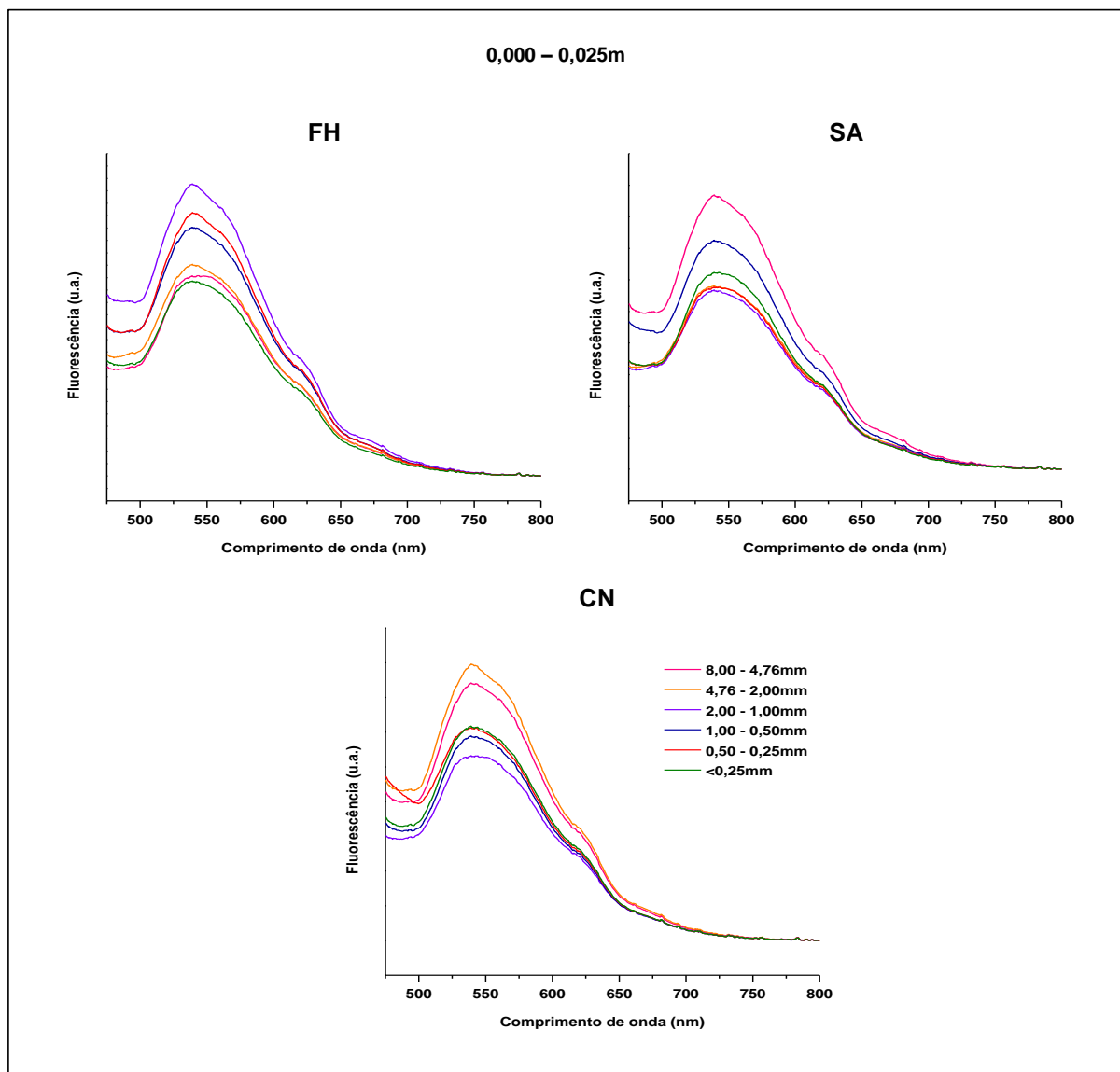
No presente estudo, as maiores relações foram verificadas no CN para o COT, CFG, CAM e FP ( $R^2 = 0,97, 0,87, 0,93$  e  $0,96$ , respectivamente), seguido pelo SA ( $R^2 = 0,94, 0,83, 0,90$  e  $0,93$ ). Apesar do CN e do SA não apresentarem os maiores estoques de COT, CFG, CAM e FP em comparação a FH, essas relações indicam possivelmente, melhor contribuição da MO presente no CN e no SA para a estabilização dos agregados do solo e/ou a agregação do solo nestes sistemas de uso.

Com relação as gramíneas, Paladini e Mielniczuk (1991) e Pinheiro et al. (2004b) relataram que o tempo de atuação da vegetação e a liberação de exsudatos do sistema radicular das gramíneas, associado à ausência de revolvimento do solo, contribuem para a formação de macroagregados estáveis, os quais permitem o acúmulo e proteção da MO em seu interior.

Salton et al. (2008) observaram agregados estáveis nas classes de maior diâmetro nos sistemas que apresentavam pastagens e atribuíram o fato ao aporte de COT via sistema radicular das gramíneas, fundamental para a existência de agregados estáveis. Para camadas subsuperficiais, Neves et al. (2004) observaram teores de COT em pastagens iguais à mata natural, o que pode ser atribuído à alta densidade do sistema radicular das gramíneas.

O C da FLO não se relacionou com os AES, evidenciando que no curto período de tempo de instalação desses sistemas, a estabilização dos agregados não é significativamente determinada por esta fração. Tal fato se confirma pelas menores proporções da FLO em relação à FLL e a FP apresentados na Figura 2.

Na Figura 4 observam-se os espectros de FIL do solo sob os diferentes sistemas de uso e classes de agregados. 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 ( $H_{FIL}$ ) (Tab. 7).



**Figura 4.** Emissão de fluorescência em classes de agregados de um Argissolo Vermelho sob sistemas de uso. Alegrete - RS, 2010. FH = floresta homogênea de eucalipto; SA = sistema agrosilvipastoril na entrelinha e CN = campo nativo.

**Tabela 7.** Grau de humificação ( $H_{FIL}$ ) em classes de agregados de um Argissolo Vermelho sob sistemas de uso na camada de 0,000 - 0,025m. Alegrete - RS, 2010.

Sistemas*	Classe de diâmetro (mm)					
	8,00 - 4,76	4,76 - 2,00	2,00 - 1,00	1,00 - 0,50	0,50 - 0,25	< 0,25
FH	14.047	14.273	18.229	21.488	30.260	23.544
SA	25.750	13.465	14.834	26.189	24.203	26.361
CN	23.752	18.985	11.517	17.857	26.395	25.983

\*FH = floresta homogênea de eucalipto; SA = sistema agrosilvipastoril na entrelinha e CN = campo nativo.

Na classe de agregados de 8,00 – 4,76mm e <0,25mm, o grau de humificação decresceu na ordem SA>CN>FH (Tab. 7). Segundo Hernández-

Hernández et al. (2008), a decomposição lenta do material aportado pelo eucalipto se deve principalmente ao conteúdo de compostos hidrofóbicos e inibidores químicos coerente com as dificuldades de transformação da MO dessa espécie exótica pelos microrganismos do solo.

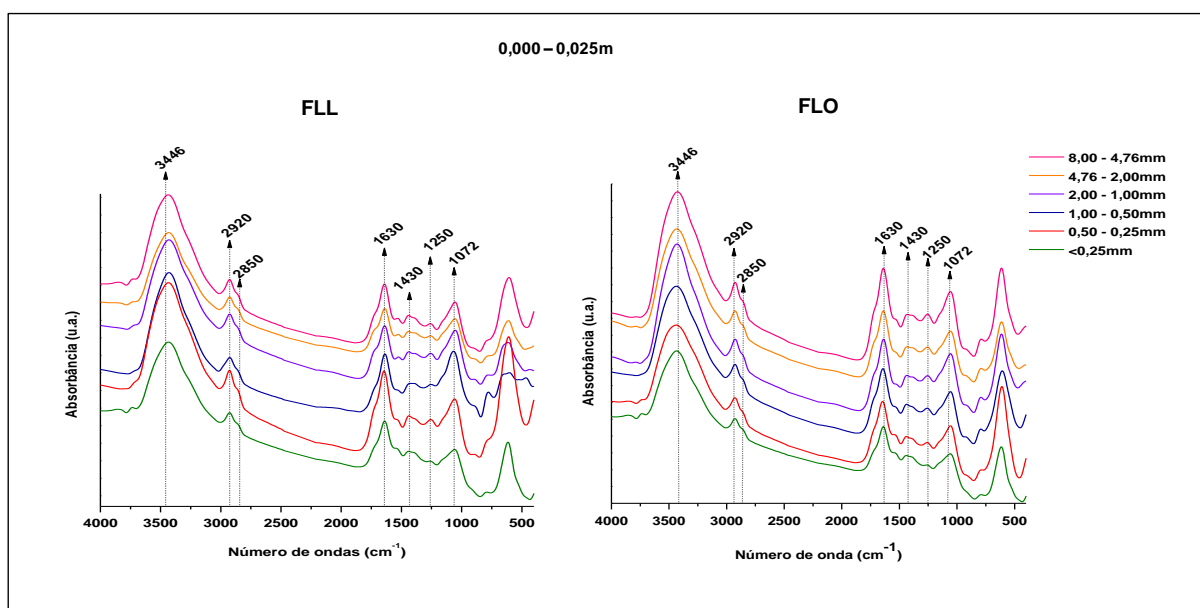
Na classe de 4,76 – 2,00mm e de 0,50 – 0,25mm, menores valores de  $H_{FIL}$  foram observados no SA e nas classes que compreendem de 2,00 a 0,50mm, os menores valores foram verificados no CN (Tab.7).

Em cada sistema de uso, entre as classes de agregados, o grau de humificação apresentou comportamento diferente. No entanto, na FH o menor grau de humificação foi verificado na classe de agregados de 8,00 – 4,76mm aumentando a humificação conforme diminuiu o diâmetro das classes de agregados (Tab. 7). A menor humificação verificadas nas classes de maior tamanho, possivelmente esteja relacionada ao aporte preferencial de resíduos culturais e de carbono jovem em estágio inicial de decomposição e humificação.

De modo geral, para os sistemas de uso avaliados, o grau de humificação foi maior nas classes de menor diâmetro (0,50 a <0,25mm) (Tab. 7). O maior grau de humificação nessas classes possivelmente indica maior proteção relativa da MO por interação organomineral em relação aos mecanismos de oclusão e recalcitrância (BAYER et al. 2003).

Os espectros de FTIR da FLL e FLO do CN nas classes de agregados, de modo geral, não diferiram quanto aos tipos de grupos funcionais presentes (Fig. 5). Bandas de absorção entre  $3500-3250\text{cm}^{-1}$  são relacionadas à vibração OH de ligação de hidrogênio de água proveniente da umidade das amostras ou de hidroxila ligada à estruturas aromáticos que compõe MO e as substâncias húmicas presentes no solo (SILVA; DICK; INDA JÚNIOR, 2008), além de estiramento vibracional ( $\nu$ ) de grupos hidroxilas ligados a íons metálicos classificados como ácidos duros (AlO-H, FeO-H e SiO-H) (SILVERSTEIN; WEBSTER, 1998; NAYAK; SINGH, 2007). Verifica-se também que a presença das bandas de absorção em  $3446\text{cm}^{-1}$  ( $\nu$  O-H) e  $1080\text{cm}^{-1}$  ( $\nu$  C-O), são características de presença de celulose. Em  $2920\text{cm}^{-1}$  e  $2850\text{cm}^{-1}$ , há a presença de bandas referentes ao estiramento dos grupos C-H de estruturas alifáticas. A banda em  $1630\text{cm}^{-1}$  refere-se basicamente a deformação angular de moléculas de água. Bandas em  $1385$  e  $1450\text{cm}^{-1}$  são relativas à estruturas de lignina (COCOZZA et al. 2003; ARTZ et al. 2008).

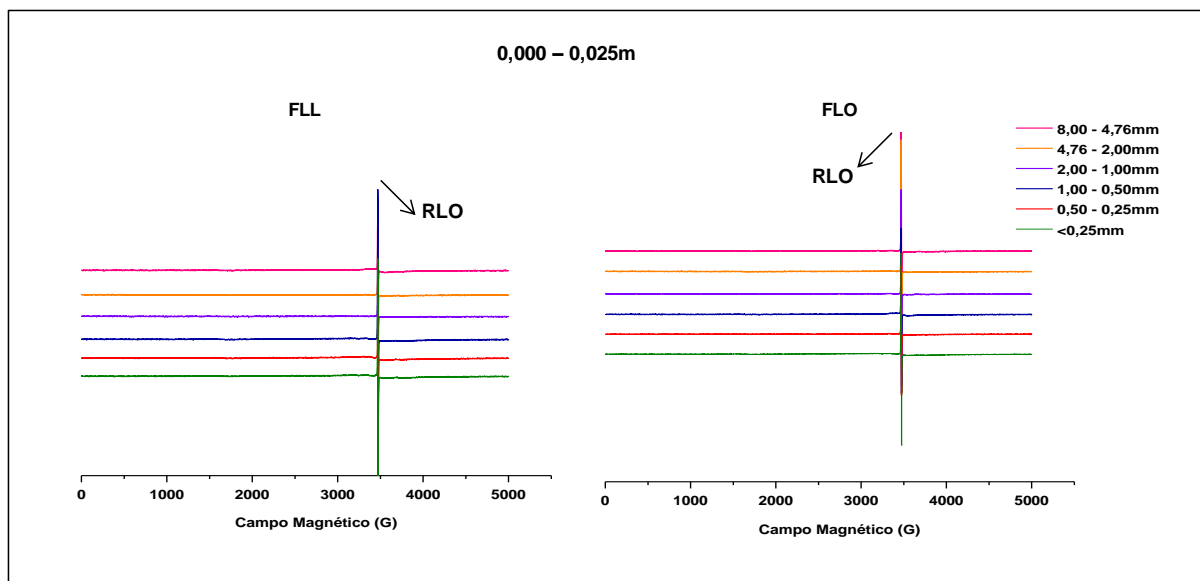
Absorções entre  $1200 - 1000\text{cm}^{-1}$ , podem ser atribuídas ao estiramento de C-O de polissacarídeos (carboidratos) e estiramento de Si-O de silicatos. Bandas em  $780\text{cm}^{-1}$  são atribuídas a torções vibracionais ( $\delta$ ) de ligação Si-O-Al, Si-O-Fe (NAYAK; SINGH, 2007). Essas bandas são observadas em todas as classes de diâmetros de agregados (Fig. 5).



**Figura 5.** Espectros de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) da fração leve livre (FLL) e da fração leve oclusa (FLO) de um Argissolo Vermelho sob campo nativo. Alegrete - RS, 2008.

Através da análise de EPR observam-se tanto para FLL como para FLO na região de aproximadamente 3500G, linhas estreitas referentes à presença de radical livre orgânico (RLO) (Fig. 6).

A partir dos espectros de EPR em 50G foram calculados os valores de spin por  $\text{g}^{-1}$  e o fator g para a FLL e FLO nas classes de agregados. A FLL, na classe de agregados de 1,00 - 0,50mm e a FLO na classe de agregados de 0,50 - 0,25mm apresentaram uma baixa relação sinal/ruído (Tab. 8), o que refletiu na baixa concentração de spin. No entanto, observa-se que a FLL na classe de 8,00 - 4,76mm e a FLO na classe de agregados de 4,76 - 2,00mm, apresentaram os maiores valores de radicais livres do tipo semiquinona (RLO) (3,169 e 4,929, respectivamente), indicando características típicas de ambientes onde a humificação é mais elevada.



**Figura 6.** Espectros de Ressonância Paramagnética Eletrônica (EPR) da fração leve livre (FLL) e da fração leve oclusa (FLO) de um Argissolo Vermelho sob campo nativo. Alegrete - RS, 2008.

**Tabela 8.** Radical livre orgânico (RLO) e fator g calculado a partir da Ressonância Paramagnética Eletrônica (EPR) da fração leve livre (FLL) e fração leve oclusa (FLO) de um Argissolo Vermelho sob campo nativo na camada de 0,000 - 0,025m. Alegrete - RS, 2008.

Amostra	RLO		RLO	
	(spins/g ( $10^{16}$ ))	Fator g	(spins/g ( $10^{16}$ ))	Fator g
	-----FLL-----		-----FLO-----	
8,00-4,76mm	3,169	2, 00347	4,454	2, 00323
4,76-2,00mm	1,807	2, 00340	4,929	2, 00320
2,00-1,00mm	2,706	2, 00324	4,036	2, 00323
1,00-0,50mm	1,244	2, 00322	3,607	2, 00319
0,50-0,25mm	1,376	2, 00320	2,614	2, 00320
<0,25mm	2,810	2, 00314	3,404	2, 00317

Observando os valores da concentração de RLO entre a FLL e a FLO, verifica-se menores valores para a FLL, o que indica menor humificação da MO (Tab. 8). A menor concentração de RLO é consistente com o grau de humificação menos avançado, sendo esta fração composta basicamente por resíduos culturais em estágio inicial de decomposição (CAMBARDELLA; ELLIOT, 1992). A menor concentração de RLO para a FLL e, portanto, o menor grau de humificação, indica menor recalcitrância da MO a nível molecular, o que é favorável à disponibilidade de

C e energia aos microrganismos decompositores nas frações mais lábeis da MO (BAYER; MARTIN-NETO; SAAB, 2003).

#### **4.4 Conclusões**

O cultivo de eucalipto em áreas de solo predominantemente arenoso, promoveu os maiores estoques de COT, acumulados na camada de 0,000 a 0,075m nas classes de 8,00 a 1,00mm e para o CFG e CAM nas classes que compreendem de 8,00 a 0,50mm.

A fração leve livre mostrou-se sensível às mudanças de uso e manejo do solo na classe de agregados de 8,00 – 4,76mm, nas camadas estudadas.

Através da Fluorescência Induzida à Laser, para todos os sistemas de uso avaliados, o grau de humificação foi maior nas classes de menor diâmetro (0,50 - <0,25mm).

A fração leve oclusa do campo nativo apresentou maiores valores de radicais livres do tipo semiquinona, indicando maior transformação de sua estrutura em decorrência do processo de humificação.

## **5 ESTUDO 3. DISTRIBUIÇÃO E QUALIDADE DA MATÉRIA ORGÂNICA EM UM PLANOSSOLO HÁPLICO SOB PREPARO CONVENCIONAL E PLANTIO DIRETO**

### **5.1 Introdução**

Os solos de várzeas (hidromórficos) estão presentes especialmente nos estados do Rio Grande do Sul (RS) e Santa Catarina (SC). Na região Sul destaca-se o cultivo do arroz irrigado sendo responsável atualmente por 60% da produção nacional deste cereal. Há relativa facilidade quanto ao manejo dos solos cultivados com arroz irrigado no RS e SC devido ao relevo plano, à baixa suscetibilidade à erosão e às condições favoráveis à irrigação. Entretanto, em função de suas características peculiares (densidade naturalmente elevada, relação micro/macroporos muito baixa e deficiência de drenagem), seu manejo torna-se complexo, requerendo conhecimento para melhor manejá-los (MAGALHÃES JÚNIOR, 2006).

Os sistemas convencionais de cultivo, envolvendo aração e gradagem, são considerados os de maior degradação, resultando na maioria das vezes na redução dos estoques de matéria orgânica (MO) do solo. No entanto, os sistemas conservacionistas apresentam vantagens como o controle da erosão hídrica e melhoria na qualidade do solo e da água. Por manter a maior parte dos resíduos culturais na superfície, o sistema plantio direto (PD) permite menores taxas de decomposição da MO, o que favorece a manutenção e até o acúmulo da MO ao longo do tempo, dependendo da capacidade de aporte de biomassa vegetal pelo sistema de cultura (BAYER e MIELNICZUK, 2008).

Estudos recentes têm demonstrado que determinados compartimentos da MO são capazes de detectar, mais rapidamente, as mudanças nos estoques de C no solo associadas ao manejo. As reduções nestes compartimentos são, de modo geral, maiores que as observadas, quando se considera apenas o estoque total de C do solo (PINHEIRO et al., 2004a; XAVIER et al. 2006, CONCEIÇÃO, 2006). Alterações em curto prazo podem ser verificadas através do fracionamento físico granulométrico e/ou densimétrico da MO, sendo sensíveis em primeira ordem o carbono da fração grosseira (CFG) e/ou carbono da fração leve livre (FLL) (FREIXO



et al., 2002); representando uma medida de sensibilidade intermediária tem-se o carbono da fração leve oclusa (FLO).

Tão importante quanto conhecer a influência do sistema de uso do solo sobre o estoque de MO, é também conhecer a influência sobre a sua qualidade, principalmente quanto às frações físicas e às mudanças e no manejo e uso do solo. A combinação do fracionamento físico da MO com o emprego de técnicas analíticas, como fluorescência e espectroscopia, permite a obtenção de informações mais amplas sobre alguns aspectos básicos da dinâmica da MO, como sua decomposição, estabilização, funcionalidade e estrutura (HELFRICH et al. 2006; KNICKER et al., 2006).

Diante deste contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar o estoque de carbono orgânico e nitrogênio total do solo e avaliar quantitativamente e qualitativamente as frações físicas da matéria orgânica, bem como a contribuição relativa dos mecanismos de proteção da matéria orgânica em um Planossolo Háplico sob diferentes sistemas de manejo.

## **5.2 Material e Métodos**

O presente estudo foi realizado na Estação Experimental de Terras Baixas da Embrapa Clima Temperado, Capão do Leão, RS, (31°49'13" Sul, 52°27'50" Oeste, altitude de aproximadamente 14m) (Anexo E), em um Planossolo Háplico (SANTOS et al., 2006) de textura superficial franco (370g kg<sup>-1</sup> de silte, 460g kg<sup>-1</sup> de areia e 170g kg<sup>-1</sup> de argila). O clima da região, de acordo com a classificação climática de Wilhelm Köppen, é do tipo Cfa (C: clima temperado quente, com temperatura média do mês mais frio entre 3 e 18°C; f: em nenhum mês a precipitação pluvial é inferior a 60mm; a: temperatura do mês mais quente é superior a 22°C).

Este estudo insere-se em um conjunto de ações experimentais programadas e implementadas em 2003. Anteriormente à instalação do experimento, a área tradicionalmente cultivada com arroz irrigado estava sendo cultivada com sorgo para pastejo há dois anos sob preparo convencional, com aração e gradagens. Na implantação do experimento, o solo foi revolvido com grade aradora (preparo primário) e grade niveladora (preparo secundário). No primeiro ano, a cultura do

arroz irrigado foi utilizada para uniformizar o solo da área experimental, seguido de pousio invernal.

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso com parcelas divididas (três repetições), composto por cinco sistemas de cultura e dois sistemas de preparo de solo (plantio direto, PD e preparo convencional, PC). Os sistemas de cultura estão dispostos em parcelas (34 x 34m) e os sistemas de preparo de solo em subparcelas de 17 x 34m.

O manejo da adubação adotado é baseado na recomendação de adubação de manutenção para as culturas de verão, utilizando-se como fontes minerais a uréia, o superfosfato triplo e KCl, sendo a adubação de cobertura com N adotada somente para o milho e o sorgo. No sistema PC, o manejo do solo foi realizado com grade aradora seguida de grade niveladora. A semeadura das culturas de verão foi realizada com auxílio de máquina semeadora em linha, e as culturas de cobertura de inverno semeadas a lanço sem incorporação nos dois sistemas de preparo (PD e PC).

Para este estudo foram selecionados dois sistemas de preparo do solo (PD e PC) e o sistema de cultura que contempla azevém (*Lolium multiflorum* Lam) + cornichão (*Lotus corniculatus*), como culturas de cobertura no inverno e rotação soja (*Glycine Max* L.)/milho (*Zea mays* L.)/sorgo (*Sorghum vulgare*) no verão (Tab. 1).

**Tabela 1.** Seqüência de culturas utilizada na área experimental no período de 2003 a 2007. Estação Experimental Terras Baixas da Embrapa Clima Temperado, Capão do Leão - RS.

Ano agrícola							
2003/04 verão	2004 inverno	2004/05 verão	2005 inverno	2005/06 verão	2006 inverno	2006/07 verão	2007 inverno
A	P	S	Az+Cor	M	Az+Cor	Sr	Az+Cor
A = arroz ( <i>Oryza sativa</i> ), Az = azevém ( <i>Lolium multiflorum</i> Lam), Cor = cornichão ( <i>Lotus corniculatus</i> ), M = milho ( <i>Zea mays</i> L.), P = pousio, PC = plantio convencional, PD = plantio direto, S = soja ( <i>Glycine max</i> L), Sr = sorgo ( <i>Sorghum vulgare</i> ) e R = rotação (soja/milho/sorgo).							

Como referência, amostrou-se uma área sob campo nativo (CN), adjacente ao experimento, cujo tipo de solo, relevo e demais características são consideradas representativas da condição original da área experimental, anterior a seu uso agrícola.

Em novembro de 2007, anterior ao manejo do solo e à semeadura das espécies de primavera-verão, foram efetuadas as amostragens de solo em duas

camadas (0,000 - 0,025m e de 0,025 - 0,075m), sendo estas com estrutura preservada e não-preservada para as análises de densidade do solo e fracionamento da MO, respectivamente. As análises de densidade do solo foram realizadas conforme Embrapa (1997).

As amostras deformadas foram espalhadas em bandejas para secagem à sombra até atingirem a umidade correspondente ao ponto de friabilidade, sendo, em seguida, destorroadas manualmente de forma suave para não provocar compactação ou ruptura dos agregados. Posteriormente, as amostras de solo foram peneiradas em malha de 8,00mm de diâmetro e divididas em duas partes, a primeira foi macerada em almofariz de ágata para a determinação de COT e NT, e a outra foi destinada ao fracionamento físico granulométrico e densimétrico.

O fracionamento físico granulométrico foi realizado conforme descrito no item 3.2 do Estudo 1.

O fracionamento físico densimétrico foi realizado conforme Conceição et al. (2008), utilizando-se uma solução de politungstato de sódio de  $2,0\text{Mg m}^{-3}$ . A energia de dispersão por ultra-som foi de  $352\text{J mL}^{-1}$ , a qual, foi determinada previamente através de uma curva de dispersão onde foram aplicados níveis crescentes de energia, com o objetivo de determinar o ponto de dispersão total de agregados do solo em partículas primárias. O C da fração pesada (FP) foi obtido por diferença entre o COT do solo e o carbono da fração leve livre (FLL) adicionado do carbono da fração leve oclusa (FLO).

Os teores de COT e de NT presentes na massa de solo, no CFG, na FLL e FLO foram quantificados por oxidação a seco em um analisador elementar da marca LECO. A quantificação do estoque foi estabelecida pelo produto de carbono e de nitrogênio, pela massa considerando a densidade e o volume de cada camada de solo. Para o cálculo do COT e NT no solo inteiro e frações acumulado na camada de 0,000 a 0,075m somaram-se os valores obtidos nas duas camadas amostradas.

A análise do grau de humificação da MO do solo foi realizada através da Espectroscopia de Fluorescência Induzida à Laser (FIL), conforme descrito no item 3.2 do Estudo 1. Porém, para a realização das medidas de FIL, amostras de solo da camada superficial, peneiradas (8,00mm) e moídas foram pastilhadas, prensadas em uma forma de aço de 8 toneladas, nas dimensões de um centímetro de diâmetro, dois milímetros de espessura e aproximadamente 0,5g de solo. Estes dados foram utilizados para cálculo do índice de humificação ( $H_{FIL}$ ). O cálculo deste índice é a

razão entre o valor da área sob o espectro de emissão de fluorescência (ACF), compreendida entre 475 e 800nm, e o valor do teor de COT presente na amostra (MILORI et al., 2006).

As amostras provenientes do fracionamento físico densimétrico (FLL e FLO) da camada superficial (0,000 a 0,025m) foram submetidas ao tratamento com solução aquosa de HF 10%, segundo metodologia descrita em Dick et al. (2005; 2006). Após o tratamento com HF, foi realizada a análise de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR), Ressonância Paramagnética Eletrônica (EPR) e Ressonância Magnética Nuclear (RMN) conforme descrito no item 3.2 Estudo 1.

Para avaliar os resultados obtidos, foi efetuada a análise de variância e comparados pelo teste t e diferença mínima significativa a 5%, com o auxílio do software SAS.

### **5.3 Resultados e Discussão**

Os sistemas PC e PD apresentaram reduções nos estoques, quando comparado aos valores absolutos do CN, com exceção para FP na camada superficial e na camada de 0,025 – 0,075m para a FLL (Tab. 2). Os maiores estoques de COT no CN podem ser explicados pela não utilização agrícola deste sistema, havendo uma maior estabilização, com um equilíbrio entre as taxas médias de adição de C no solo e as taxas de decomposição dos resíduos culturais ao longo do tempo (AMADO et al., 2006).

Segundo Shang e Tiessen (1997) e Corazza et al. (1999), solos desenvolvidos sob vegetação de campo natural ou de floresta atingem um estado de equilíbrio no seu estoque de C ao longo do tempo, e que a conversão da vegetação nativa para sistemas de culturas, causa redução no estoque de COT, em decorrência do revolvimento do solo, a qual favorece a oxidação da MO.

Adicionalmente, Neves et al. (2005) também verificaram reduções nos estoques de COT em um Latossolo Vermelho quando o solo sob floresta foi substituído por culturas anuais. Wendling et al. (2005) observaram que o cultivo do solo natural por culturas anuais também reduziu drasticamente o estoque de COT em um Latossolo.

**Tabela 2.** Estoque de carbono orgânico total (COT), nitrogênio total (NT), relação carbono/nitrogênio (C/N), carbono da fração grosseira (CFG), carbono associado aos minerais (CAM), carbono da fração leve livre (FLL), carbono da fração leve oclusa (FLO) e carbono da fração pesada (FP) de um Planossolo Háplico sob sistemas de manejo e camadas. Capão do Leão - RS, 2009.

Sistemas*	COT	NT	C/N	CFG	CAM	FLL	FLO	FP
	----- Mg ha <sup>-1</sup> -----			----- Mg ha <sup>-1</sup> -----				
	0,000 – 0,025m							
PC	5,93 a	0,33 a	19	1,64 b	4,29 a	0,88 b	1,41 a	3,65 a
PD	6,57 a	0,38 a	18	2,06 a	4,51 a	1,06 a	1,38 a	4,12 a
CN	7,72	0,54	17	2,47	5,08	2,04	2,62	3,06
	0,025 – 0,075m							
PC	11,12 a	0,60 a	19	2,13 a	9,00 a	0,90 a	2,42 a	7,81 a
PD	10,25 a	0,48 a	22	2,32 a	7,94 a	0,91 a	1,64 b	7,71 a
CN	12,23	0,83	15	3,26	8,97	0,70	3,23	8,29
	0,000 – 0,075m**							
PC	17,06 a	0,93 a	18	3,77 a	13,29 a	1,77 a	3,83 a	11,45 a
PD	16,82 a	0,86 a	20	4,37 a	12,46 a	1,97 a	3,03 b	11,82 a
CN	19,94	1,37	15	5,73	14,21	2,74	5,85	11,36

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna em cada camada não diferem entre si pelo teste t que considera diferença mínima significativa a 5%.

\*PC = preparo convencional; PD = plantio direto e CN = campo nativo.

\*\*Valores obtidos pela soma das duas camadas amostradas.

Na mesma área deste estudo, Cruz (2009) verificou que comparativamente ao CN, o cultivo intensivo, que foi submetida à área experimental anteriormente à instalação do experimento, promoveu redução de 4,6Mg ha<sup>-1</sup> no estoque de COT, possivelmente em decorrência do efeito negativo do preparo do solo sobre o aumento da taxa de decomposição da MO.

Não foi observada diferença significativa entre os estoques de COT e de NT nos sistemas PC e PD, possivelmente em função do curto período de tempo de implantação da área experimental (cinco anos). Similarmente, Carneiro et al. (2009), trabalhando em um Latossolo Vermelho, não encontraram diferenças significativas nos estoques de COT entre os sistemas PD e PC, até 0,10m, atribuindo ao fato de que no sistema convencional de preparo não havia mobilização constante, o que contribuiu em parte para uma maior preservação da palhada sobre o solo entre uma cultura e outra, favorecendo a manutenção do estoque de COT.

No entanto, Rosa (2010) trabalhando em um Planossolo Háplico sob sistemas de manejo de arroz irrigado após 21 anos de experimento, encontrou maior estoque de COT na sucessão de azevém x arroz sob PD em comparação ao sistema de cultivo contínuo de arroz sob PC, atribuindo essa diferença à manutenção da cobertura vegetal e ao mínimo revolvimento do solo no sistema PD, comparativamente à maior taxa de decomposição da MO no sistema PC.

Houve maior sensibilidade do estoque de CFG e FLL às alterações do manejo em comparação ao estoque de COT na camada superficial (0,000 – 0,025m) (Tab. 2). Conforme verificado por outros autores (FREIXO et al., 2002; PINHEIRO et al., 2004a; CONCEIÇÃO et al., 2005; CONCEIÇÃO, 2006; LIMA et al., 2008), estes resultados demonstram que o estoque de CFG e FLL constituem indicadores sensíveis à qualidade dos sistemas de manejo, possibilitando verificar o efeito em curto e médio prazos, enquanto que a variação no estoque de COT e NT do solo inteiro permite caracterizar o efeito dos sistemas de uso e manejo do solo à longo prazo.

O efeito positivo no PD sobre o CFG e a FLL, em relação ao PC, pode estar relacionado à maior adição e manutenção dos resíduos culturais na superfície do solo, em adição à diminuição da atividade microbiana pela redução da temperatura do solo e menor aeração. No sistema PC, especialmente na camada superficial, a ausência de cobertura do solo e as variações de umidade e temperatura, associadas ao aumento do fracionamento e do contato dos resíduos culturais com o solo possibilitam condições mais favoráveis à atividade microbiana e, conseqüentemente, contribuem para o aumento da taxa de decomposição da MO (CONCEIÇÃO, 2006).

Avaliando o efeito de sistemas de cultura e preparo do solo sobre a dinâmica da MO em um Argissolo Vermelho localizado em Eldorado do Sul, RS, Bayer (1996) observou que a taxa de decomposição da MO foi menor para o sistema PD (2,9%), intermediária para o preparo reduzido e maior para o PC (5,4%).

Trabalhando em um Planossolo Háplico na mesma Estação Experimental Terras Baixas, porém em um experimento implantado há 21 anos, Rosa (2010) encontrou valores superiores para o CFG na sucessão de azevém x arroz sob PD em comparação ao sistema de cultivo contínuo de arroz irrigado sob PC, sendo esses estoques de  $7,07\text{Mg ha}^{-1}$  e  $1,82\text{ Mg ha}^{-1}$ , respectivamente.

Kasper et al. (2009) concluíram que os sistemas de preparo com intenso revolvimento reduzem a estabilidade de agregados e os estoques de COT e NT

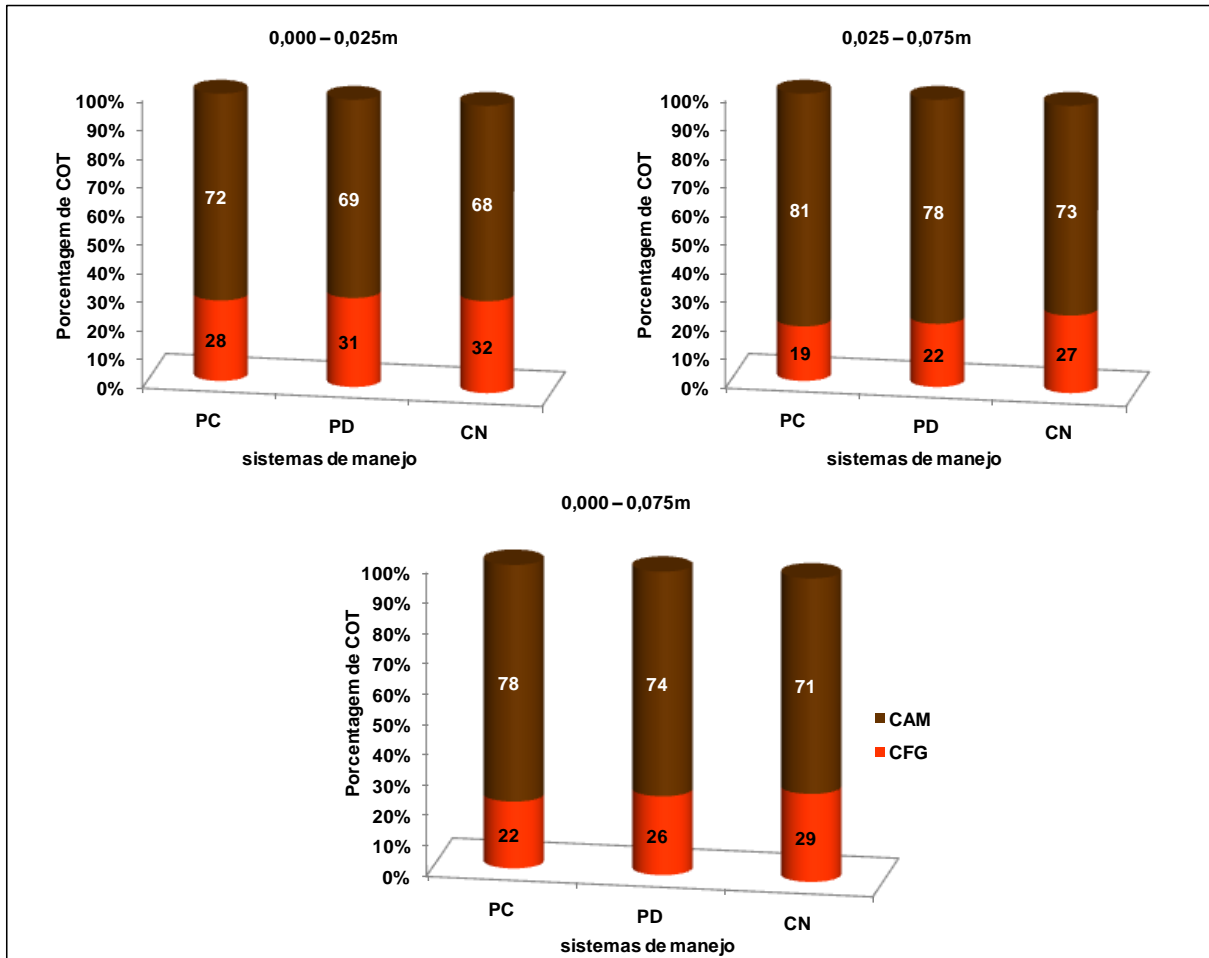
quando comparado ao PD, com reflexos negativos para a qualidade do solo, ambiental e para a sustentabilidade dos agroecossistemas.

Entre as camadas estudadas, não houve diferença significativa para os estoques de CAM e FP entre os sistemas de manejo do solo (Tab. 2). Conforme constatado em outros trabalhos (FREIXO et al. 2002; BAYER et al. 2004; POTES, 2009), o CAM e a FP, são os menos afetados pelo manejo e uso do solo em curto período de tempo, por apresentarem material altamente decomposto e estabilizado principalmente por interações com partículas minerais (BALDOCK; SKEJMSTAD, 2000) e, conseqüentemente, apresentam uma taxa de ciclagem mais lenta comparativamente às frações mais lábeis (CHRISTENSEN, 2001; BAYER et al. 2001).

Na média entre o PC e o PD, para a camada de 0,000 – 0,025m o estoque de carbono na FLO foi 1,3 vezes superior ao estoque de carbono na FLL (Tab. 2). Conceição (2006), encontrou superioridade da FLO em relação à FLL de 4,1 e 6,2 para o PC e PD, respectivamente, em um experimento implantado há 25 anos sobre sob Latossolo Vermelho.

O estoque de carbono da FP foi, na média dos sistemas PC e PD, 2,8 vezes maior do que o observado para a FLO (Tab. 2). Esse resultado é coerente, pois na FP, além do mecanismo de recalcitrância e proteção por oclusão, há proteção adicional à MO pela interação organomineral (PAUL et al. 2008).

A proporção do carbono lábil (CFG) em relação ao estoque total de COT aumentou com a redução da intensidade de revolvimento do solo. Para o acumulado até 0,075m, essas proporções foram de 22%, 26% e 29% para o PC, PD e CN respectivamente (Fig. 1). Rosa (2010) encontrou proporções de 40%, 67% e 31% para um sistema natural, sucessão de azevém x arroz sob PD e cultivo contínuo de arroz sob PC, respectivamente, após 21 anos de cultivo em um Planossolo Háplico. Possivelmente, o preparo convencional contribua para a fragmentação dos resíduos culturais e para o aumento da aeração do sistema, contribuindo para o aumento da taxa de decomposição da fração grosseira da MO, a qual é constituída basicamente por fragmentos de plantas em processo inicial de decomposição. Neste sentido, Bongiovanni e Lobartini (2006) encontraram redução de 76% no estoque de CFG em um solo franco arenoso da Argentina sob 50 anos de cultivo em comparação ao solo não cultivado.



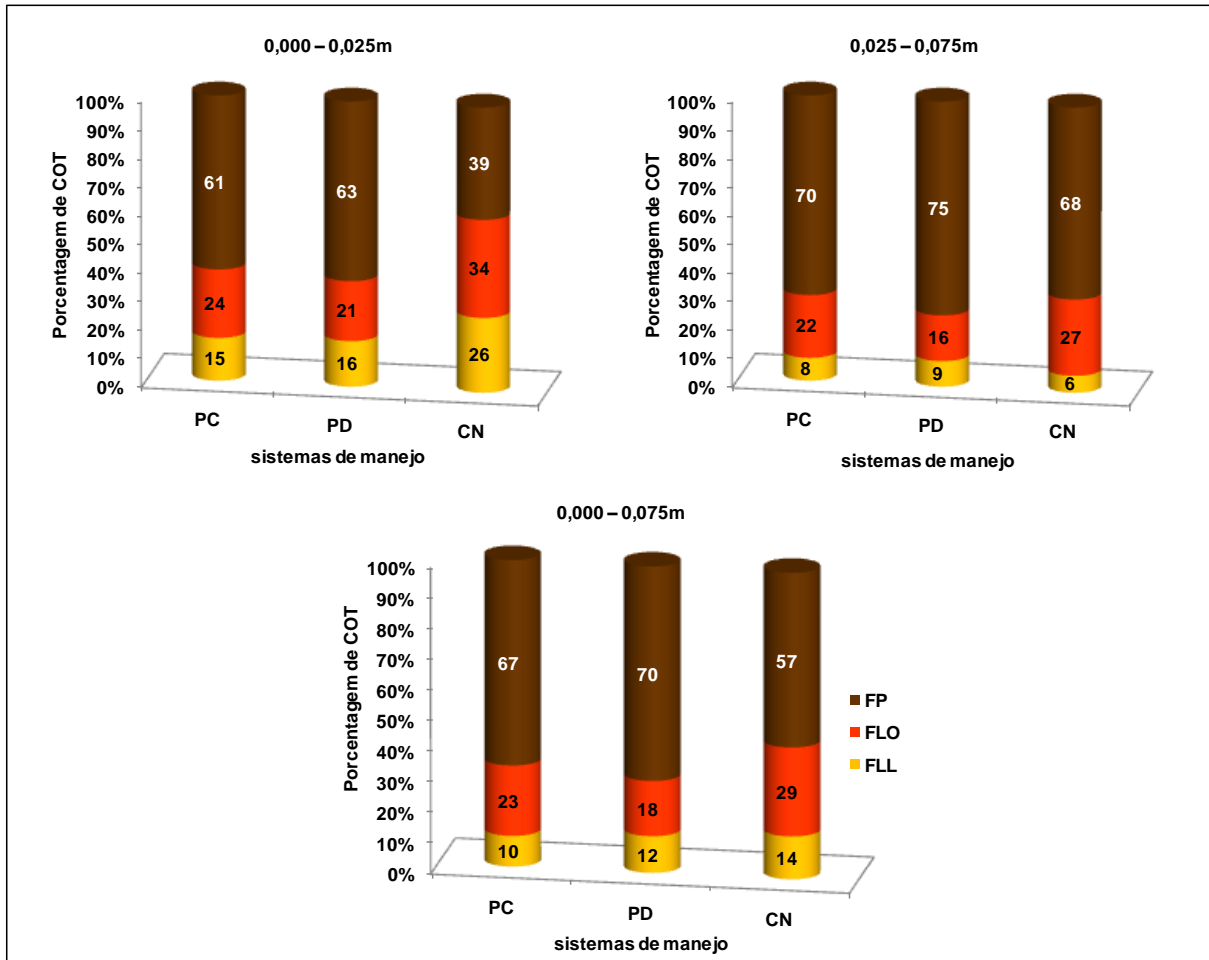
**Figura 1.** Proporção de carbono da fração grosseira (CFG) e carbono associado aos minerais (CAM) de um Planossolo Háplico, sob sistemas de manejo e camadas. Capão do Leão - RS, 2009. PC = preparo convencional; PD = plantio direto e CN = campo nativo. Na camada de 0,000 a 0,075m são mostrados os valores obtidos pela soma das duas camadas amostradas.

As proporções de C obtidas neste estudo para o CAM acumulado até 0,075m foram 78%, 74% e 71% para o PC, PD e CN respectivamente (Fig. 1). Similarmente, Lee et al. (2009) encontraram mais de 70% do C acumulado na fração associada aos minerais na média dos tratamentos para solos com aplicação de casca de arroz, adubação química e sem adubação na camada de 0,00 a 0,15m em um Gleissolo.

Independente do sistema de preparo e da posição no perfil, as proporções das frações físicas da MO em relação ao COT aumentaram na ordem FLL<FLO<FP (Fig. 2). Esta seqüência se deve aos diferentes mecanismos de proteção da MO em cada fração. Na FLL apenas a recalcitrância química é responsável pela estabilidade da MO, enquanto que, na FLO, além recalcitrância química, há proteção física ou oclusão da MO no interior de agregados estáveis, enquanto que na FP, de maior



estabilidade, além da recalcitrância e da proteção física por oclusão, há em adição o processo de interação organomineral, o que é determinante para que a FP seja a mais abundante das frações em agroecossistemas e em ecossistemas naturais (CHRISTENSEN, 1996b; FREIXO et al. 2002; RANGEL; SILVA, 2007).

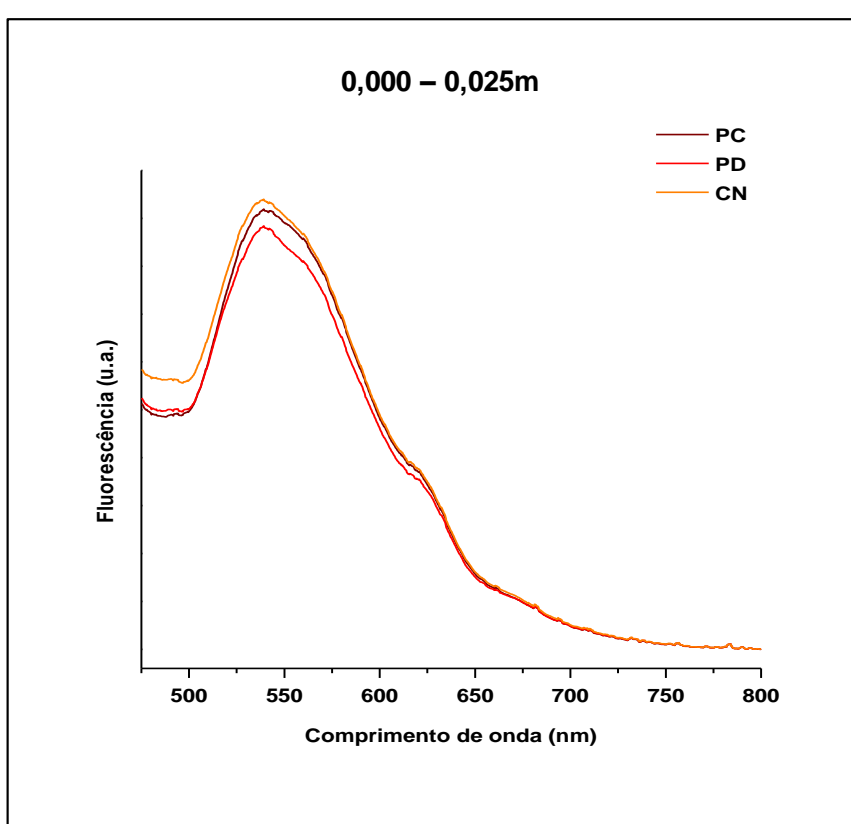


**Figura 2.** Proporção de carbono da fração leve livre (FLL), fração leve oclusa (FLO) e fração pesada (FP) de um Planossolo Háplico, sob sistemas de manejo e camadas. Capão do Leão - RS, 2009. PC = preparo convencional; PD = plantio direto e CN = campo nativo. Na camada de 0,000 a 0,075m são mostrados os valores obtidos pela soma das duas camadas amostradas.

Conceição et al. (2008) verificaram que a FLL representou 8% do estoque de COT na média dos sistemas de manejo quando analisaram um Argissolo Vermelho e um Latossolo Vermelho, indicando que o mecanismo de recalcitrância molecular da MO tem importância limitada diante da estabilidade decorrente da proteção física da MO em agregados do solo (16% a 23%) e da sua interação com os minerais (76% a 69%). Resultados similares também foram obtidos por Rosa (2010) em um Planossolo Háplico localizado no município de Capão do Leão, RS.

As menores proporções da FP nas camadas avaliadas foram verificadas sob o CN (Fig. 2), o que é coerente com o relativo maior acúmulo de MO nas frações mais lábeis (FLL e FLO) em sistemas não antropizados.

Na Figura 3, observam-se os espectros de FIL do solo sob os sistemas de manejo. A origem da Fluorescência Induzida à Laser é a MO. De modo geral, esses espectros mostram-se semelhantes, porém, quando as áreas sob as curvas são normalizadas pelo teor de C, fornecem um índice que pode ser diretamente relacionado com o grau de humificação da MO ( $H_{FIL}$ ), apresentado na Tabela 3.



**Figura 3.** Emissão de fluorescência de um Planossolo Háplico sob sistemas de manejo. Capão do Leão - RS, 2010. PC = preparo convencional; PD = plantio direto e CN = campo nativo.

**Tabela 3.** Grau de humificação ( $H_{FIL}$ ) de um Planossolo Háplico, sob sistemas de manejo na camada de 0,000 - 0,025m. Capão do Leão - RS, 2010.

Sistemas*	$H_{FIL}$
PC	17.984
PD	15.638
CN	12.775

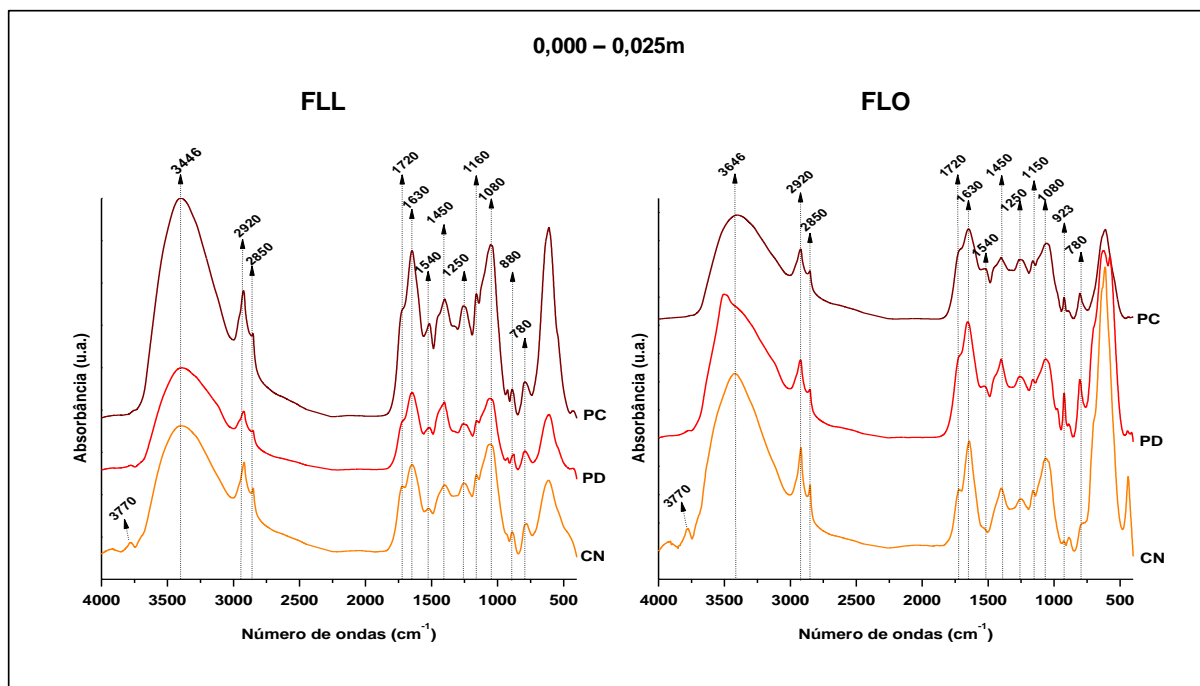
\*PC = preparo convencional; PD = plantio direto e CN = campo nativo.

As amostras de solo submetido ao PC apresentaram maior humificação ( $H_{FIL} = 17.984$ ) (Tab. 3) seguido pelo PD ( $H_{FIL} = 15.638$ ) e CN ( $H_{FIL} = 12.775$ ) respectivamente. A decomposição preferencial e acelerada das porções mais lábeis da MO é induzida no PC em função do intenso revolvimento, resultando assim em um incremento relativo de estruturas recalcitrantes. Por outro lado, no sistema PD ocorre preservação de estruturas mais lábeis (MILORI et al., 2002). Segundo Bayer et al. (2001), o PD diminui a taxa de decomposição da MO, refletindo-se sobre o grau de humificação.

O menor grau de humificação foi verificado sob CN, de acordo com a menor proporção de carbono na FP em relação aos demais sistemas de manejo na camada superficial (Fig. 3). Segundo Bayer (1996), a MO oriunda de sistemas agrícolas de produção geralmente apresenta um estágio de humificação mais avançado do que o solo sob vegetação nativa, especialmente devido à mudanças no regime microclimático do solo e pela quebra de agregados no sistema convencional de preparo, o que contribui para a decomposição de estruturas de natureza mais lábil, com menor grau de humificação.

Similar a este estudo, Favoretto et al. (2008) encontraram menor humificação da MO nos solos sob PD em comparação ao PC, evidenciando que o revolvimento do solo quebra os agregados e expõe estruturas mais lábeis da MO à decomposição. A maior concentração de MO lábil sob PD pode ter reflexos positivos sobre a ciclagem de nutrientes bem como para o processo de formação e estabilização de agregados em curto prazo.

De modo geral, os espectros de FTIR da FLL e da FLO apresentaram bandas de absorção bem definidas e comuns a todos os sistemas de manejo, exceção para a banda em  $3770\text{cm}^{-1}$  que é verificada somente para o CN tanto na FLL como na FLO (Fig. 4), banda esta, característica de vibrações de O-H ou N-H livres (FREIXO; CANELLAS; MACHADO, 2002). Observam-se bandas de absorção intensa em  $3446\text{cm}^{-1}$ , bandas entre  $3600$  e  $3400\text{cm}^{-1}$ , sendo atribuídas a vibração O-Al-OH da gibssita, indicando que este mineral juntamente com a caulinita, esta associado às frações leves da MO (POTES, 2009).



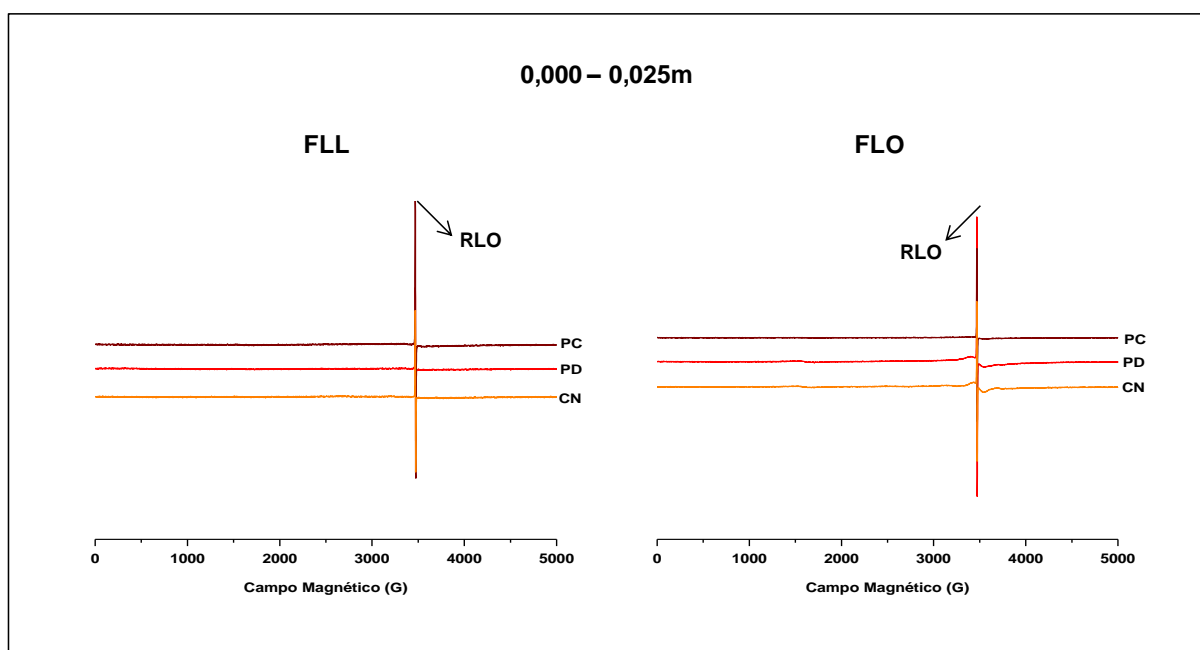
**Figura 4.** Espectros de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) da fração leve livre (FLL) e fração leve oclusa (FLO) de um Planossolo Háplico sob sistemas de manejo. Capão do Leão - RS, 2009. PC = preparo convencional; PD = plantio direto e CN = campo nativo.

Verificam-se duas bandas em  $2920$  e  $2850\text{cm}^{-1}$  devido ao estiramento de ligações C-H alifático, principalmente de grupos metil ( $\text{CH}_3$ ). Em  $1720\text{cm}^{-1}$  é atribuído à presença de carbonilas (C=O) em cetonas e aldeídos. Bandas em  $1630\text{cm}^{-1}$  são referentes ao estiramento C=O de amida, quinona e/ou C=O de grupos  $\text{COO}^-$ , em  $1540\text{cm}^{-1}$  característico de estiramentos C-C de anéis aromáticos (indicador da presença de ligninas) (Fig. 4) (DOBBSS et al. 2009).

Observa-se bandas de absorção em  $1450\text{cm}^{-1}$  atribuídas à deformação de ligações C-H de grupos metil e metilenos; bandas de absorção em  $1250\text{cm}^{-1}$  são atribuídas à presença de deformação de O-H em grupos carboxílicos e ligações éster (C-O) e ainda a presença de fenóis; uma banda de absorção em  $1150\text{cm}^{-1}$  e  $1080\text{cm}^{-1}$  é referente a estiramentos C-O de polissacarídeos. As bandas de absorção de polissacarídeos nas FLO apresentam menor intensidade em relação as bandas da FLL, revelando maior alteração destas frações, com perda de polissacarídeos, que pode ser atribuída a um maior grau de humificação da FLO (Fig. 4) (FREIXO; CANELLAS; MACHADO, 2002).

As bandas de absorção entre  $900$  e  $800\text{cm}^{-1}$  são atribuídas a vibrações de ligações C-H de grupos aromáticos e de impurezas inorgânicas e organometálicas (Fig. 4) (DOBBSS et al. 2009).

Através dos espectros de EPR observam-se linhas estreitas referentes à presença de radical livre orgânico (RLO) (Fig. 5) tanto para a FLL como para a FLO. Sob PC a linha de RLO aparece mais destacada na FLL, enquanto que, sob PD a linha de RLO aparece mais destacada para a FLO.



**Figura 5.** Espectros de Ressonância Paramagnética Eletrônica (EPR) da fração leve livre (FLL) e fração leve oclusa (FLO) de um Planossolo Háplico sob sistemas de manejo. Capão do Leão - RS, 2009. PC = preparo convencional; PD = plantio direto e CN = campo nativo.

A partir dos espectros de EPR em 50G foram calculados os valores de RLO ( $\text{spin g}^{-1}$ ) e o fator g para as diferentes amostras (Tab. 4). Na FLL sob PC observa-se maior valor de RLO do tipo semiquinona ( $1,659 \times 10^{16}$ ), indicando características típicas de ambientes onde é elevada a humificação, sendo os radicais mais protegidos em relação ao meio externo (SILVA; DICK; INDA JÚNIOR, 2008). O sinal de RLO, dado por EPR é atribuído a RLO do tipo semiquinona e quanto maior a sua concentração, maior a humificação da MO. Normalmente, o caráter mais humificado está relacionado com a formação de compostos mais condensados que favorecem a estabilização destes radicais (MARTIN-NETO et al., 1998).

**Tabela 4.** Radical livre orgânico (RLO) e fator g calculado a partir da Ressonância Paramagnética Eletrônica (EPR) da fração leve livre (FLL) e fração leve oclusa (FLO) de um Planossolo Háplico sob sistemas de manejo na camada de 0,000 - 0,025m. Capão do Leão - RS, 2009.

Sistemas*	RLO		RLO	
	(spins/g)	Fator g	(spins/g)	Fator g
	-----FLL-----		-----FLO-----	
PC	1,659x10 <sup>16</sup>	2,00310	2,171x10 <sup>16</sup>	2,00304
PD	9,586x10 <sup>15</sup>	2,00333	2,474x10 <sup>16</sup>	2,00310
CN	3,751x10 <sup>15</sup>	2,00323	1,741x10 <sup>16</sup>	2,00303

\*PC = preparo convencional; PD = plantio direto e CN = campo nativo.

Analisando um Cambissolo na camada superficial, Bayer et al. (2003) observaram menor concentração de RLO do tipo semiquinona em amostras sob PD (15,83 x 10<sup>17</sup>), quando comparado ao solo sob PC (18,33 x 10<sup>17</sup>), indicando menor grau de humificação da MO no sistema PC.

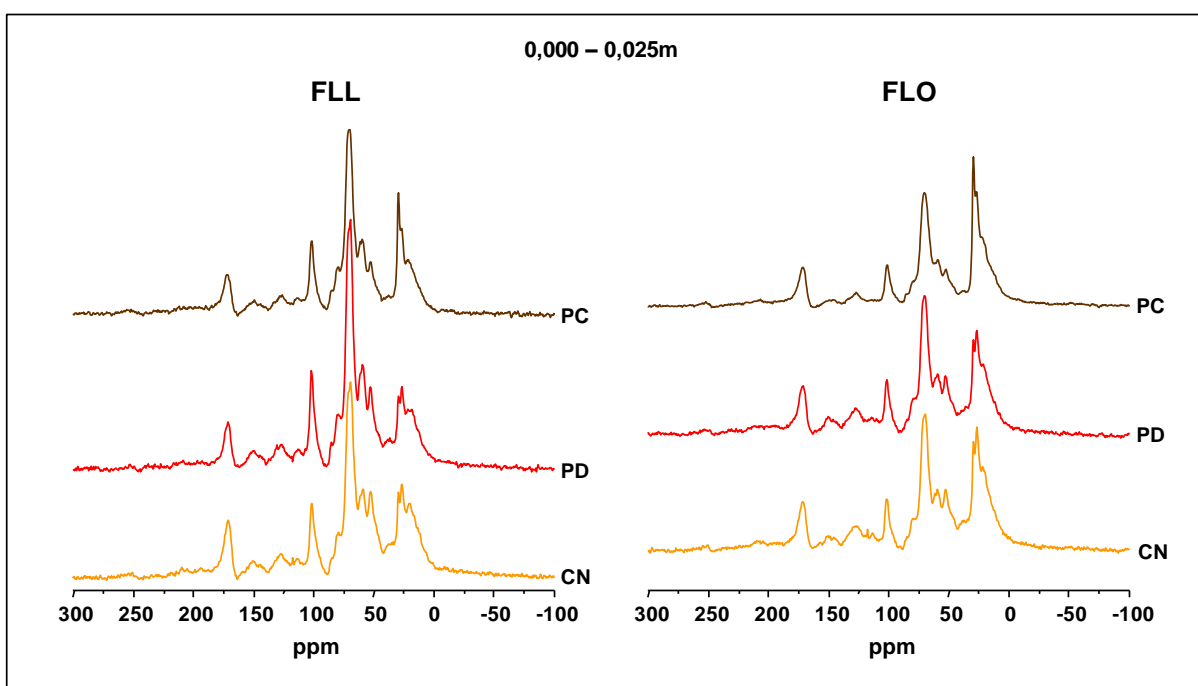
Tanto para a FLL como para a FLO, a menor concentração de RLO do tipo semiquinona foi verificado sob CN comparativamente ao PD e PC (Tab. 4), indicando menor humificação neste sistema. Essa análise está de acordo com a análise de FIL (Tab. 3), onde o menor grau de humificação (H<sub>FIL</sub>) foi verificado no CN.

Os fatores g das amostras estudadas, em torno de 2,003, são típicos de MO e indicam que os RLO localizam-se próximos a átomos de oxigênio, possivelmente conjugados com vários anéis aromáticos na MO (Tab. 4) (SENESI, 1990).

As densidades de spins (RLO) da FLO é mais alta em comparação à FLL (Tab. 4), indicando maior transformação da FLO em decorrência do avanço do processo de humificação.

Os espectros de RMN <sup>13</sup>C da FLL e FLO oriundos dos diferentes sistemas de manejo, na camada de 0,000 - 0,025m, são apresentadas na Figura 6. Os principais sinais foram observados em aproximadamente 30, 56 – 58, 72 – 75, 105, 130, 150 e 173 – 175ppm. A banda em 30ppm origina-se de C metilênico em compostos de longas cadeias alifáticas de origem variada, como ácidos graxos, lipídios, cutina e outros biopolímeros alifáticos. Em aproximadamente 58ppm a banda observada é de grupos metoxílicos da lignina e o C de grupos amina em proteínas. Os sinais proeminentes em 72-75ppm são atribuídos ao C oxigenado de

carboidratos e é acompanhado pelo sinal 105ppm, típicos de celulose, o qual corresponde ao  $C_6(CH_2)$  da estrutura de carboidratos. Os sinais entre 110 e 160ppm são característicos de C aromático. As bandas em 130 e 150ppm são atribuídas ao C aromático, C substituído e ao C aromático O-substituído, respectivamente, em lignina. A intensidade do sinal entre 173-175ppm corresponde, em parte, a grupos carboxílicos de ácidos orgânicos (KÖGEL-KNABNER, 1997; KÖGEL-KNABNER, 2002).



**Figura 6.** Espectroscopia de Ressonância Magnética Nuclear (RMN  $^{13}C$ ) da fração leve livre (FLL) e fração leve oclusa (FLO) de um Planossolo Háplico sob sistemas de manejo. Capão do Leão - RS, 2010. PC = preparo convencional; PD = plantio direto; CN = campo nativo.

Nos diferentes sistemas de manejo do solo, tanto para a FLL quanto para a FLO, houve predominância de grupos C-alquil substituído (C-O-alquil/C-di-O-alquil + N-alquil/C-metoxil), cuja proporção variou de 40% a 57%, seguido do grupo C-alquil (23% a 37%) (Tab. 5). As estruturas aromáticas (C-aromático + C-fenólicos) contribuíram com aproximadamente 11% da composição das amostras, as carboxilas com 8% e o carbonil com 5%.

De forma geral, as proporções obtidas dos grupos de C entre os sistemas de manejo estudados (PC e PD) foram similares em cada fração (FLL e FLO) (Tab. 5). No entanto, na média dos grupos C-alquil substituído (C-O-alquil/C-di-O-alquil + N-

alquil/C-metoxil) entre os sistemas de manejo e uso do solo, em cada fração, houve um decréscimo de 12% da FLL (54%) em relação a FLO (42%). Maior porcentagem de C-alquil substituído na FLL representa maiores quantidades de componentes quimicamente lábeis como os carboidratos. Carboidratos são usualmente considerados os componentes mais lábeis quimicamente e ocorrem como polissacarídeos tais como celulose, hemicelulose e quitina, os quais podem ser rapidamente decompostos por uma ampla variedade de microrganismos servindo como fonte inicial de carbono e energia (KRULL et al., 2003).

**Tabela 5.** Distribuição percentual dos grupos funcionais de carbono (C) determinado por espectroscopia de Ressonância Magnética Nuclear (RMN  $^{13}\text{C}$  CP/MAS) da fração leve livre (FLL) e fração leve oclusa (FLO) de um Planossolo Háplico sob sistemas de manejo na camada de 0,000 a 0,025m. Capão do Leão - RS, 2010.

Sistemas <sup>1</sup>	Distribuição de tipos de C/deslocamento químico (ppm)							
	N-alquil		C-O-alquil		C-aromático	C-fenólico	C-carboxil	C-carbonil
	C-alquil	C-metoxil	C-di-O- alquil					
0 - 45	45 - 60	60 – 110	110 - 140	140 - 160	160 - 185	185 - 230		
	FLL							
PC	23	13	44	7	3	6	4	
PD	25	11	43	7	3	6	5	
CN	28	13	38	7	3	7	4	
	FLO							
PC	37	11	33	5	2	8	4	
PD	30	12	31	9	4	8	6	
CN	34	11	29	8	4	8	6	

\*PC = preparo convencional; PD = plantio direto e CN = campo nativo

Essas proporções estão de acordo com a composição química de cada fração, já que a FLL é representada por fragmentos de plantas incorporadas ao solo, os quais se encontram não decompostos ou parcialmente decompostos. No entanto, a FLO é caracterizada por compostos orgânicos com grau de decomposição mais avançada comparado com a FLL (GOLCHIN et al., 1994; 1997). Este fato é evidenciado pelo aumento de estruturas mais recalcitrantes (C-aromático + C fenólico e C-alquil) na FLO em relação a FLL (Tab. 5).

De forma similar a este estudo, Pillon (2000), Diekow (2003), Dick et al. (2008b) e Rosa (2010) também encontraram maiores proporções de estruturas dos grupos C-alquil substituído (C-O-alquil/C-di-O-alquil + N-alquil/C-metoxil), avaliando



a MO em Argissolo, Gleissolo e em um Planossolo, respectivamente. Segundo Rosa (2010), esta alta porcentagem de estruturas alifáticas é esperada por se tratar da camada superficial (0,000 - 0,025 m), onde se concentra a maior deposição de resíduos culturais. Porém, comparando este estudo com os resultados obtidos por Boeni (2007) e Dick et al. (2008b), as maiores diferenças foram obtidas nas proporções de C-carboxil+C-carbonil, que no solo de várzea foi de 12%, enquanto que, no Latossolo estudado por Boeni (2007) ficou entre 6 a 7% e no Neossolo, no Gleissolo, no Cambissolo e no Latossolo estudado por Dick et al. (2008b) foram de 9%, 7%, 8% e 9%, respectivamente. Rosa (2010) justificou essa diferença por uma maior concentração de ácidos orgânicos produzidos em ambiente alagado.

Com relação às estruturas mais recalcitrantes (C-aromáticos e C-alquil), os resultados obtidos no presente estudo foram inferiores aos encontradas por Boeni (2007) e Dick et al. (2008b). Provavelmente, a menor taxa de decomposição da MO em ambiente hidromórfico em relação aos Latossolos, Neossolos, Gleissolos e Cambissolos contrui para o aumento na proporção de estruturas mais lábeis, como C-O-alquil, com conseqüente redução de compostos mais recalcitrantes (ROSA, 2010).

#### **5.4 Conclusões**

O plantio direto em agroecossistema de terras baixas aumenta os estoques de carbono da fração grosseira e carbono da fração leve livre em comparação ao preparo convencional, sendo este efeito restrito à camada superficial em curto prazo (quatro anos).

Neste período, os sistemas de manejo não afetaram o estoque de carbono associado aos minerais e da fração pesada.

O mecanismo mais importante de proteção e estabilização da matéria orgânica é a interação organomineral, seguido da oclusão e a recalcitrância química.

Através da Fluorescência Induzida à Laser, sob preparo convencional a matéria orgânica apresentou-se mais humificada quando comparado ao plantio direto e ao campo nativo.

A fração leve livre apresenta maior proporção de compostos lábeis em relação à fração leve oclusa.

## **6 ESTUDO 4. FRAÇÕES FÍSICAS E HUMIFICAÇÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA EM AGREGADOS DE UM PLANOSSOLO HÁPLICO SOB SISTEMAS DE MANEJO**

### **6.1 Introdução**

No Rio Grande do Sul, as áreas de várzea representam 20% da superfície do estado e deste percentual, aproximadamente 35% são representados pelos Planossolos, concentrando-se, principalmente, na metade Sul do Estado. Os Planossolos apresentam relevo plano à suavemente ondulado, como característica geral, a presença de horizonte B textural, com incremento de argila, associado a cores acinzentadas ou escurecidas, que refletem baixa permeabilidade, impedindo a infiltração de água (PINTO et al., 2004).

Estes solos apresentam limitações naturais, que são intensificadas pelo cultivo e pelo tráfego de máquinas agrícolas (LIMA; HOOGMOED; BRUSSARD, 2008; LOUZADA et al., 2008). Nessas áreas, sistemas de manejo inadequados têm alterado a densidade, a porosidade (LIMA et al., 2006), a agregação do solo (TAVARES FILHO et al., 2005; REICHERT et al., 2006) e o estoque de matéria orgânica (MO) (ROSA, 2010).

Sistemas conservacionistas de manejo permitem o incremento de MO no solo e geralmente são baseados na redução da intensidade de preparo do solo, como o PD e na adoção de sistemas de cultura com elevada adição de resíduos culturais e sistemas radiculares abundantes e diferentes. Nestes sistemas, a formação de agregados estáveis constitui-se um dos processos importantes para o armazenamento de CO<sub>2</sub> no solo e é dependente de agentes cimentantes como polissacarídeos (agentes transitórios), raízes e hifas de fungos (agentes temporários) e cátions associados a compostos aromáticos recalcitrantes, adsorvidos a polímeros (agentes persistentes), os quais permanecem de forma diferenciada no solo (TISDALL; OADES, 1982). Os sistemas de manejo, além de influenciar a agregação (LI et al., 2006; KELLER et al., 2007), controlam a permanência desses agentes cimentantes.

A significativa influência dos sistemas de manejo sobre a composição das frações densimétricas leves (livre e oclusa) da MO é reportada em alguns estudos, sendo que estes compartimentos orgânicos, principalmente a FLL, são altamente

sensíveis em curto prazo e diretamente afetados pelas práticas de manejo (GREGORICH et al., 1989; GREGORICH; JANZEN, 1996; SIX et al., 1998). A fração pesada, constituída por MO associada aos minerais, pertence a um compartimento orgânico mais estável (CHRISTENSEN, 1992; GOLCHIN et al., 1997). As variações verificadas nas frações físicas da MO são resultantes de diferenças na natureza e na magnitude dos processos de decomposição atuantes em cada solo e influenciados pelos diferentes sistemas de manejo (BOENI 2007).

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 MO seria um mecanismo pouco eficiente na sua estabilização e a FLO pouco contribuiria para o acúmulo de C em solos de várzea cultivados (NASCIMENTO et al., 2009). Tal hipótese poderá ser melhor respaldada pelo adensamento de estudos em diferentes solos representativos do Bioma Pampa.

Neste contexto, identificar os mecanismos de estabilização da MO que atuam com maior eficiência em solos hidromórficos é essencial para compreender e avaliar a dinâmica da MO nestes agroecossistemas. O objetivo deste estudo foi avaliar o estoque de carbono orgânico total do solo, o estoque das frações físicas da matéria orgânica e o grau de humificação em classes de agregados de um Planossolo Háplico sob preparo convencional e plantio direto.

## **6.2 Material e Métodos**

A área de coleta deste estudo, o tipo de solo, as camadas amostradas e os procedimentos de coleta correspondem aos mesmos apresentados no item 5.2 do Estudo 3.

O preparo do solo e o peneiramento em classes de agregados foram realizados conforme o item 4.2 do Estudo 2.

O fracionamento físico granulométrico e densimétrico foram realizados conforme o item 3.2 do Estudo 1. Porém, a energia de dispersão por ultra-son foi de  $352\text{J mL}^{-1}$ , a qual, foi determinada previamente através de uma curva de dispersão onde foram aplicados níveis crescentes de energia, com o objetivo de determinar o ponto de dispersão total de agregados do solo em partículas primárias.

A quantificação dos estoques de COT, CFG, CAM, FLL, FLO e FP, a porcentagem de agregados seco, as análises de FIL, FTIR e EPR e o tratamento das amostras com HF 10 % foram realizados conforme o capítulo 4 do Estudo 2.

Os resultados obtidos foram submetidos a análises de variância, ao teste t e análises de regressão linear ao nível de 5%, com o auxílio do software SAS.

### 6.3 Resultados e Discussão

De forma geral, o efeito do manejo do solo reduziu os estoques de COT na camada superficial (0,000 – 0,025m) quando comparado aos valores absolutos do CN, principalmente nas classes de agregados que compreendem de 4,76 a <0,25mm (Tab. 1). Devido ao curto período de implantação dos sistemas de manejo, possivelmente tal comportamento possa estar mais relacionado ao processo de degradação da qualidade do solo devido ao intenso preparo convencional para a implantação de experimentos com culturas anuais anteriormente à implantação desta área experimental.

**Tabela 1.** Estoque de carbono orgânico total (COT) ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) em classes de agregados de um Planossolo Háplico sob sistemas de manejo e camadas. Capão do Leão - RS, 2009.

Sistemas <sup>*</sup>	Classe de diâmetro (mm)					
	8,00 - 4,76	4,76 - 2,00	2,00 - 1,00	1,00 - 0,50	0,50 - 0,25	< 0,25
0,000 – 0,025m						
PC	0,86 aB	1,34 aA	0,99 aB	0,83 aB	0,80 aB	0,87 aB
PD	1,13 aAB	1,31 aA	1,01 aBC	0,67 bD	0,70 aD	0,85 aCD
CN	0,57 B	1,44 B	1,12 C	0,82 D	0,84 D	1,80 A
0,025 – 0,075m						
PC	2,57 aB	3,21 aA	1,85 aC	1,48 aD	1,04 aE	1,03 bE
PD	2,20 aA	2,14 bA	1,60 aA	1,47 aA	1,34 aA	1,76 aA
CN	1,37 D	2,16 B	1,64 CD	1,65 CD	1,92 BC	3,30 A
0,000 – 0,075m**						
PC	3,44 aB	4,56 aA	2,84 aC	2,31 aD	1,85 aE	1,89 aE
PD	3,33 aAB	3,45 bA	2,61 aBC	2,14 aC	2,04 aC	2,61 aBC
CN	1,94 D	3,60 B	2,75 C	2,40 CD	2,74 C	5,09 A

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna em cada camada e maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste t que considera a diferença mínima significativa a 5%.

<sup>\*</sup>PC = Plantio convencional; PD = Plantio Direto e CN = Campo nativo

<sup>\*\*</sup>Valores obtidos pela soma das duas camadas amostradas.

Neves et al. (2004) verificaram que a perturbação antrópica de um sistema estável sob campo nativo causou perdas de carbono principalmente pelo preparo do solo, especialmente pela intensidade de revolvimento, aumentando a oxidação de

compostos orgânicos, ruptura mecânica dos agregados e exposição da superfície do solo ao impedimento das gotas de chuva.

Os sistemas de manejo com ausência ou menor revolvimento do solo apresentaram tendência em armazenar mais COT. Rangel e Silva (2007) afirmam que o aumento do estoque de COT em solos submetidos a sistemas conservacionistas de manejo pode estar associado a dois fatores principais: proteção física dos compostos orgânicos contra a decomposição microbiana, favorecida pela oclusão dos compostos orgânicos nos agregados do solo; e proteção química dos compostos orgânicos por meio da interação destes com os minerais e cátions do solo, o que dificulta a sua decomposição.

Analisando um Argissolo Vermelho após 16 anos de cultivo, Leite et al. (2003), verificaram que todas as estratégias de manejo resultaram em redução nos estoques de COT em relação à Floresta Atlântica, indicando a susceptibilidade da oxidação do COT dos solos sob vegetação natural, quando estes são submetidos à agricultura.

Adicionalmente, Carneiro et al. (2009), analisaram um Latossolo Vermelho sob sistema PD e PC na sucessão soja/milho, usando como área de referência, uma mata secundária, verificaram que os maiores estoques de COT na profundidade de 0,00 a 0,05m foram observados na mata, atribuído ao fato de que a MO neste sistema encontra-se preservada devido a não mobilização do solo e a constante ciclagem de material vegetal, proporcionado pela maior diversidade de espécies presentes na mata.

Para o estoque de COT, entre os sistemas de manejo, diferenças estatísticas foram verificadas em todas as camadas avaliadas (Tab. 1). Sendo na camada de 0,000 – 0,025m na classes de agregados de 1,00 – 0,50mm, na camada de 0,025 – 0,075m nas classes de 4,76 – 2,00mm e <0,25mm e para o estoque de COT acumulado na camada de 0,000 a 0,075m na classe de agregados de 4,76 – 2,00mm. Tais diferenças mostram superioridade do PD em relação ao PC somente na camada de 0,025 – 0,075m na classe de agregados <0,25m, embora fosse esperado que tais diferenças se manifestassem em outras classes de agregados, em especial naquelas de maior tamanho. Possivelmente, tal comportamento seja resultado do curto tempo de implantação dos sistemas de manejo, ainda insuficiente para promover alterações mais profundas na dinâmica da MO no interior de agregados.

Maiores valores de CFG absolutos no CN foram verificados nas classes de agregados que compreendem de 2,00 a <0,25mm na camada de 0,000 – 0,025m e para o acumulado na camada de 0,000 a 0,075m (Tab. 2). Na camada de 0,025 – 0,075m maiores valores absolutos para o estoque de CFG do CN foram observados na classes de 1,00 a <0,25mm. Possivelmente, a manutenção da cobertura vegetal e o não revolvimento do solo em áreas naturais sejam os responsáveis pelo maior estoque de CFG.

A deposição de resíduos na superfície do solo em PD aumentou o estoque de CFG na camada de 0,000 – 0,025m, sendo verificadas diferenças nas classes de agregados de 1,00 a <0,25mm (Tab. 2). Este aumento pode estar relacionado à maior adição e manutenção dos resíduos culturais na superfície do solo, além da diminuição da atividade microbiana pela redução da temperatura do solo e menor aeração, e principalmente, à proteção física da MO no interior de agregados. A agregação é relacionada à proteção física de frações lábeis da MO à biodegradação. Adicionalmente, sob PD a menor exposição dos agregados na superfície do solo a repetidos ciclos de umedecimento e secamento, o menor impacto das gotas da chuva sobre o solo contribuem para a maior estabilidade dos agregados, no interior dos quais a fração orgânica encontra-se fisicamente protegida dos microrganismos e de suas enzimas (BADESDENT; CHENU; BALABANE, 2000).

**Tabela 2.** Estoque de carbono da fração grosseira (CFG) (Mg ha<sup>-1</sup>) em classes de agregados de um Planossolo Háplico sob sistemas de manejo e camadas. Capão do Leão - RS, 2009.

Sistemas <sup>*</sup>	Classe de diâmetro (mm)					
	8,00 - 4,76	4,76 - 2,00	2,00 - 1,00	1,00 - 0,50	0,50 - 0,25	< 0,25
0,000 – 0,025m						
PC	0,22 aD	0,41 aA	0,28 aB	0,25 bC	0,21 bD	0,16 bE
PD	0,29 aA	0,49 aA	0,34 aA	0,36 aA	0,37 aA	0,29 aA
CN	0,12 C	0,35 BC	0,40 B	0,37 B	0,39 B	0,78 A
0,025 – 0,075m						
PC	0,55 aAB	0,58 aA	0,53 aB	0,36 aC	0,31 aC	0,19 bD
PD	0,34 bBC	0,58 aA	0,39 bB	0,35 aBC	0,31 aC	0,30 aC
CN	0,30 E	0,41 DE	0,45 CD	0,56 BC	0,60 B	0,86 A
0,000 – 0,075m**						
PC	0,77 aB	0,98 aA	0,81 aB	0,60 bC	0,53 bD	0,35 bE
PD	0,63 bB	1,07 aA	0,73 aB	0,71 aB	0,68 aB	0,59 aB
CN	0,42 C	0,76 BC	0,85 B	0,93 B	1,00 B	1,64 A

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna em cada camada e maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste t que considera a diferença mínima significativa a 5%.

<sup>\*</sup>PC = Plantio convencional; PD = Plantio Direto e CN = Campo nativo

<sup>\*\*</sup>Valores obtidos pela soma das duas camadas amostradas.

Bayer et al, (2004) analisaram um Latossolo Vermelho sob PD e PC e concluíram que o PD aumentou os estoques de COT do solo em comparação ao PC, sendo este efeito restrito para a camada superficial e dependente do sistema de cultura utilizado. O acúmulo de C no solo em PD ocorreu principalmente no CFG, o qual foi mais sensível do que o COT às alterações do manejo do solo.

Na camada de 0,025 - 0,075m, foi verificada superioridade do estoque de CFG em PC nas classes de agregados de 8,00 – 4,76mm e de 2,00 – 1,00mm (Tab. 2). É provável que o revolvimento do solo, homogeneizando as camadas superficiais pelas operações de aração e gradagem, tenha contribuído para ocorrência desse efeito.

Na camada de 0,000 – 0,025m foram observadas diferenças nas classes de agregados de 1,00 a 0,25mm, na camada de 0,025 – 0,075m e no acumulado de 0,000 a 0,075m, na classe de agregados de 4,76 – 2,00mm, sendo os maiores estoques de CAM verificados sob PC (Tab. 3). Este fato pode ser atribuído possivelmente à interação da MO com a fração mineral, que pelo processo de revolvimento do solo, ocorreu o rompimento dos agregados e, conseqüentemente, exposição da MO lábil à decomposição pelos microrganismos, aumentando assim estruturas mais recalcitrantes e com baixas taxas de decomposição. Pelo fato do CAM ser a fração mais estável da MO do solo, compõe-se das frações de tamanho silte e argila (<53µm), constituídas de material orgânico mais humificado, como por exemplo, compostos orgânicos remanescentes do processo de degradação e produtos de origem microbiana, e concentram grandes proporções da MO, basicamente por formarem facilmente associações organominerais em virtude da grande área superficial específica dessas partículas minerais (CONCEIÇÃO, 2006; DIEKOW, 2003; GREGORICH et al., 2006).

Corroborando com o presente estudo, Rangel, Silva e Guimarães (2007) também verificaram aumento do CAM em um Latossolo Vermelho cultivado com café.

Analisando os valores absolutos, os maiores estoques de FLL e FLO, de modo geral, para todas as camadas analisadas, foram observados no CN principalmente nas classes de agregados que compreendem de 4,76 a <0,25mm (Tab. 4 e 5).

**Tabela 3.** Estoque de carbono associado aos minerais (CAM) ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) em classes de agregados de um Planossolo Háplico sob sistemas de manejo e camadas. Capão do Leão - RS, 2009.

Sistemas*	Classe de diâmetro (mm)					
	8,00 - 4,76	4,76 - 2,00	2,00 - 1,00	1,00 - 0,50	0,50 - 0,25	< 0,25
	0,000 – 0,025m					
PC	0,65 aB	0,94 aA	0,70 aB	0,58 aB	0,59 aB	0,71 aB
PD	0,83 aA	0,81 aAB	0,66 aAB	0,31 bC	0,32 bC	0,56 aBC
CN	0,46 C	1,09 A	0,72 BC	0,42 C	0,44 C	1,02 AB
	0,025 – 0,075m					
PC	2,02 aB	2,64 aA	1,33 aC	1,12 aCD	0,73 aE	0,83 bDE
PD	1,85 aA	1,56 bA	1,21 aA	1,12 aA	1,04 aA	1,47 aA
CN	1,06 C	1,75 B	1,19 C	1,03 C	1,32 BC	2,43 A
	0,000 – 0,075m**					
PC	2,67 aB	3,57 aA	2,03 aC	1,71 aCD	1,32 aD	1,54 aD
PD	2,69 aA	2,38 bA	1,87 aAB	1,43 aB	1,36 aB	2,03 aAB
CN	1,53 B	2,84 a	1,91 B	1,45 B	1,76 B	3,45 A

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna em cada camada e maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste t que considera a diferença mínima significativa a 5%.

\*PC = Plantio convencional; PD = Plantio Direto e CN = Campo nativo

\*\*Valores obtidos pela soma das duas camadas amostradas.

**Tabela 4.** Estoque de carbono da fração leve livre (FLL) ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) em classes de agregados de um Planossolo Háplico sob sistemas de manejo e camadas. Capão do Leão - RS, 2009.

Sistemas*	Classe de diâmetro (mm)					
	8,00 - 4,76	4,76 - 2,00	2,00 - 1,00	1,00 - 0,50	0,50 - 0,25	< 0,25
	0,000 – 0,025m					
PC	0,09 aCD	0,28 aA	0,23 aA	0,14 aB	0,12 bBC	0,04 bD
PD	0,08 aA	0,25 aA	0,33 aA	0,36 aA	0,35 aA	0,19 aA
CN	0,13 C	0,31 ABC	0,44 AB	0,38 AB	0,46 A	0,24 BC
	0,025 – 0,075m					
PC	0,13 aA	0,20 aA	0,15 aA	0,15 aA	0,16 aA	0,06 aA
PD	0,12 aA	0,11 bA	0,13 aA	0,14 aA	0,17 aA	0,11 aA
CN	0,04 A	0,22 A	0,20 A	0,35 A	0,23 A	0,22 A
	0,000 – 0,075m**					
PC	0,21 aC	0,48 aA	0,38 aB	0,30 aBC	0,28 bBC	0,09 bD
PD	0,20 aA	0,36 aA	0,46 aA	0,50 aA	0,52 aA	0,30 aA
CN	0,17 B	0,54 A	0,64 A	0,73 A	0,74 A	0,47 A

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna em cada camada e maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste t que considera a diferença mínima significativa a 5%.

\*PC = Plantio convencional; PD = Plantio Direto e CN = Campo nativo

\*\*Valores obtidos pela soma das duas camadas amostradas.



**Tabela 5.** Estoque de carbono da fração leve oclusa (FLO) ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) em classes de agregados de um Planossolo Háplico sob sistemas de manejo e camadas. Capão do Leão - RS, 2009.

Sistemas*	Classe de diâmetro (mm)					
	8,00 - 4,76	4,76 - 2,00	2,00 - 1,00	1,00 - 0,50	0,50 - 0,25	< 0,25
	0,000 – 0,025m					
PC	0,16 bA	0,18 aA	0,11 aA	0,18 aA	0,15 aA	0,22 aA
PD	0,23 aA	0,13 aB	0,12 aB	0,16 aB	0,16 aB	0,17 aB
CN	0,19 D	0,43 B	0,24 BCD	0,40 BC	0,22 CD	0,69 A
	0,025 – 0,075m					
PC	0,51 aA	0,56 aA	0,35 aB	0,30 aBC	0,21 aBC	0,18 aC
PD	0,42 aA	0,35 bA	0,26 aB	0,20 aB	0,21 aB	0,23 aB
CN	0,39 B	0,66 A	0,40 B	0,38 B	0,23 B	0,63 A
	0,000 – 0,075m**					
PC	0,67 aA	0,74 aA	0,46 aB	0,49 aB	0,36 aB	0,40 aB
PD	0,70 aA	0,48 bB	0,38 aC	0,36 bC	0,38 aC	0,41 aBC
CN	0,58 C	1,09 AB	0,64 C	0,78 BC	0,45 C	1,32 A

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna em cada camada e maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste t que considera a diferença mínima significativa a 5%.

\*PC = Plantio convencional; PD = Plantio Direto e CN = Campo nativo

\*\*Valores obtidos pela soma das duas camadas amostradas.

Neste sentido, Bertol et al. (2003) encontraram na camada de 0,000 – 0,025m, teores de COT de 56 e 77% maiores na semeadura direta e no campo nativo respectivamente, que no preparo convencional, este fato foi explicado principalmente pela ausência de revolvimento do solo, permitindo a manutenção e o acúmulo de resíduos culturais na superfície, contribuindo para o aumento de C nas frações leves.

Adicionalmente, Pinheiro et al. (2004a) em um Latossolo Vermelho verificaram diferenças nos teores de C e N da FLL em um experimento de cinco anos, sendo os maiores teores observados no sistema de referência (gramíneas) decrescendo no cultivo mínimo, preparo convencional e solo sem cobertura, respectivamente.

Diferenças foram observadas nas classes de agregados de 0,50 a <0,25mm, na camada de 0,000 – 0,025m e para o acumulado de 0,000 a 0,075m, sendo os maiores estoques de FLL observados sob PD quando comparado com PC (Tab. 4). Conforme mencionado anteriormente, a manutenção da cobertura vegetal e o não revolvimento do solo possivelmente estejam contribuindo para o incremento de FLL no solo sob PD, favorecendo assim a manutenção e/ou recuperação dos estoques de MO. Conforme Bayer, (1996); Burle et al., (1997); Pillon, (2000); Bayer et al., (2000a) e Diekow, (2003), concentrações mais elevadas de MO em camadas

superficiais estão diretamente relacionadas ao processo de adição de resíduos culturais pela parte aérea e pelo sistema radicular das culturas na superfície do solo.

Para solos tropicais, Oliveira et al. (2004) verificaram maior acúmulo de MO quando foi utilizado PD por 20 anos com soja, milho e arroz, em comparação com sistema de preparo do solo com arado de discos e área com vegetação natural sob Cerrado, em um Latossolo Vermelho do Distrito Federal. Estes autores observaram estoques de C significativamente inferiores para o uso do arado de discos nas camadas de 0,00 a 0,05m e de 0,05 a 0,10m, sendo semelhantes nas demais camadas avaliadas.

O revolvimento do solo e a homogeneização às camadas superficiais pelas operações de aração e gradagem pelo PC promoveram maior estoque de FLL na camada de 0,025 – 0,075m na classe de agregados de 4,76 – 2,00mm (Tab. 4).

Com relação a FLO (Tab. 5), maiores incrementos de carbono na camada superficial, foram observados na classe de agregados de 8,00 – 4,76mm para o PD. Segundo Paladini e Mielniczuk (1991) e Pinheiro et al. (2004b) o tempo de atuação da vegetação e a liberação de excreções do sistema radicular das gramíneas, associado à ausência de revolvimento do solo, contribuem para a formação de macroagregados estáveis, nos quais acumula MO no seu interior.

Conceição et al. (2008) verificaram que a proporção de C armazenado na FLO da MO do solo foi maior nos solos sob PD e pastagem (31% no Argissolo e 18% no Latossolo) do que no solo sob sistema de PC (11% no Argissolo e 15% no Latossolo), e atribuíram essa maior proporção no PD e na pastagem à condição de solo sem revolvimento e ao alto aporte de resíduos culturais, mais favorável à formação e estabilização de agregados de solo.

A FP, por constituir-se de material altamente decomposto e estabilizado principalmente por interações com partículas minerais, apresenta uma taxa de decomposição mais lenta, não sendo facilmente afetada pelos diferentes sistemas de manejo e uso do solo (BALDOCK, et al., 1992; CHRISTENSEN, 1996b; BALDOCK et al., 1997; BAYER et al., 2004). Bayer et al, (2004) analisaram um Latossolo Vermelho sob PC e PD e diferentes sistemas de cultivo e verificaram que após seis anos de implantação do experimento, os sistemas de manejo e uso dos solo não afetaram o estoque de CAM, o que corresponde praticamente a FP. Porém, neste estudo, em quatros anos de experimento, quando a FP foi avaliada em

classes de agregados, foi possível identificar diferenças conforme observado na Tabela 6. No entanto, no capítulo 5 do estudo 3, quando a FP foi avaliada no solo inteiro, não foi possível observar diferenças.

**Tabela 6.** Estoque de carbono da fração pesada (FP) ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) em classes de agregados de um Planossolo Háplico sob sistemas de manejo e camadas. Capão do Leão - RS, 2009.

Sistemas <sup>†</sup>	Classe de diâmetro (mm)					
	8,00 - 4,76	4,76 - 2,00	2,00 - 1,00	1,00 - 0,50	0,50 - 0,25	< 0,25
	0,000 – 0,025m					
PC	0,61 aB	0,88 aA	0,65 aB	0,51 aB	0,54 aB	0,61 aB
PD	0,77 aAB	0,93 aA	0,56 aBC	0,15 bD	0,18 bD	0,48 aC
CN	0,25 CD	0,70 AB	0,44 BC	0,05 D	0,16 D	0,86 A
	0,025 – 0,075m					
PC	1,94 aB	2,45 aA	1,36 aC	1,02 aCD	0,67 aD	0,80 bD
PD	1,66 aA	1,68 bA	1,20 aA	1,12 aA	0,96 aA	1,42 aA
CN	0,94 BC	1,27 BC	1,04 BC	0,85 C	1,41 B	2,44 A
	0,000 – 0,075m**					
PC	2,54 aB	3,34 aA	2,00 aC	1,52 aD	1,21 aD	1,40 aD
PD	2,43 aAB	2,61 bA	1,77 aBC	1,28 aC	1,14 aC	1,91 aABC
CN	1,19 CD	1,97 B	1,47 BC	0,90 D	1,57 BC	3,31 A

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna em cada camada e maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste t que considera a diferença mínima significativa a 5%.

<sup>†</sup>PC = Plantio convencional; PD = Plantio Direto e CN = Campo nativo

\*\*Valores obtidos pela soma das duas camadas amostradas.

Além disso, as diferenças estatísticas observadas para o estoque de FP (Tab. 6) foram as mesmas verificadas para o estoque de CAM (Tab. 3), tanto nas classes de agregados quanto para as camadas avaliadas, seguindo mesma tendência de maiores estoques de FP sob PC. Rangel e Silva (2007) em um Latossolo Vermelho também observaram aumento da FP com a intensidade de cultivo do solo, o que implica em menores formas de C prontamente disponíveis aos microrganismos.

Analisando os valores dos estoques de COT, CFG, CAM, FLO e FP (Tab.1, 2, 3, 5 e 6) para o PC e o PD, verifica-se que os maiores estoques, foram encontrados nas classes de agregados de maior tamanho (8,00 a 2,00mm), ocorrendo de modo geral, uma pequena redução nestes estoques com a diminuição do tamanho dos agregados.

Neste sentido, Wright e Hons (2005) concluíram que sistemas conservacionistas aumentam as proporções de macroagregados e que o maior estoque de COT foi observado nas maiores classes de tamanho (macroagregados)

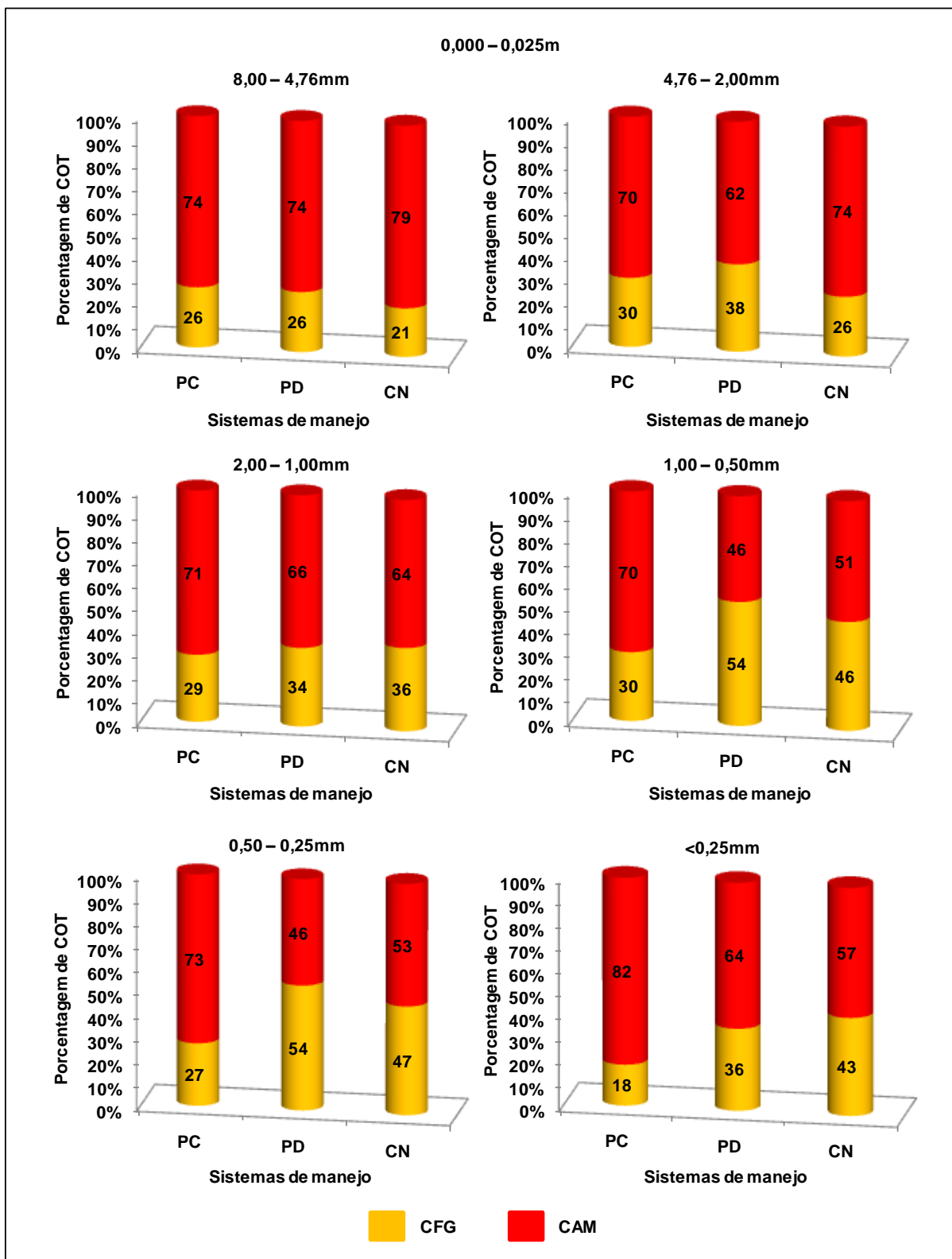
sob diferentes sistemas de manejo. Castro Filho et al. (2002) encontraram maiores valores de COT em macroagregados (>2,00mm) e atribuíram que as maiores quantidades de carbono estiveram associadas aos maiores agregados.

Martins et al. (2009) encontraram correlações positivas entre o diâmetro médio ponderado de agregados, conteúdo de COT e de polissacarídeos sob PD em Latossolos. Os maiores conteúdos de COT e de polissacarídeos foram encontrados nas classes de maior diâmetro de agregados, indicando que a estabilidade de agregados é mediada pelo teor de COT e por polissacarídeos.

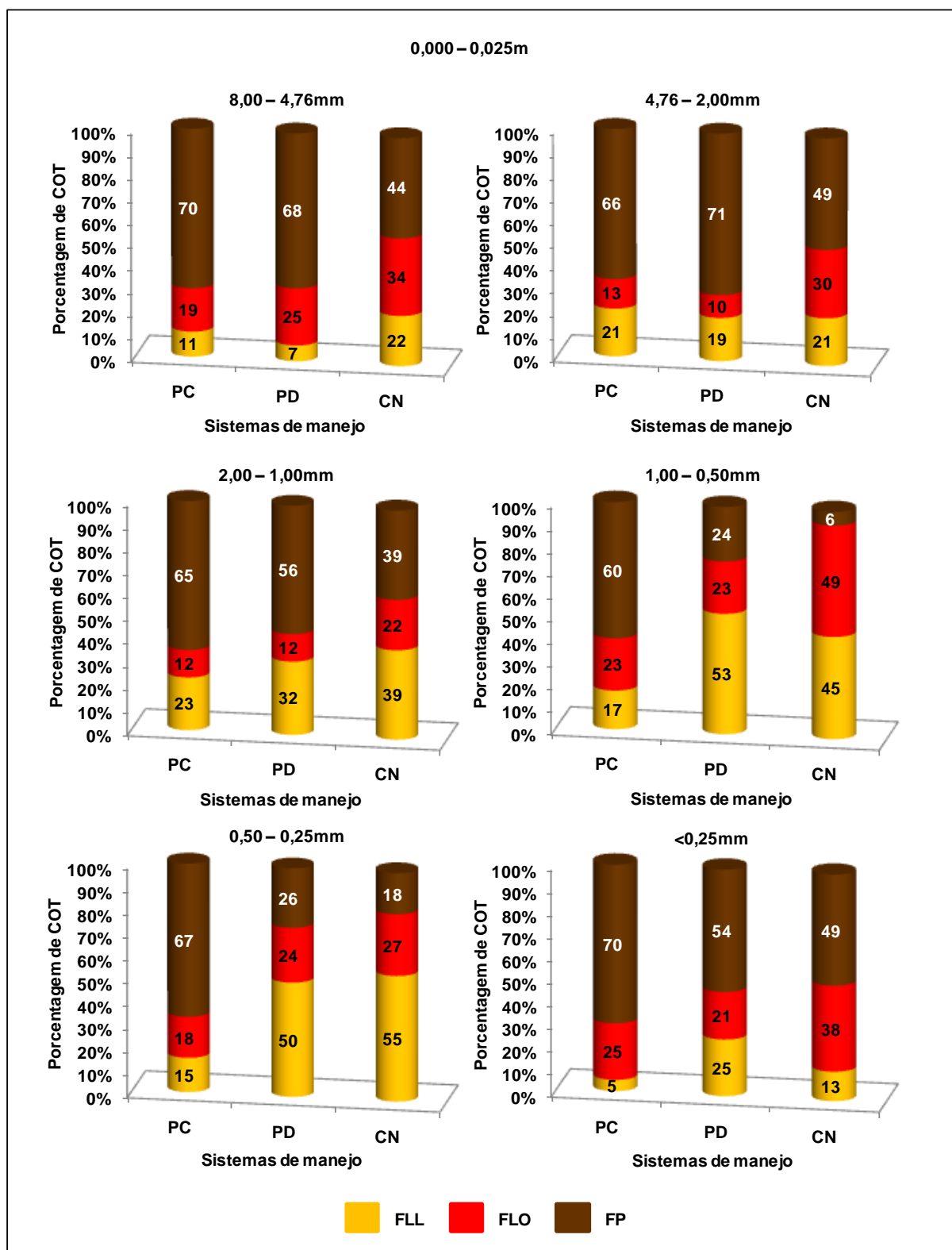
Mendes et al. (2003) verificaram em um Latossolo que na área sob vegetação nativa e no PD, os teores de MO dos macroagregados foram significativamente superiores aos dos microagregados, enquanto, no PC, os teores de MO nos macro e microagregados foram semelhantes.

Para o CN os maiores estoques de COT, CFG, CAM, FLO e FP (Tab.1, 2, 3, 5 e 6) foram verificados de modo geral na classes de agregados <0,25mm. Passos et al. (2007) também verificaram maiores estoques de C nas menores classes de agregados em um Latossolo Vermelho fracionado por via seca, atribuindo esse comportamento às maiores reservas orgânicas presentes nos agregados menores as quais estão associados principalmente as frações silte e argila.

Conforme observado nas Figuras 1 e 2, com exceção das classes de agregados que compreendem de 8,00 a 2,00mm, as maiores proporções de CFG e FLL para as demais classes de agregados foram verificadas sob CN e PD. Similiarmente, Conceição et al. (2008) verificaram aumento na proporção de C na FLL no solo sob PD em comparação ao PC, decorrente provavelmente da redução na temperatura do solo sob PD, a qual diminuiria a taxa de decomposição dessa fração lábil da MO do solo.



**Figura 1.** Proporção de carbono na fração grosseira (CFG) e carbono associado aos minerais (CAM) um Planossolo Háplico, sob sistemas de manejo na camada superficial. Capão do Leão - RS, 2009. PC = preparo convencional; PD = plantio direto e CN = campo nativo.



**Figura 2.** Proporção do carbono na fração leve livre (FLL), fração leve oclusa (FLO) e fração pesada (FP) de um Planossolo Háplico, sob sistemas de manejo na camada superficial. Capão do Leão - RS, 2009. PC = preparo convencional; PD = plantio direto e CN = campo nativo.

Salton et al. (2005) salientam que o fracionamento da MO possibilita avaliar a eficiência dos sistemas de manejo em aportar MO lábil ao solo, que posteriormente vai abastecer o compartimento estável da MOS, aquela associada aos minerais. Por outro lado, caso o solo não disponha de MO lábil em quantidade suficiente para suprir suas necessidades, os processos de oxidação da MO irão resultar em redução do estoque de C no solo, dando início ao processo de perda de qualidade e degradação do solo.

Em comparação ao presente estudo, menores proporções de CAM foram obtidas por Lee et al. (2009), para os macroagregados de 2,00 a 0,25mm. Estas proporções foram de apenas 8% e 17%, respectivamente, para o CAM na média dos tratamentos para solos do Sudeste da Korea com aplicação de casca de arroz, adubação química e sem adubação.

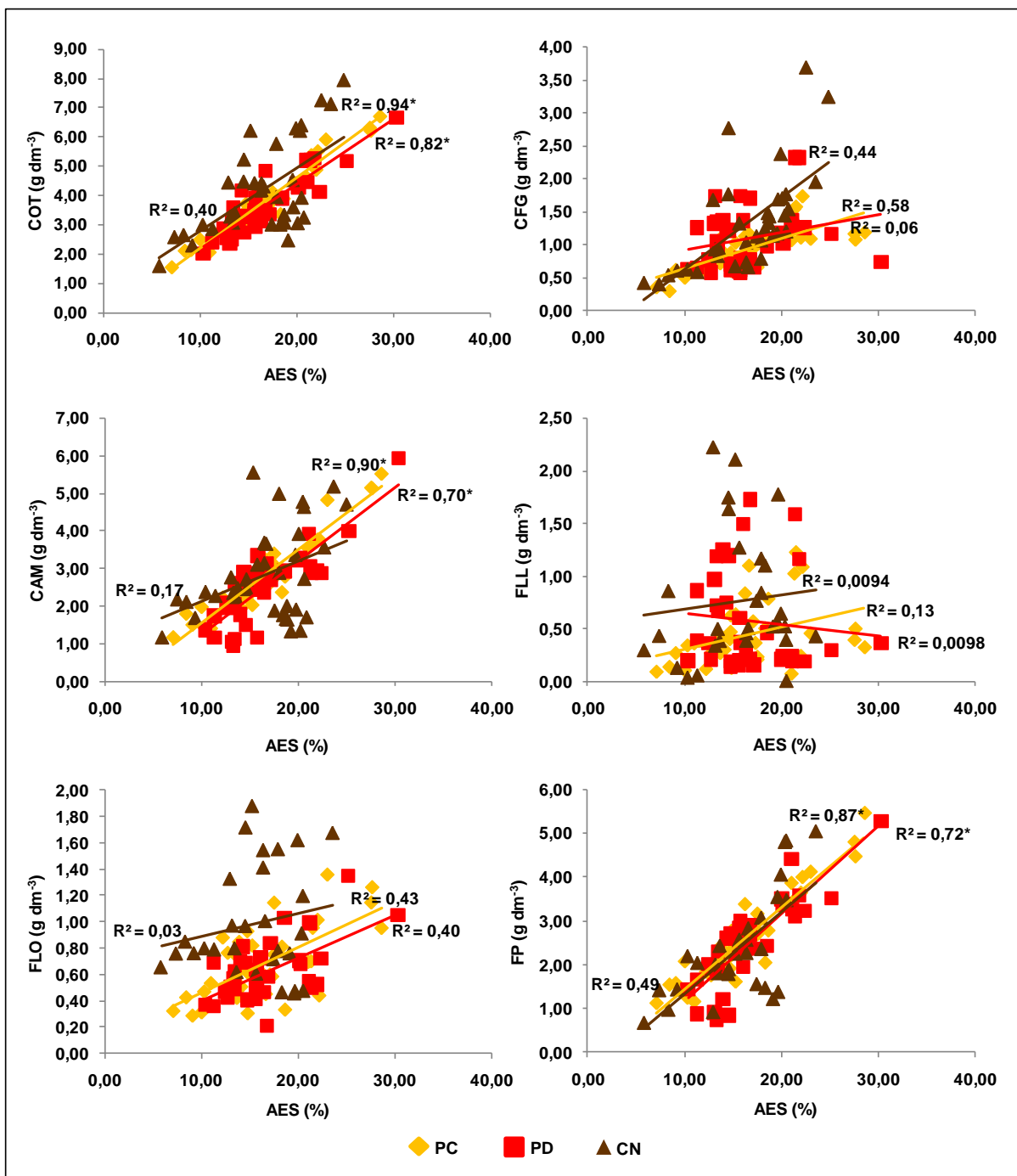
A porcentagem de agregados à seco (Fig. 3) revelou relação direta e positiva com a concentração de COT, CAM e FP em classes de agregados para o PC ( $R^2=0,94; 0,90; 0,87$ ) e PD ( $R^2=0,82; 0,70; 0,72$ ), respectivamente.

Silva e Mielniczuk (1997) encontraram  $R^2$  de 0,61 entre o diâmetro médio ponderado de agregados úmidos e o teor de COT de um Latossolo Roxo submetido a diferentes sistemas de manejo. Madari et al. (2005) encontraram, independente do sistema de uso, correlações elevadas entre os índices de agregação e as concentrações de COT nas classes de agregados na camada de 0,00 a 0,05m.

Salton et al. (2005) relacionou o CAM com o diâmetro médio ponderado de agregados (DMP) e encontraram  $R^2 = 0,99, 0,83$  e  $0,71$  em diferentes Latossolos na camada de 0,00 a 0,20m, respectivamente nas cidades de Maracaju, Dourados e Campo Grande - MS.

Rosa (2010) trabalhando em um Planossolo Háplico encontrou correlação significativa somente entre o COT, a FP e o DMP ( $R=0,70$  e  $0,72$ , respectivamente), para o solo sob sucessão de azevém x arroz sob PD indicando que aproximadamente 70% da estabilidade dos agregados se deve a FP.

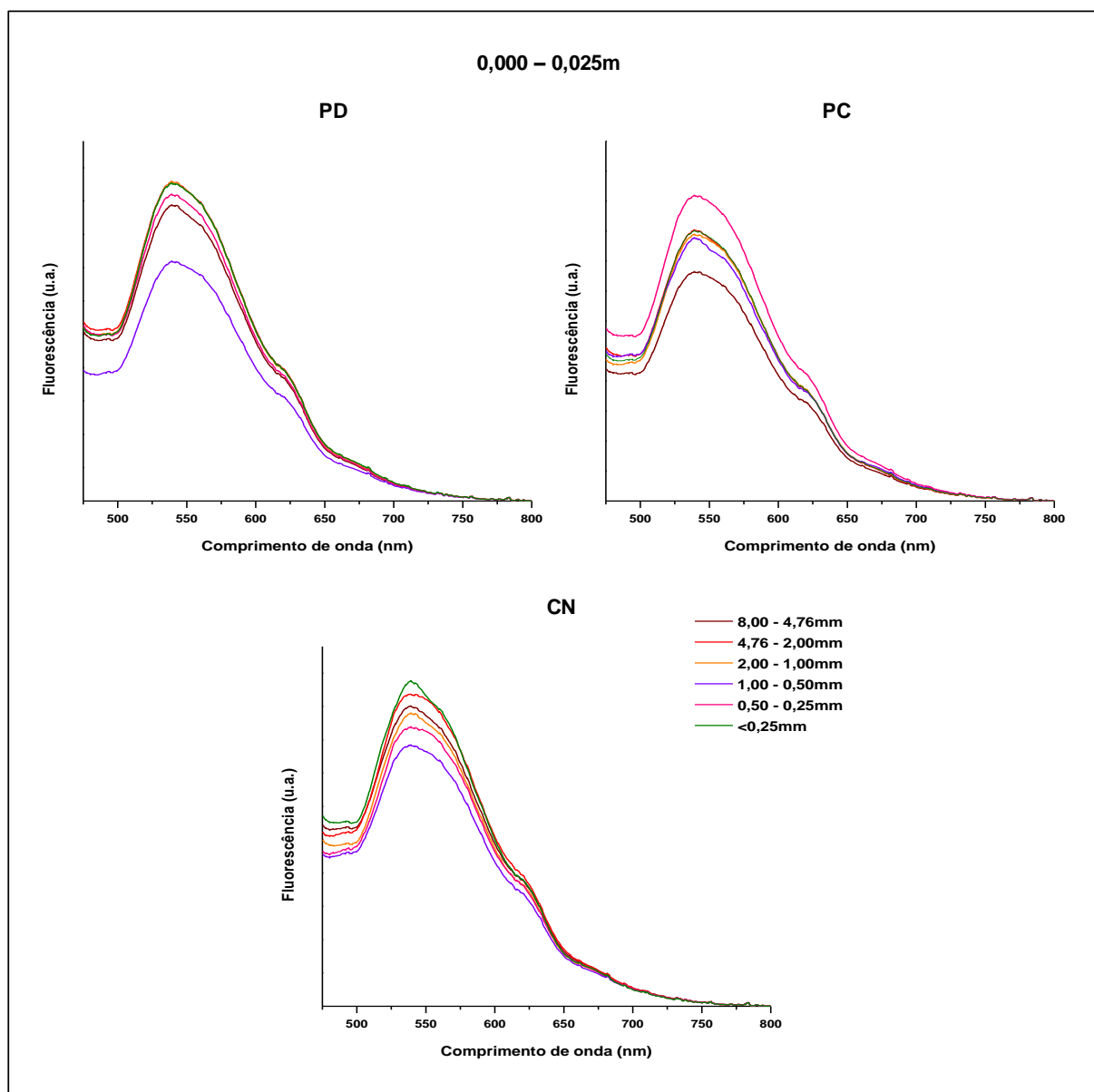
A FLO e a FLL não apresentaram relação com os AES (Fig. 3). Rosa (2010) trabalhando em um Planossolo Háplico, também não encontrou correlação positiva entre a FLO e o DMP em nenhum dos sistemas de manejo avaliados, atribuindo que a oclusão é um mecanismo de estabilização da MO menos importante em solos de várzea onde a umidade excessiva e o alagamento, por ocasião do cultivo do arroz, proporcionam uma agregação transitória.



**Figura 3.** Relação entre agregados estáveis a seco (AES) e o carbono orgânico total (COT), carbono da fração grosseira (CFG) e carbono associado aos minerais (CAM), fração leve livre (FLL), fração leve oclusa (FLO) e fração pesada (FP) de um Planossolo Háplico, sob sistemas de manejo. Capão do Leão - RS, 2009. \*Significativo < 1% de probabilidade

Na Figura 4, observam-se os espectros de FIL do solo sob os diferentes sistemas de manejo em classes de agregados. As áreas sob as curvas, normalizadas pelo teor de COT, fornecem um índice que pode ser diretamente relacionado com o grau de humificação da MO ( $H_{FIL}$ ) (Tab. 7).





**Figura 4.** Emissão de fluorescência de um Planossolo Háplico sob sistemas de manejo em classes de agregados. Capão do Leão - RS, 2010. PC = preparo convencional; PD = plantio direto e CN = campo nativo.

**Tabela 7.** Área sob a curva de fluorescência (ACF) ponderada pelos teores de carbono orgânico total (COT) como índice do grau de humificação ( $H_{FIL}$ ) de um Argissolo Vermelho, sob sistemas de uso na camada de 0,00 - 0,025m. Capão do Leão - RS, 2010.

Sistemas <sup>*</sup>	Classe de diâmetro (mm)					
	8,00 - 4,76	4,76 - 2,00	2,00 - 1,00	1,00 - 0,50	0,50 - 0,25	< 0,25
PC	17.875,38	17.380,95	18.141,55	19.086,39	19.318,33	19.632,39
PD	15.972,06	16.312,60	17.200,68	17.497,52	22.296,49	23.340,49
CN	11.931,20	10.641,26	11.583,92	12.258,21	20.023,17	20.602,52

De modo geral, o índice de humificação da MO ( $H_{FIL}$ ) para o PC, PD e CN (Tab. 7), aumentou com a diminuição de tamanho das classes de agregados, indicando maior humificação nas menores classes de tamanho. Possivelmente, tal fato possa ser explicado pela maior entrada de carbono jovem, cujos compostos orgânicos apresentam menor grau de humificação, nas classes de maior tamanho, bem como pela ocorrência de associações entre moléculas orgânicas e argilas silicatadas e/ou óxidos e hidroxidos de ferro e alumínio nas menores classes, sendo neste caso, a MO protegida principalmente por estabilização química ou interação organomineral.

Segundo Oades (1978), o papel da MO na estabilização de microagregados (2 - 250 $\mu$ m) está ligado à ação de mucilagens e exsudatos de origem microbiana e vegetal em associação ao efeito aditivo das interações organominerais de superfície, consideradas como substâncias estabilizadoras dos agregados devido a sua ação cimentante.

Neste sentido, Baldock et al. (1992), Christensen, (1996b) e Baldock et al. (1997), relatam que os microagregados são constituídos geralmente por materiais mais humificados e com baixas taxas de decomposição, sendo estabilizados pela ligação direta entre as frações orgânicas e minerais.

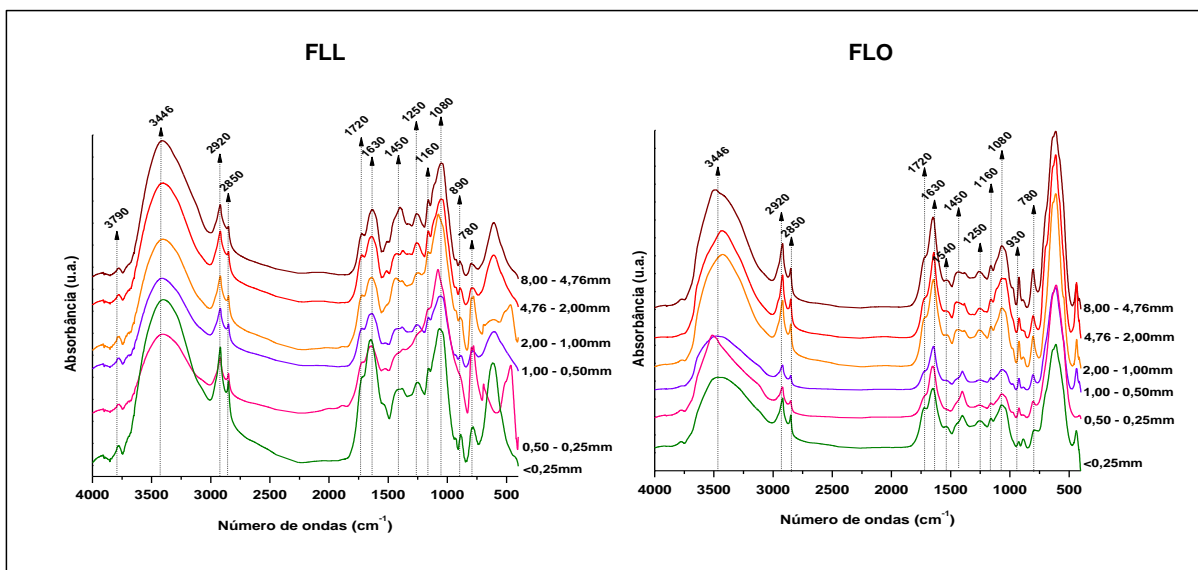
Com exceção da classes de agregados de 1,00 – 0,50mm, o CN apresentou os menores índices de humificação ( $H_{FIL}$ ) em classes de agregados comparados com o PC e o PD. A MO sob vegetação nativa apresenta estágio de humificação menos avançado quando comparado com áreas cultivadas (BAYER, 1996).

Os espectros de FTIR da FLL e da FLO apresentam bandas de absorção bem definidas e comuns a todas as classes de agregados, com picos característicos de MO, exceção para a FLL em todas as classes de agregados, onde é observada uma banda em 3790 $\text{cm}^{-1}$  característico de vibrações O-H ou N-H livres (Fig. 5) (FREIXO; CANELLAS; MACHADO, 2002).

Verificou-se a presença de uma banda de absorção na faixa espectral de 3446 $\text{cm}^{-1}$ , bandas entre 3600 e 3400  $\text{cm}^{-1}$ , são atribuídas a vibração O-Al-OH da gibssita, indicando que este mineral juntamente com a caulinita, está associado às frações leves da MO (Fig. 5) (POTES, 2009).

A banda de absorção característica dos grupos metil e metileno ( $\text{CH}_2$  e  $\text{CH}_3$ ) ocorrem em comprimento de onda de 2920 - 2850 $\text{cm}^{-1}$  (Fig. 5) e são atribuídas ao estiramento C-H alifático (DICK et al. 2003). Observou-se uma banda de absorção

próxima de  $1720\text{cm}^{-1}$  sendo atribuída ao estiramento C=O de COOH, aos aldeídos e às cetonas; uma banda de absorção na região de  $1.630\text{cm}^{-1}$ , característico de estiramento C=O de grupo amina, quinona e/ou, de bandas conjugadas de C=O de cetonas. A presença do grupamento  $-\text{CH}_2-$  é sempre acompanhada de picos característicos da deformação de C-H alifático na região de absorção de 1450 a  $1460\text{cm}^{-1}$  (Fig. 5) (DIAS et al., 2009).



**Figura 5.** Espectros de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) das frações leve e livre (FLL) e leve oclusa (FLO) de um Planossolo Háplico sob campo nativo. Capão do Leão - RS, 2009.

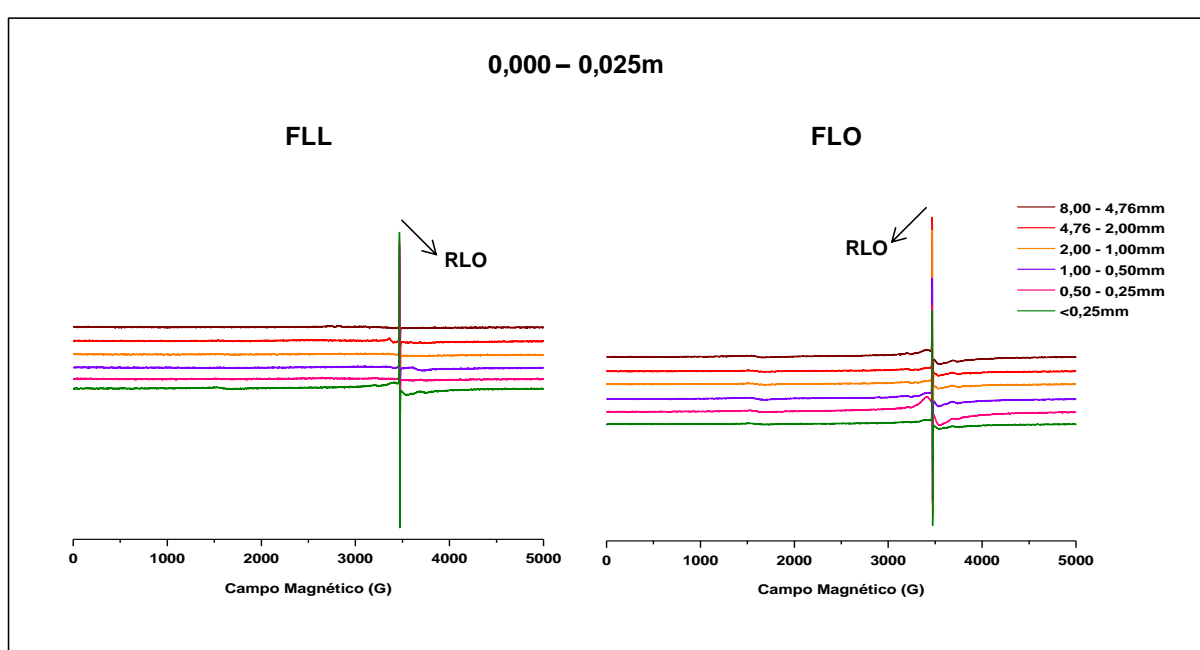
Bandas em  $1250\text{cm}^{-1}$  são atribuídas à presença de deformação de O-H em grupos carboxílicos e ligações éster (C-O) e ainda a presença de fenóis; bandas de absorção em  $1160\text{cm}^{-1}$  e  $1080\text{cm}^{-1}$  são referentes a estiramentos C-O de polissacarídeos (Fig. 5).

Bandas de absorção entre  $900$  e  $800\text{cm}^{-1}$  são atribuídas à vibrações de ligações C-H de grupos aromáticos e de impurezas inorgânicas e organometálicas (Fig.5) (DOBBSS et al., 2009).

Através dos espectros de EPR observam-se linhas estreitas referentes à presença de radical livre orgânico (RLO) tanto pra FLL como para FLO. Na classe de agregados  $<0,25\text{mm}$ , tanto para a FLL como para FLO, a linha de RLO se destaca (Fig. 6).

A partir dos espectros de EPR em 50G foram calculados os valores de RLO (spin  $\text{g}^{-1}$ ) e o fator g para as diferentes amostras (Tab. 8). Observa-se que a classe

de agregados <0,25mm, tanto para a FLL como para a FLO, apresentou maiores valores de RLO do tipo semiquinona  $2,961 \times 10^{16}$  e  $6,331 \times 10^{16}$ , indicando maior humificação nesta classe de agregados quando comparada com as classes de maior tamanho. Tais resultados estão de acordo com as análises FIL (Tab. 7), onde a maior humificação também foi verificada nesta classe de agregados. Segundo Santos (2009), o sinal do RLO oriundo de solos detectáveis através do EPR é atribuído à estruturas em sistema  $\pi$  orgânico. Quanto maior a concentração desses radicais, maior a humificação da matéria orgânica.



**Figura 6.** Espectros de Ressonância Paramagnética Eletrônica (EPR) da fração leve e livre (FLL) e fração leve oclusa (FLO) da matéria orgânica de um Planossolo Háplico sob campo nativo. Capão do Leão-RS, 2009.

**Tabela 8.** Radical livre orgânico (RLO) e fator g calculado a partir do EPR da fração leve livre (FLL) e leve oclusa (FLO) de um Planossolo Háplico sob campo nativo na camada de 0,000 a 0,025m. Capão do Leão-RS, 2009.

Amostra	Largura de linha de		Largura de linha de	
	Spins/g	Gauss	Spins/g	Gauss
	-----FLL-----		-----FLO-----	
8,00-4,76mm	$7,948 \times 10^{15}$	2,00336	$1,385 \times 10^{16}$	2,00319
4,76-2,00mm	$9,662 \times 10^{15}$	2,00324	$1,749 \times 10^{16}$	2,00316
2,00-1,00mm	$8,636 \times 10^{15}$	2,00328	$1,384 \times 10^{16}$	2,00310
1,00-0,50mm	$1,862 \times 10^{16}$	2,00323	$1,031 \times 10^{16}$	2,00320
0,50-0,25mm	$2,583 \times 10^{16}$	2,00319	$1,663 \times 10^{16}$	2,00312
<0,25mm	$2,961 \times 10^{16}$	2,00315	$6,331 \times 10^{16}$	2,00316

Os menores valores de RLO do tipo semiquinona para a FLL foram observados nas classes de agregados de maior tamanho (8,00 a 1,00mm) comparativamente as de menor tamanho. Possivelmente, este fato seja resultado da maior incorporação de frações mais lábeis de carbono nos agregados de maior tamanho.

De modo geral, as densidades de spins da FLO foram mais altas em relação a FLL (Tab. 8), indicando maior humificação desta fração.

Os fatores  $g$  das amostras estudadas, em torno de 2,003, são típicos de MO indicando que os RLO localizam-se próximos a átomos de oxigênio, segundo Pérez et al. (2004), este valor do fator  $g$  é característico do RLO, possivelmente conjugado com vários anéis aromáticos na MO (Tab. 8).

#### **6.4 Conclusões**

O preparo convencional e plantio direto em um Planossolo Háplico típico de agroecossistema de terras baixas, reduziram os estoques de COT, FLL e FLO nas classes de agregados 4,76 a <0,25mm e de CFG nas classes de 2,00 a <0,25mm quando comparado ao campo nativo.

Incrementos no estoque de FLL sob plantio direto foram obtidos nas classes de agregados de 0,50 a <0,25mm, na camada de 0,000 – 0,025m e para o acumulado de 0,000 a 0,075m, quando comparado a PC.

Maior estoque de FLO na camada superficial foi verificado sob PD na classe e agregados de 8,00 – 4,76mm.

O preparo convencional contribuiu para o incremento relativo na fração pesada da matéria orgânica do solo.

Os maiores estoques de COT, CFG, CAM, FLO e FP para o PC e o PD, foram encontrados nas classes de agregados de maior tamanho (8,00 a 2,00mm), ocorrendo redução nestes estoques conforme diminuição o tamanho dos agregados.

O grau de humificação da matéria orgânica no Planossolo Háplico aumentou com a redução do diâmetro dos agregados.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A introdução de sistemas de uso e manejo inadequados, em substituição à vegetação nativa, pode favorecer a decomposição da MO, contribuindo para a degradação da qualidade do solo e ambiental. Neste caso, os agroecossistemas atuam como fonte, de C-CO<sub>2</sub> para a atmosfera.

A adoção de sistemas conservacionistas de manejo do solo baseados na redução da intensidade de preparo do solo e na adição contínua e manutenção de resíduos culturais sobre o solo contribuem de forma decisiva para a melhoria da qualidade do solo e para a sustentabilidade.

Técnicas de fracionamento físico densimétrico e granulométrico do solo permitem obter informações mais detalhadas sobre a dinâmica da MO no ambiente, bem como sobre os efeitos dos sistemas de uso e manejo do solo sobre processos vitais a sua qualidade, como formação e estabilização de agregados e potencial de acúmulo de MO em agroecossistemas, em menor tempo de forma a subsidiar o desenho e ou (re)desenho de sistemas sustentáveis de manejo. Neste sentido, o fracionamento físico da MO possibilita avaliar a eficiência dos sistemas de manejo e uso do solo em aportar MO lábil, que em seqüência abastece o compartimento estável da MO (CAM e/ou FP). Por outro lado, caso o solo não disponha de MO lábil em quantidade suficiente para suprir suas necessidades, os processos de oxidação da MO irão resultar em redução do estoque de C, dando início ao processo de perda de qualidade e degradação do solo (SALTON et al. 2005).

O conhecimento da distribuição relativa das frações lábeis e estáveis da MO permite inferir sobre o grau de vulnerabilidade de determinados solos a degradação. Por exemplo, o Argissolo Vermelho Eutrófico arênico da área de Alegrete, além de possuir relativo baixo estoque de COT e NT no solo, praticamente entre 40-43% da MO está presente na forma de CFG ou FLL. Neste caso, embora esta distribuição seja coerente com a baixa capacidade de proteção química que a matriz mineral do solo oferece devido ao baixo teor de argila, tal configuração impõe elevado risco à degradação ambiental e à sustentabilidade do agroecossistema caso as adições de resíduos sejam suprimidas e/ou o solo revolvido pelo preparo. Frações lábeis da MO são fundamentais para a ciclagem de carbono entre os compartimentos e para a ciclagem de nutrientes em curto prazo, além da sua notável contribuição para a formação e estabilização transitória de agregados. Entretanto, esta fração é

altamente sensível às alterações no uso e manejo e pode ser facilmente perdida pelo uso e manejo inadequado nos primeiros anos de cultivo (SANCHES, 1976; DALAL; MAYER, 1986; ANDREUX, 1996; MIELNICZUK, 2008).

O estudo focalizou dois solos representativos do Bioma Pampa, os quais apresentam propriedades e características bastante distintas e que refletem diretamente sobre a dinâmica da MO. Para o Planossolo Háplico, com maior teor de argila e desenvolvido em ambiente hidromórfico, observou-se uma distribuição mais equilibrada da MO nas frações lábeis (FLL e FLO) e estáveis (FP). As proporções aumentaram na ordem  $FLL < FLO < FP$ , explicada pelos diferentes mecanismos de proteção da MO em cada fração. Na FLL apenas a recalcitrância química é responsável pela estabilidade da MO, enquanto que, na FLO, além da proteção física ou oclusão da MO, a recalcitrância química também estaria atuando. A FP, por ser a mais estável das frações da MO, onde atuam simultaneamente os três mecanismos de proteção (recalcitrância química, oclusão e interação organomineral), é em geral, a mais abundante das frações em ambientes agrícolas e em ambientes naturais (CHRISTENSEN, 1996b; FREIXO et al. 2002; RANGEL; SILVA, 2007).

Quanto aos estoques de COT em classes de agregados, para o Argissolo Vermelho, os maiores estoques foram observados na classe de 1,00 – 0,50mm. No entanto, para o PC e o PD do Planossolo Háplico, verificou-se que os maiores estoques, foram encontrados nas classes de agregados de maior tamanho (8,00 a 2,00mm), sugerindo o ingresso preferencial de carbono jovem inicialmente nas classes de agregados de maior tamanho, cujos produtos da atividade microbiana aos poucos vão sendo incorporados em agregados de ordem inferior, indicando que os macroagregados apresentam grande quantidade de energia e matéria retida na forma de compostos orgânicos (VEZZANI 2001). Segundo Carter (2002), estudos detalhados envolvendo classes de tamanho de agregados são relevantes para rastrear a alocação do carbono recentemente adicionado ao solo e para avaliar os mecanismos de proteção física da MO. Tais parâmetros têm sido considerados importantes indicadores da qualidade do solo e para a avaliação da utilização de terras agrícolas de forma sustentável.

Pela análise de RMN, foi possível verificar que tanto para o Argissolo como para o Planossolo, a fração leve livre apresentou maiores proporções de compostos mais lábeis em relação à fração leve oclusa.

Através das análises de FIL e EPR em classes de agregados, foi possível verificar maior humificação na classe de agregados <0,25mm para os dois solos estudados.

A qualidade do solo e por conseguinte do ambiente, depende do sistema de uso e manejo adequado às condições principalmente de solo e clima de cada região. O uso e manejo adequado deve respeitar as características peculiares de cada tipo de solo para incrementos na produtividade sem causar danos no sistema solo-água-planta-atmosfera.

Vale ressaltar que muitos resultados obtidos nos estudos de dinâmica e qualidade da MO estão condicionados à metodologia utilizada. O fracionamento físico densimétrico, constitui uma importante ferramenta para o entendimento da dinâmica da MO do solo e associado à utilização de técnicas espectroscópicas fornece informações importantes sobre a dinâmica, humificação e grupos de compostos orgânicos presentes na amostra. Desta maneira, resultados significativos têm sido obtidos em relação à caracterização estrutural da MO e da sua dinâmica de decomposição, possibilitando avaliar o efeito e a sustentabilidade de sistemas naturais e agrícolas.



## 8 ESTUDOS FUTUROS

Em virtude da importância da MO para a qualidade do solo e sua sustentabilidade agrícola e dos poucos trabalhos sobre a alocação do carbono em classes de agregados, 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 MO e suas frações em diferentes tipos de solos do Bioma Pampa.

Os diferentes tipos de solos apresentam textura e mineralogia distintas. Neste sentido, os mecanismos de estabilização da MO operam em magnitudes diferentes. Uma tarefa importante para trabalhos futuros é a verificação da alocação de carbono em classes de tamanho de agregados em outros tipos de solos e agroecossistemas do Bioma Pampa. Adicionalmente, seria oportuno testar e validar metodologia de avaliação da dinâmica do carbono em classes de agregados pelo método seco e úmido.

A caracterização espectroscópica do solo inteiro e nas frações físicas da MO em classes de agregados, foi realizada apenas na camada de 0,000 - 0,025m 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, 0,20m (camada arável) e sistemas florestais podem acumular em camadas mais profundas através do sistema radicular dessas espécies. Além disso, as análises de RMN foram realizadas apenas nas frações físicas do solo inteiro, podendo ser realizada nas classes de agregados.

Cabe destacar a importância da manutenção de experimentos de longa duração em locais que contemplem solos representativos dos principais sistemas de produção do Sul do Brasil, bem como do estabelecimento de estratégias de trabalhos em rede visando maior integração e geração de informações sobre a dinâmica da matéria orgânica, especialmente com ênfase ao Bioma pampa.

## REFERÊNCIA 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 – Aplicações**. Viçosa - MG, 2009.

ADU, T.K.; OADES, J.M. Physical factors influencing decomposition of organic material in soil aggregates. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, v.10, p.109-115, 1978.

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 Environmental Quality**, v.35, p.1599-1607, 2006.

ANDREUX, F. Humus in World Soils. In: PICCOLO, A. (Ed.) **Humic Substances in Terrestrial Ecosystems**. Amsterdam: Elsevier, 1996. p.45-100.

ARSHAD, M.A.; MARTIN, S. Identifying critical limits for soil quality indicators in agro-ecosystems. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v.88, p.153-160, 2002.

ARTZ, R.R.E.; CHAPMAN, S.J.; ROBERTSON, A.H.J.; POTTS, J.M.; DÉFARGE, F.L.; GOGO, S.; COMONT, L.; DISNAR, J.R.; FRANCEZ, A.J. FTIR spectroscopy can be used as a screening tool for organic matter quality in regenerating cutover peatlands. **Soil Biol. Biochem.** v.40, p.515-527, 2008.

ATLAS SÓCIO ECONÔMICO DO RIO GRANDE DO SUL, Cultura: Soja, Arroz. Disponível em: <<http://www.scp.rs.gov.br/ATLAS/atlas.asp?menu=263>> Acesso em: 20 jul. 2008.

BADESDENT, J.; CHENU, C.; BALABANE, M. Relationship of soil organic matter dynamic to physical protection and tillage. **Soil and Tillage Research**, v.53, p.215-230, 2000.

BALDOCK, J. A.; OADES, J. M.; WATERS, A. G.; PENG, X.; VASSALLO, A.M.; WILSON, M. A. Aspects of the chemical structure of soil organic materials as revealed by solid-state C<sup>13</sup> NMR spectroscopy. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v.16, p.1-42, 1992.

BALDOCK, J.A.; OADES, J.M.; NELSON, P.N.; SKENE, T.M.; GOLCHIN, A.; CLARK, P. Assessing the extent of decomposition of natural organic materials using solid-state <sup>13</sup>C NMR spectroscopy. **Australian Journal of Soil Research**, v.35, p.1061-1083, 1997.

BALDOCK, J.A.; SKJEMSTAD, J.O. Role of the soil matrix and minerals in protecting natural organic materials against biological attack. **Organic Geochemistry**, Oxford, v.31, p.697-710, 2000.

BARBER, D.A.; MARTIN, J.K. The release of organic substances by cereal roots into soil. **New Phytologist**, v.76, p.69-80, 1976.

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

- BAYER, C.; MARTIN-NETO L.; SAAB S. C. Diminuição da humificação da matéria orgânica de um Cambissolo Húmico em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.537-544, 2003.
- BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; CERETA, 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 & Tillage Research**, Amsterdam, v.53, p.95-104, 2000b.
- BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; CERETA, C.A. Fracionamento da matéria orgânica e avaliações qualitativas por EPR num solo submetido 10 anos a sistemas de cultura em plantio direto. In: Simpósio Nacional de Instrumentação Agropecuária, I., São Carlos-SP. **Anais do...** Embrapa-CNPDIA, 1996, p.115-121.
- 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.
- BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PILLON, C.N.; SANGOI L. Changes in soil organic matter fractions under subtropical no-till cropping systems. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.65, p.1473-1478, 2001.
- 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.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G.A.; CAMARGO, F.A.O. (Eds.) **Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Gênese, 1999. p. 9-26.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G.A.; SILVA, L.S.; CANELLAS, L.P.; CAMARGO, F.A.O. (Eds.) **Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2ª Ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p.1-5.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; AMADO, T.J.C.; MARTIN-NETO, L.; FERNANDES, S.V. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in Southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.54, p. 101-109. 2000a.
- BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J.A.; LEITE, D.; AMARAL, A.J. ZOLDAN JUNIOR, W.A. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas comparadas às do campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 155 – 163, 2003.
- 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.
- BONGIOVANNI, M.D.; LOBATINI, J.C. Particulate organic matter, carbohydrate, humic acid contents in soilmacro- and microaggregates as affected by cultivation. **Geoderma**, v. 136, p. 660-665, 2006.
- BURESH, R. J.; TIAN, G. Soil improvement by in subsaharan Africa. **Agroforestry Systems**, v. 38, p. 51-76, 1997.

- BURLE, M.L. MIELNICZUK, J.; FOCCHI, S. Effect of cropping systems on soil chemical characteristics, with emphasis on soil acidification. **Plant and Soil**, The Hague, v.190, p.309-316, 1997.
- 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.
- CARNEIRO, C. E. A.; JÚNIOR, N. J. M.; AZEVEDO, M. C. B.; ANDRADE, E. A.; KOGUSHI, M. S.; DIEHL, R. C.; RICCE, W. S.; PASSARIN, A. L.; VAZ, R. H. M.; STELMASCHUK, T. L. L.; GUIMARÃES, M. F.; RALISCH, R. Efeitos dos sistemas de manejo sobre o carbono orgânico total e carbono residual de um Latossolo Vermelho eutroférico. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 30, n.1, p. 5-10, 2009.
- CARPENEDO, V.; MIELNICZUK, J. Estado de agregação e qualidade de agregados de Latossolos roxos, submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Campinas v.14, p.99-105, 1990.
- CARTER, M. R. Organic matter and sustainability. In: REES, R. M.; BALL, B.C.; CAMPBELL, C. D.; WATSON, C. A. (Ed.). **Sustainable management of soil organic matter**. New York: CABI Publishing, 2001. p. 9-22.
- CARTER, M. R. Soil quality for sustainable land Management: organic matter and aggregation interactions that maintain soil functions. **Agronomy Journal**, Madison, v. 94, p. 38-47, 2002.
- CASTRO FILHO, C., LOURENÇO, A.; GUIMARÃESDE, M.F. & FONSECA, I.C.B. Aggregate stability under different management systems in a red Latosol in the State of Paraná, Brasil. **Soil and Tillage Research**, v.65, p.45–51, 2002.
- CERETA, C.A.; BAYER, C. DICK, D.P.; MARTIN-NETO, L.; COLNAGO, L.A. Métodos espectroscópico. In: SANTOS, G.A.; SILVA, L.S.; CANELLAS, L.P.; CAMARGO, F.A.O. (Eds.) **Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2ª Ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p.201-227.
- CHRISTENSEN, B. T. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates. **Advances in Soil Science**, v.20, p.2-90, 1992.
- CHRISTENSEN, B.T. Carbon in primary and secondary organomineral complexes. In: **Structure and organic matter storage in agricultural soils**. Boca Raton: CRC Lewis, 1996a. p.97-165.
- CHRISTENSEN, B.T. **Organic matter in soil – structure, function and turnover**. Copenhagen, 2000, 95f.
- CHRISTENSEN, B.T. Physical fractionation os soil and structural and funcional complexity in organic matter turnover. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 52, p.345-353, 2001.
- CHRISTENSEN, B.T. Structure and organic matter storage in agricultural soils. In: CARTER, M.R.; STEWART, B.A. (Ed.). **Structure and organic matter storage in agricultural soils** Boca Raton: CRC, 1996b. p.97-165. (Advances in Soil Science).
- COCOZZA,C.; D'ORAZIO, V.; MIANO, T.M.; SHOTYK W. Characterization of solid and aqueous phases of a peat bogNprofile using molecular fluorescence spectroscopy, ESR and FT-IR, and comparison with physical properties. **Organic Geochemistry**, v.34, p.49-60, 2003.

COLLINS, H. P.; PAUL, E. A.; PAUSTIAN, K.; ELLIOTT, E. T. Characterization of soil organic carbon relative to its stability and turnover. In: PAUL, E. A.; PAUSTIAN, K.; ELLIOTT, E. T.; COLE, C. V. (Ed.). **Soil organic matter in temperate agroecosystems**: long-term experiments in North America. Boca Raton: CRC Press, 1997. p. 51-72.

CONCEIÇÃO, P. C. **Agregação e proteção física da matéria orgânica em dois solos do sul do Brasil**. 2006. 113f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

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**, 29:777–788, 2005.

CONCEIÇÃO, P.C.; BOENI, M.; DIECKOW, 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.

CORAZZA, E. J.; SILVA, J. E.; RESCK, D. V. S. & GOMES, A. C. Comportamento de diferentes sistemas de manejo como fonte ou depósito de carbono em relação à vegetação de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.425-432, 1999.

COSTA, F.S.; BAYER, C.; ALBUQUERQUE, J.A.; FONTOURA, M.V. Aumento da matéria orgânica num Latossolo Bruno em plantio direto. **Ciência Rural**, v.34, p.587-589, 2004.

CRUZ, L. E. C. **Dinâmica da decomposição de resíduos culturais em sistemas rotacionados de manejo em um Planossolo Háplico do sul do Brasil**. 2009. 118 f. Tese (Doutorado em Agronomia – Produção Vegetal) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

DALAL, R.C.; MAYER, R.J. Long-term trends in fertility of soils under continuous cultivation and cereal cropping in Southern Queensland, I. Overall changes in soil properties and trends in winter cereal yields. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v.24, p.265-279, 1986.

DALL'AGNOL, Página Rural. Disponível em: <[http://www.paginarural.com.br/noticias\\_detalhes.asp?subcategoriaid=66&id=74575](http://www.paginarural.com.br/noticias_detalhes.asp?subcategoriaid=66&id=74575)> Acesso em: 25 set. 2007.

DIAS, B.O.; SILVA, C.A.; SOARES, E.M.B.; BETTIOL, W.; GUERREIRO, M.C.; BELIZÁRIO, M.H. Infravermelho na caracterização de ácidos húmicos de Latossolo sob efeito de uso contínuo de lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p.885-894, 2009.

DICK, D.P., GONÇALVES, C.N., DALMOLIN, R.S.D., KNICKER, H., KLAMT, E., KÖGEL-KNABER, I., SIMÕES, M.L., MARTIN-NETO, L., Characteristics of soil organic matter of different Brazilian Ferralsols under native vegetation as a function of soil depth. **Geoderma**, v.124, p.319 – 333. 2005.

DICK, D.P., KNICKER, H., ÁVILA, L.G., INDA Jr., A.V., GIASSON, E., BISSANI, C.A. Organic matter in constructed soils from a coal mining area in southern Brazil. **Organic Geochemistry**, v.37, p.1537 – 1545. 2006.

- DICK, D.P.; MARTINAZZO, R.; DALMOLIN, R.S.D.; JACQUES, A.V.A.; MIELNICZUK, J.; ROSA, A.S. Impacto da queima nos atributos químicos e na composição química da matéria orgânica do solo e na vegetação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília**, v.43, p.633-640, 2008a.
- DICK, D.P.; SANTOS, J.H.Z.; FERRANTI, E.M. Chemical characterization and infrared spectroscopy of soil organic matter from two Southern Brazilian soils. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 29-39, 2003.
- DICK, D.P.; SILVA, L.B.; 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, 2008b.
- DIECKOW, J.; MARTI-NETO, L.; MILORI, D.M.B.P.; CONCEIÇÃO, P.C.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J. **Sistemas de preparo do solo e características espectroscópicas da matéria orgânica em ambientes tropicais e subtropicais brasileiros**. São Carlos:Embrapa Instrumentação Agropecuária, (Embrapa Instrumentação Agropecuária. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, ISSN 1678-0434; 12), 2005, 16p.
- DIEKOW, J. **Estoque e qualidade da matéria orgânica do solo em função de sistemas de culturas e adubação nitrogenada no sistema plantio direto**. 2003. 164f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- DOBBSS, L.B.; RUMJANECK, V.M.; BALDOTTO, M.A.; VELLOSO, A.C.X.; CANELLAS, L.P. caracterização química e espectroscópica de ácidos húmicos e fúlvicos isolados da camada superficial de Latossolos brasileiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 51-63, 2009.
- DORAN, J.W. Soil quality and sustainability. In: XXVI Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, **CD Rom...** Rio de Janeiro, SBCS, 1997.
- DORAN, J.W.; PARKIN, T.B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.W. (Ed.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Minneapolis, MN: SSA/ASA; Special Publication, v.35, 1994, p.3-21.
- EDWARDS, A.P. & BREMNER, J.M. Microaggregates in soils. **Journal Soil Science**, v.18, p.64-73, 1967.
- EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de solos, **Manual de Métodos de Análises de Solo**. Rio de Janeiro: EMBRAPA, CNPS, 1997. 80p.
- FAVORETTO, C.M.; GONÇALVES, D.; MILORI, D.M.B.P.; ROSA, J.A.; LEITE, W.C.; BRINATTI, A.M.; SAAB, S.C. Determinação da humificação da matéria orgânica de um Latossolo e de suas frações organo-minerais. **Química Nova**, v.31, p.1994-1996, 2008.
- FORRESTER, D. I.; BAUHUS, J.; COWIE, A. L.; VANCLAY, J. K. Mixed-species plantations of Eucalyptus with nitrogen-fixing trees: a review. **Forest Ecology and Management**, v. 233, p. 211-230, 2006.
- FREIXO, A.A.; CANELLAS, L.P.; MACHADO, P.L.O.A. Propriedades espectrais da matéria orgânica leve-livre e leve intra-agregados de dois Latossolos sob plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 445-453, 2002.

- FREIXO, A.A.; MACHADO, P.L.O.A.; GUIMARÃES, C.M.; SILVA, C.A. & FADIGAS, F.S. Estoques de carbono e nitrogênio e distribuição de frações orgânicas de Latossolo do cerrado sob diferentes sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 425-434, 2002.
- 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. (Ed.). **Soil processes and the carbon cycle**. Boca Raton: CRC Press, 1997. p. 245-266.
- GOLCHIN, A.; OADES, J. M.; SKJEMSTAD, J. O.; CLARKE, P. Study of free and occluded particulate organic matter in soils by solid state  $^{13}\text{C}$  CP/MAS NMR spectroscopy and scanning electron microscopy. **Australian Journal of Soil Research**, v.32, p.285-309, 1994.
- 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.; KACHANOSKI, R.G.; VORONEY, R.P. Carbon mineralization in soil size fractions after various amounts of aggregate disruption. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.40, p.649-659, 1989.
- GREGORICH, E.G.; JANZEN, H.H. Storage of soil carbon in the light fraction and macroorganic matter. In: CARTER, M.R.; STEWART, B.A. (Eds) **Structure and organic matter storage in soils**. Boca Raton: CRC Lewis, 1996. p.167-190.
- GUERRA, J.G.M.; SANTOS, G.A.; SILVA, L.S.; CAMARGO, F.A.O. Macromoléculas e substâncias húmicas. In: SANTOS, G.A.; SILVA, L.S.; CANELLAS, L.P.; CAMARGO, F.A.O. (Eds.) **Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2ª Ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p.1-5.
- GUIMARÃES, E. **Caracterização de solos basálticos através de análises química e espectroscópica em laboratório e por satélite**. 2006. Tese (Doutorado em Química) – Departamento de Química – Universidade Federal do Paraná. Curitiba.
- GUO, L.B.; GIFFORD, R.M. Soil carbon stocks and use change: A meta analysis. **Global Change Biology**, v.8, p.345-360, 2002.
- HASENACK, H. Campos gaúchos estão ameaçados. *Jornal da Universidade*, 2007. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/biociencias/imagens/P%2005%20-%20Atualidade.pdf>> Acesso em: 05 jun. 2009
- HELFRICH, M.; LUDWIG, B.; BUURMAN, P.; FLESSA, H. Effect of land use on the composition of soil organic matter in density and aggregate fractions as revealed by solid-state  $^{13}\text{C}$  NMR spectroscopy. **Geoderma**, n.136, p.331-341, 2006.
- HERNÁNDEZ-HERNÁNDEZ, R.M.; RAMÍREZ, E.; CASTRO, I.; CANO, S. Cambios en indicadores de calidad de suelos de ladera reforestados con pinos (*Pinus caribaea*) y eucaliptos (*Eucalyptus robusta*). **Revista Agrociencia**, v.42, p. 253-266, 2008.
- HUANG, L.; WANG, C.Y.; TAN, W.F.; HU, H.Q.; CAI, C.F.; WANG, M. W. Distribution of organic matter in aggregates of eroded Ultisols, Central China, **Soil & Tillage Research**, v. 108, p. 59-67, 2010.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA Disponível em: <[http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia\\_visualiza.php?id\\_noticia=169](http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia_visualiza.php?id_noticia=169)> Acesso em: 05 jun. 2009.

IRGA – INSITUTO RIOGRANDENSE DO ARROZ Disponível em: <http://www.irga.rs.gov.br/arquivos/engenho.pdf> Acesso em: 06 jul. 2009.

JENKINSON, D.S.; RAYNER, J.H. Turnover of soil organic matter in some of Rothamsted Classical Experiments. **Soil Science**, Hagerstown, v.123, p.298-305, 1977.

KASPER, M.; BUCHAN, G.D.; MENTLER, A.; BLUM, W.E.H. Influence of soil tillage systems on aggregate stability and the distribution of C and N in different aggregate fractions. **Soil & Tillage Research**, v. 105, p. 192 – 199, 2009.

KELLER, T.; ARVIDSSON, J. & DEXTER, A.R. Soil structures produced by tillage as affected by soil water content and the physical quality of soil. **Soil Till. Res.**, 92:45-52, 2007.

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

KNICKER, H.; ALMENDROS, G.; GONZALEZ-VILA, F.J.; GONZALEZ-PEREZ, J.A.; POLVILLO, O. Characteristic alterations of quantity and quality of soil organic matter caused by forest fires in continental Mediterranean ecosystems: a solid-state <sup>13</sup>C NMR study. **European Journal Soil Science**, v.57, p.558-569, 2006.

KÖGEL-KNABER, I.; ZECH, W. & HATCHER, P.G. Chemical structural studies of forest soil humic aromatics: aromatic carbon fraction. **Soil Science Society of America**, 55:241-247, 1991.

KÖGEL-KNABNER, I. <sup>13</sup>C and <sup>15</sup>N NMR spectroscopy as tool in soil organic matter studies. **Geoderma**, Amsterdam, v.80, p.243-270, 1997.

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

KÖLBL, A.; KÖGEL-KNABNER, I. Content and composition of free and occluded particulate organic matter in a differently textured arable Cambisol as revealed by solid-state <sup>13</sup>C NMR. **Journal Plant Nutr. Soil Science**, n.167, p.45-53, 2004.

KRULL, E.S.; BALDOCK, J.A.; SKJEMSTAD, J.O. Importance of mechanisms and processes of the stabilisation of soil organic matter for modeling carbon turnover. **Functional Plant Biology**. Collingwood, v.30, p.207-222, 2003.

LEE, S.B.; LEE, C. H.; JUNG, K.Y.; PARK, K.D.; LEE, D.; KIM, P.J. Changes of soil organic carbon and its fractions in relation to soil physical properties in a long-term fertilized paddy. **Soil & Tillage Research**, v. 104, p. 227-232, 2009.

LEITE, L.F.C., MENDONÇA, E.S.; NEVES, J.C.L.; MACHADO, P.L.O.A.; GALVÃO, J.C.C. Estoques totais de carbono orgânico e seus compartimentos em Argissolo sob floresta e sob milho cultivado com adubação mineral e orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 821-832, 2003.



- LI, X.G.; LI, F.M.; RENGEL, Z.; SINGH, B. & WANG, Z.F. Cultivation effects on temporal changes of organic carbon and aggregate stability in desert soils of Hexi Corridor region in China. **Soil Till. Res.**, v. 91, p. 22-29, 2006.
- LIMA, A.C.R.; HOOGMOED, W. & BRUSSARD, L. Soil quality assessment in rice production systems: Establishing a minimum data set. **J. Environ. Qual.**, v. 37, p. 623-630, 2008.
- LIMA, A.M.N.; SILVA, I.R.; NEVES, J.C.L.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; MENDONÇA, E.S.; DEMOLINARI, M.S.M.; LEITE, F.P. Frações da matéria orgânica do solo após três décadas de cultivo de eucalipto no Vale do Rio Doce, MGS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.1053-1063, 2008.
- LIMA, C.L.R.; PAULETTO, E.; GOMES, A.S.; HARTWIG, M.P. & PASSIANOTO, C.C. Compactação de um Planossolo em função de sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Agrociência**, v. 12, p.179-182, 2006.
- LIMA, W.P. **O reflorestamento com eucalipto e seus impactos ambientais**. São Paulo, Artpress, 1987. 114p.
- LOUZADA, J.A.; CAICEDO, N. & HELFER, F. Condições de drenagem relacionadas ao trânsito de máquinas em solo de várzea (RS-Brasil). **Rev. Bras. Eng. Agric. Amb.**, 12:98-106, 2008.
- MADARI, B. E.; REEVES, J. B. III; MACHADO, P. L. O. A.; GUIMARÃES, C. M.; TORRES, E.; MCCARTY, G.W. Mid- and nearinfrared spectroscopic assessment of soil compositional parameters and structural indices in two Ferralsols. **Geoderma**, Amsterdam, v.136, p. 245-259, 2006.
- MADARI, B.; MACHADO, P. L. O. A.; TORRES, E.; ANDRADE, A. G.; VALENCIA, L. I. O. No tillage and crop rotation effects on soil aggregation and organic carbon in a Rhodic Ferralsol from southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v.80, p.185 - 200, 2005.
- MAGALHÃES JÚNIOR, A. M. da; GOMES, A. de S.; SANTOS, A.B. dos; (Ed.). **Sistema de cultivo de arroz Irrigado no Brasil**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2006. 270 p.
- MARTIN-NETO, L.; ANDRIULO, A.E.; TRAGHETTA, D.G. Effects of cultivation on ESR spectra of organic matter from soil size fractions of a Mollisol. **Soil Science**, Baltimore, v.157, p.365-372, 1994.
- MARTIN-NETO, L.; ROSSEL, R.; SPOSITO, G. Correlation of spectroscopic indicators of humification with mean annual rainfall along a temperate grassland climosequence. **Geoderma**, Amsterdam, v. 81, n. 3-4, p. 305-311, 1998.
- MARTIN-NETO, L.; NASCIMENTO, O.R.; TALAMONI, J.; POPPI, N.R. EPR of micronutrient-humic substances complexes extracted from a Brazilian soil. **Soil Science**, Baltimore, v.151, p.369-376, 1991.
- 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 Research**, v.104, p.22-29, 2009.
- MEDRADO, M. J. S. Cultivo do eucalipto, Importância socioeconômica e ambiental. Disponível em:  
[http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Eucalipto/CultivodoEucalipto/01\\_Importancia\\_economica.htm](http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Eucalipto/CultivodoEucalipto/01_Importancia_economica.htm). Acesso em: 20 jul. 2008.

- MENDES, I.C.; SOUZA, L.V.; RESCK, D.V.S.; GOMES, A.C. Propriedades biológicas em agregados de um Latossolo Vermelho escuro sob plantio convencional e direto no cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 435-443, 2003.
- MENDHAM, D.S.; HEAGNEY, E.C.; CORBEELS, M.; O'CONNELL, A.M.; GROVE, T.S.; McMURTRIE, R.E. Soil particulate organic matter effects on nitrogen availability after afforestation with *Eucalyptus globulus*. **Soil Biology Biochemistry**, v.36, p.1067-1074, 2004.
- MIELNICZUK, J. Desenvolvimento de sistemas de cultura adaptadas a produtividade, conservação e recuperação de solos. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 21., 1988, Rio de Janeiro, **CD Rom...Rio de Janeiro: SBSCS**, 1988.
- MIELNICZUK, J. Matéria orgânica e sustentabilidade de sistemas agrícolas. In: SANTOS, G.A.; CAMARGO, F.A.O. (Eds.) **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Gênese, 1999. p.1-8.
- MIELNICZUK, J. Matéria orgânica e sustentabilidade de sistemas agrícolas. In: SANTOS, G.A.; SILVA, L.S.; CANELLAS, L.P.; CAMARGO, F.A.O. (Eds.) **Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2ª Ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p.1-5.
- MILORI, D. M. B. P.; BAYER, C.; BAGNATO, V. S.; MIELNICZUK, J.; MARTINNETO, L. Humification degree of soil humic acids determined by fluorescence spectroscopy. **Soil Science**, Baltimore, v. 167, p. 739-749, 2002.
- MILORI, D.M.B.P.; GALETI, H.V.A.; MARTIN-NETO, L.; DIECKOW, J.; GONZÁLEZ-PÉREZ, M.; BAYER, C.; SALTON, J. Organic Matter Study of Whole Soil Samples Using Laser-Induced Fluorescence Spectroscopy. **Soil Science Society of America Journal**, n.70, p.57-62, 2005.
- MILORI, D.M.B.P.; GALETI, H.V.A.; MARTIN-NETO, L.; DIECKOW, J.; GONZÁLEZ-PÉREZ, M.; BAYER, C.; SALTON, J. Organic matter study of whole soil samples using laser-induced fluorescence spectroscopy. **Soil Science Society of America Journal**, v.70, p.57-63, 2006.
- MOURA, V.P.G.; GUIMARÃES, D.P. **Produção de mudas de Eucaliptus para o estabelecimento de plantios florestais**. EMBRAPA – Recursos genéticos e biotecnologia, Brasília – DF, Comunicado Técnico 85, 2003.
- NABINGER, C.; TENTARDINI, F. R.; SIMON, L. L.; CARVALHO, P. C. F.; AGNOL, M. D.; SILVA, J. L. S.; NEVES, F. P. Manejo sustentável das pastagens naturais: região da depressão central do RS. Disponível em: [http://www1.ufrgs.br/extensao/salaoextensao/mostra/vis\\_acao\\_mostra.asp?CodAcaoExtensao=8282](http://www1.ufrgs.br/extensao/salaoextensao/mostra/vis_acao_mostra.asp?CodAcaoExtensao=8282). Acesso em: 12 ago. 2009.
- 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.
- NAYAK, P.S.; SINGH, .K. Instrumental characterization of clay by XRF, XRD and FTIR. **Bull Mater Science**, v.30, p.235 – 238, 2007.
- NEVES, C.M. N.; SILVA, M. L.; CURI, N. MACEDO, R. L.G. TOKURA, A. M. Estoque de Carbono em Sistemas Agrossilvopastoril, Pastagem e Eucalipto sob Cultivo

Convencional Na Região Noroeste do Estado de Minas Gerais. **Revista Ciência Agrotécnica**. Lavras, v. 28, p. 1038-1046, 2004.

NEVES, C.M. N.; FELLER, C.; LARRÉ-LARROUY, M.C. Matéria orgânica nas frações granulométricas de um Latossolo Vermelho distroférico sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Ciências Agrárias**, v.26, p. 17-26, 2005.

NORTCLIFF, S. Standardization of soil quality attributes. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.88, p.161-168, 2002.

OADES, J.M. Mucilagens at the root surface. **Journal of Soil Science**, v.29, p.1-16, 1978.

OADES, J.M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. **Plant and soil**, Dordrecht, v.76, p.319-337, 1984.

OADES, J.M.; GILLMAN, G.P.; UEHARA, G.; HUE, N.V.; van NOORDWIJK, M.; ROBERTSON, G.P.; WADA, K. Interactions of soil organic matter and variable – charge clays. In: COLLEMAN et al. **Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems**. University of Hawaii, 1989, p.69-95.

OADES, J.M.; WATERS, A.G. Aggregate hierarchy in soils. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v.29, p.815-828, 1991.

OLIVEIRA, G. C.; DIAS JUNIOR, M. S.; RESCK, D. V. S.; CURI, N. Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, p. 327-336, 2004.

PALADINI, F.C.S.; MIELNICZUK, J. Distribuição de tamanho de agregados de um solo Podzólico Vermelho – Escuro afetado por sistemas de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.15, p.135–140, 1991.

PASSOS, R.R.; RUIZ, H.A.; CANTARUTTI, R.B.; MENDONÇA, E.S. Carbono orgânico e nitrogênio em agregados de um Latossolo Vermelho Distrófico sob duas coberturas vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.1109–1118, 2007.

PAUL, S.; VELDKAMP, E.; FLESSA, H. Soil organic carbon in density fractions of tropical soils under forest – pasture – secondary Forest land use changes. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.59, p.359-371, 2008.

PÉREZ, M.G.; MARTIN-NETO, L.; SAAB, S.C.; NOVOTNY, E.H.; MILORI, D.M.B.P.; BAGNATO, V.S.; COLNAGO, L.A.; MELO, W.J.; KNICKER, H. Characterization of humic acids from a Brazilian Oxisol under different tillage systems by EPR, <sup>13</sup>C NMR, FTIR and fluorescence spectroscopy. **Geoderma**, v.18, p.181 – 190, 2004.

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 Ciência do Solo) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

PILLON, C.N. Manejo da matéria orgânica do solo. In: **Noções sobre produção de leite**. Pelotas: EMBRAPA – CPACT, 2006. p.41-49.

PILLON, C.N.; MIELNICZUK, J.; MARTIN NETO, L. **Ciclagem da matéria orgânica em sistemas agrícolas**. Pelotas – RS. EMBRAPA – CPACT, Documentos 125, 2004.

PILLON, C.N.; MIELNICZUK, J.; MARTIN NETO, L. **Métodos de fracionamento e caracterização da matéria orgânica do solo**. Pelotas – RS. EMBRAPA – CPACT, Documentos 106, 2002.

PILLON, C.N.; SANTOS, D.C.; LIMA, C.L.R.; DUPONT, P.B. Monitoramento de um Argissolo Vermelho sob produção de eucalipto de treze e vinte anos. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2008. 26 p. (Embrapa Clima Temperado. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 71). ISSN 1678-2518.

PINHEIRO, E.F.M.; PEREIRA, M.G.; ANJOS, L.H.C. Aggregate distribution and soil organic matter under different tillage systems for vegetable crops in a Red Latosol from Brazil. **Soil and Tillage Research**, v.77, p.79-84, 2004b.

PINHEIRO, E.F.M.; PEREIRA, M.G.; ANJOS, L.H.C.; MACHADO, P.L.O.A. Fracionamento densimétrico da matéria orgânica do solo sob diferentes sistemas de manejo e cobertura vegetal em Paty do Alferes (RJ), **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.731-737, 2004a.

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.

PORTAL DO AGRONEGÓCIO, 2010.

<http://www.portaldoagronegocio.com.br/conteudo.php?id=48826> Acesso em: 08 fev. de 2011.

POTES, M. L. **Matéria orgânica e sua distribuição em compartimentos físicos em Neossolo Litólico sob pastagem e mata nativa nos campos de Cima da Serra Rio Grande do Sul**. 2009. 90f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

PULROLNIK, K.; BARROS, N.F.; SILVA, I.R.; NOVAIS, R.F.; BRANDANI, C.B. Estoques de carbono e nitrogênio em frações lábeis e estáveis da matéria orgânica de solos sob eucalipto, pastagem e cerrado no Vale do Jequitinhonha – MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.1125-1136, 2009.

RANGEL, O.J.P.; SILVA, C.A. Estoques de carbono e nitrogênio e frações orgânicas de Latossolo submetido a diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 1609-1623, 2007.

RANGEL, O.J.P.; SILVA, C.A.; GUIMARÃES, P.T.G. Estoque e frações da matéria orgânica de Latossolo cultivado com cafeeiro em diferentes espaçamentos de plantio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 1341-1353, 2007.

REICHERT, J.M.; LIMA, C.L.R.; DALMOLIN, R.S.D.; REINERT, D.J.; GONÇALVES, C. & NUNES, M. Agregação de um Planossolo sistematizado há um ano e sob cultivo de arroz irrigado. **Ciência Rural**, v. 36, p. 837-844, 2006.

RESVISTA IBAMA, 2005. <http://www.defesabiogaucha.org/textos/texto01.htm> Acesso em: 26 set. de 2007.

RIBASKI, J.; MONTOYA VILCAHUAMAN, L.J.; RODIGHIERI, H.R. Sistemas agroflorestais aspectos ambientais e sócio – econômicos. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.22, p.61-67, 2001.

RIBASKI, J.; DEDECEK, R. A.; MATTEI, V. L.; FLORES, C. A.; VARGAS, A. F. C.; RIBASKI, S. A. G. **Sistemas silvipastoris: estratégias para o desenvolvimento**

- rural sustentável para a metade sul do Estado do Rio Grande do Sul. Colombo – PR, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Embrapa Florestas, 2005. 8p. (Comunicado Técnico, 150).
- RIBASKI, S.A.G.; HOEFLICH, V.A.; RIBASKI, J. Sistemas silvipastoris com apoio ao desenvolvimento rural para a Região Sudoeste do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v.60, p.27-37, 2009.
- ROSA, C.M. **Matéria orgânica em Planossolo Háptico sob sistemas de manejo no cultivo do arroz irrigado no Sul do Brasil**. 2010. 92p. TESE (Doutorado em Agronomia) Faculdade de Agronomia, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.
- 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.; MADAR, B.E.; MACHADO, P.L.O.A. Fracionamento físico do solo ma obtenção de compartimentos mensuráveis para uso em simuladores da dinâmica da matéria orgânica. IN: **Dinâmica da matéria orgânica em sistemas conservacionistas. Modelagem matemática e métodos auxiliares**. Dourados. EMBRAPA – Agropecuária Oeste, 2006. p.107-132.
- ROVIRA, P. & VALLEJO, V.R. Labile and recalcitrant pools of carbon and nitrogen in organic matter decomposing at different depths in soil: An acid hydrolysis approach. **Geoderma**, v. 107, p. 109-141, 2002.
- ROZANE, D.E.; CENTURION, J. F.; ROMUALDO, L.M.; TANIGUCHI, C.A.K.; TRABUCO, M.; ALVES, A.U. Estoque de carbono e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho distrófico, sob diferentes manejos. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v.26, p.24-32, 2010.
- RUSSELL, J.D.; FRASER, A.R. Infrared Methods. In: Wilson, M. J. **Clay Mineralogy: Spectroscopy and Chemical Determinative Methods**. 1994, p.18-61.
- SALTON, J.C. **Matéria orgânica e agregação do solo na rotação lavoura-pastagem em ambiente tropical**. 2005. 158f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Faculdade de Agronomia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.
- SALTON, J.C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; BOENI, M.; CONCEIÇÃO, P.C.; FABRÍCIO, A.C.; MACEDO, M.C.M. & BROCH, D.L. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.11–21, 2008.
- SALTON, J.C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; FABRÍCIO, A.C.; MACEDO, M.C.M.; BROCH, D.L.; BOENI, M.; CONCEIÇÃO, P.C. **Matéria orgânica do solo na integração lavoura-pecuária em Mato Grosso do Sul**. Boletim de pesquisa e desenvolvimento n°. 29, Embrapa Agropecuária Oeste. Dourados - MS, 2005.
- SANCHES, P.A. **Properties and management of soils in the tropic**. New York: John Wiley, 1976. 618p.
- SANTOS, H. G ; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; OLIVEIRA, J. B.; COELHO, M. R.; LUMBRERAS, J. F.; CUNHA, T. J. F. (Ed.). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006, 306 p.

SANTOS, J.V. **Caracterização química e espectroscópica de solos de área recuperada após mineração de xisto**. Dissertação (Mestrado em Química) – Departamento de Química – Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2009.

SANTOS, H.P.; TOMM, G.O. Disponibilidade de nutrientes e teor de matéria orgânica em função de sistemas de cultivo e de manejo do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.33, p.477-486, 2003.

SENESI, N. Application of electron Spin resonance (ESR) spectroscopy in soil chemistry. **Advances in Soil Science**, New York, v.14, p.77-130, 1990.

SHANG, C.; TIESSEN, H. Organic matter lability in a tropical oxissol: evidence from shifting cultivation, chemical oxidation, particle size, density, and magnetic fractionations. **Soil Science**, v.162, p.795-807, 1997.

SILVA, I. R.; MENDONÇA, E. de S. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R. F. et al. **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**. Campinas v.21, p.113-117, 1997.

SILVA, L.B.; DICK, D.P.; INDA JÚNIOR, A.V. Solos subtropicais de altitude: atributos químicos, teor de matéria orgânica e resistência à oxidação química. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.38, p. 1167-1171, 2008.

SILVERSTEIN, R. M.; WEBSTER F. X. **Spectrometric Identification of Organic Compounds**. 6ª. ed., New York: John Wiley & Sons, 1998, 559p.

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, 2002b.

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

SIX, J.; FELLER, C.; DENEFF, K.; OGLE, S.M.; MORAES-SÁ, J.C.; ALBERECHT, A. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils – Effects of no-tillage. **Agronomie**, v.22, p.755-775, 2002a.

SKJEMSTAD, J.O.; JANIK, L.J.; TAYLOR, J.A. Non-Living soil organic matter: what do we know about it?. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, v. 38, p. 667-680, 1998.

SKORUPA, A. L. A. **Acumulação e decomposição da serrapilheira em povoamento de eucalipto na região do Baixo Rio do Doce- MG**. 2001. 68f. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais.

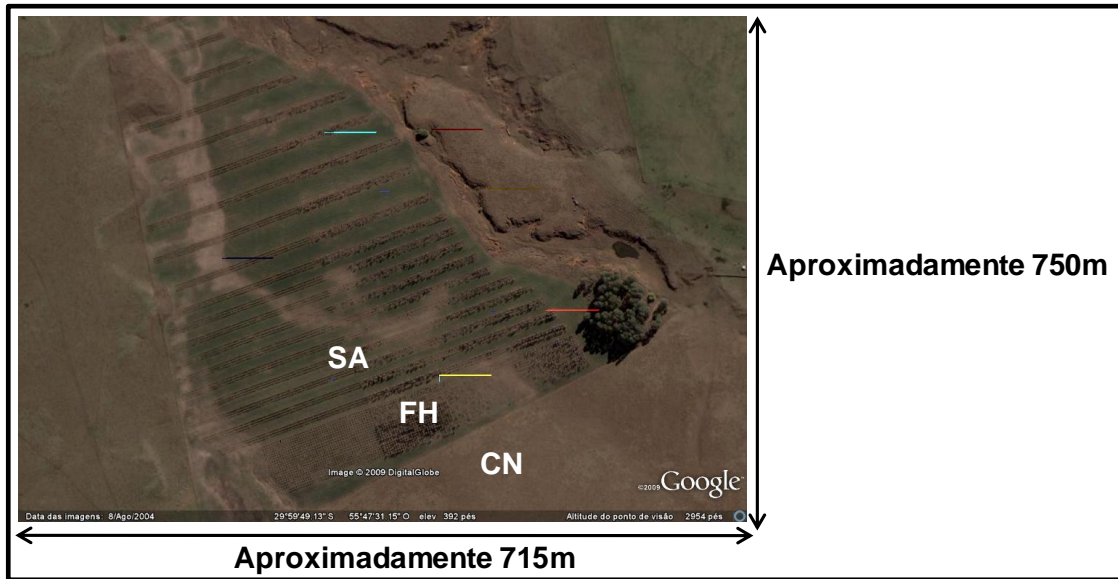
STEVENSON, F. J.; COLE, M. A. **Cycles of soils: carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients**. 2. ed. New York: J. Wiley, 1999. 427 p.

STEVENSON, J.F. **Humus chemistry, gênese, composição, reações**. 2ed. New York:Wiley-Interscience publication, 1994. 495p.

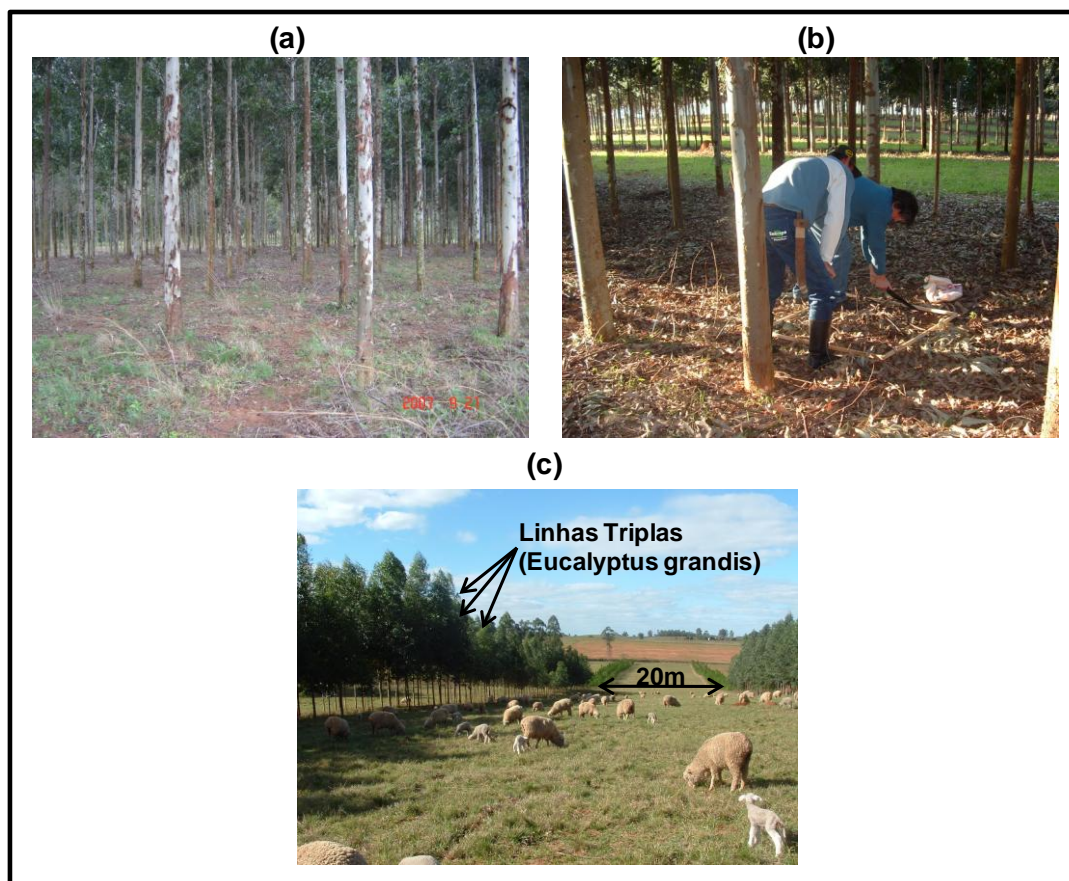
- TAVARES FILHO, J.; GRIMALDI, M. & TESSIER, D. Compressibilidade de agregados de um Latossolo Amarelo da Amazônia em resposta ao potencial da água do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 489-495, 2005.
- TISDALL, J.M. Fungal hyphae and structural stability of soil. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v.29, p.729-743, 1991.
- 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.
- VAHL, L.C.; SOUZA, R.O. Aspectos físico-químicos de solos alagados. In: GOMES, A. DA S.; MAGALHÃES JUNIOR, A. M. **Arroz irrigado no Sul do Brasil, Pelotas: Embrapa Clima Temperado**, 2004. p.97-118.
- VEZZANI, F.M. **Qualidade do sistema solo na produção agrícola**. 2001. 184f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre.
- VEZZANI, F.M.; CONCEIÇÃO, P.C.; MELLO, N.A.; DIECKOW, J. Matéria orgânica e qualidade do solo. In: SANTOS, G.A.; SILVA, L.S.; CANELLAS, L.P.; CAMARGO, F.A.O. (Eds.) **Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2ª Ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p.483-493.
- WENDLING, B.; JUCKSCH, I.; MENDONÇA, E. S.; NEVES, J.C.L. Carbono orgânico e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho sob diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.40, p.487-494, 2005.
- WRIGHT, A.L. & HONS, F.M. Tillage impacts on soil aggregation and carbon and nitrogen sequestration under wheat cropping sequences. **Soil and Tillage Research**, v.84, p.67-75, 2005.
- WWF – 2008 Disponível em:  
<[http://www.wwf.org.br/natureza\\_brasileira/biomas/bioma\\_campos/index.cfm](http://www.wwf.org.br/natureza_brasileira/biomas/bioma_campos/index.cfm)>  
Acesso em: 18 jul. 2008
- XAVIER, F.A.S.; MAIA, S.M.F.; OLIVEIRA, T.S.; MENDONÇA, E.S. Biomassa microbiana e matéria orgânica leve em solos sob sistemas agrícolas orgânico e convencional na Chapada da Ibiapaba – CE, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.427 – 258, 2006
- ZSCHORNACK, T. **Fracionamento e estoques de carbono orgânico de solos de várzea sob campo natural no Rio Grande do Sul**, 2007. 88p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

# **ANEXOS**



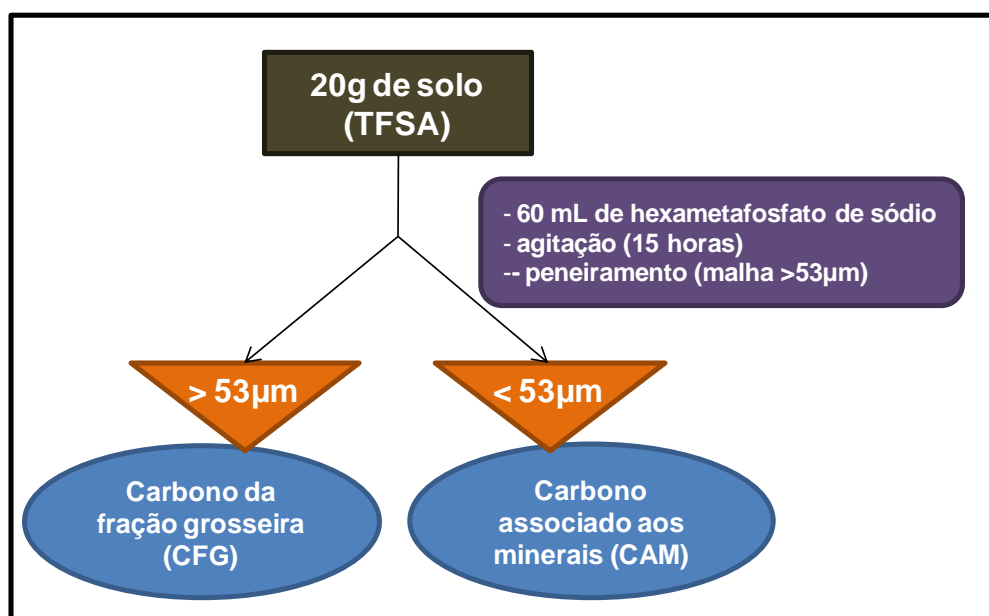


**Anexo A.** Vista aérea da área experimental no município de Alegrete, floresta homogênea (FH), sistema agrosilvipastoril (SA) e campo nativo (CN).  
Fonte: Google Earth (acesso em: 05/06/2009)

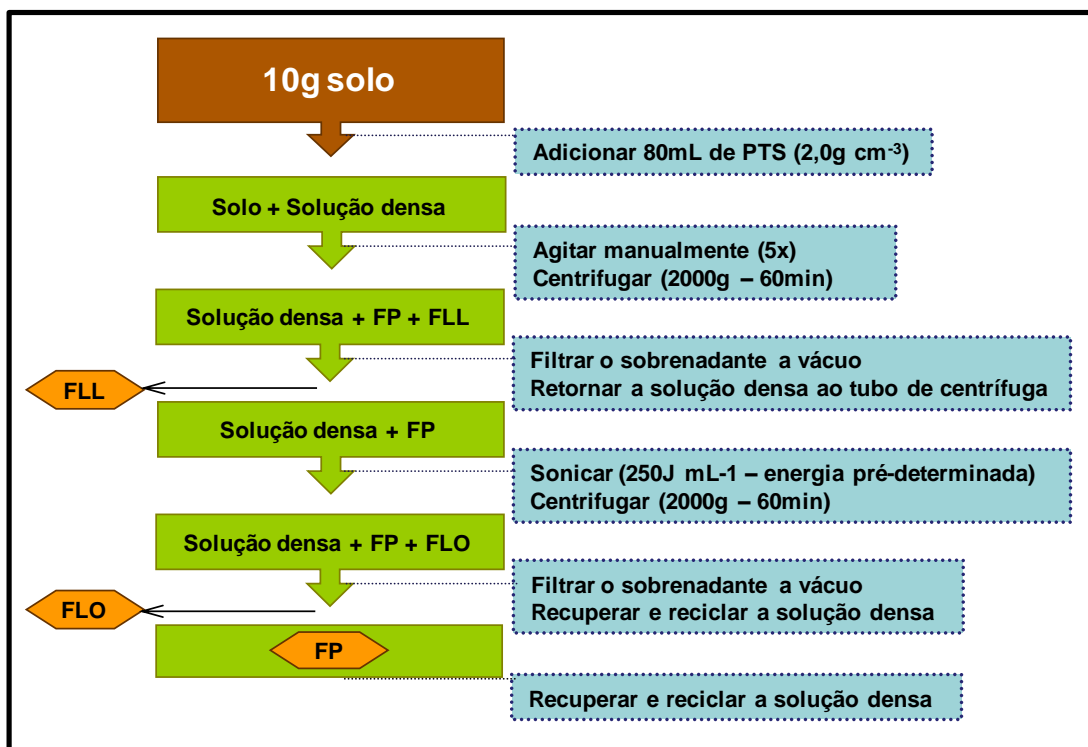


**Anexo B.** a) Floresta homogênea de *Eucalyptus grandis* (FH), (b) Sistema agrosilvipastoril (SA) mostrando as linhas triplas de *Eucalyptus grandis* e (c) entrelinha do sistema agrosilvipastoril mostrando os 20m com pastagem e o gado.

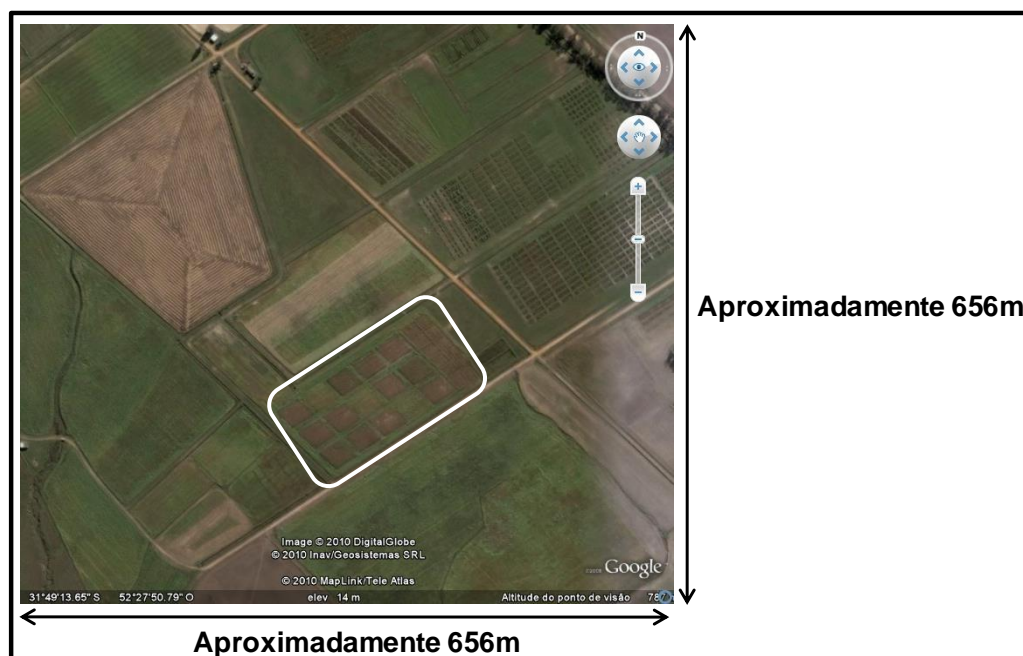
Fotos: Carlos Alberto Flores



**Anexo C.** Processo de fracionamento físico granulométrico das amostras. Conforme Cabardella e Elliot (1992).



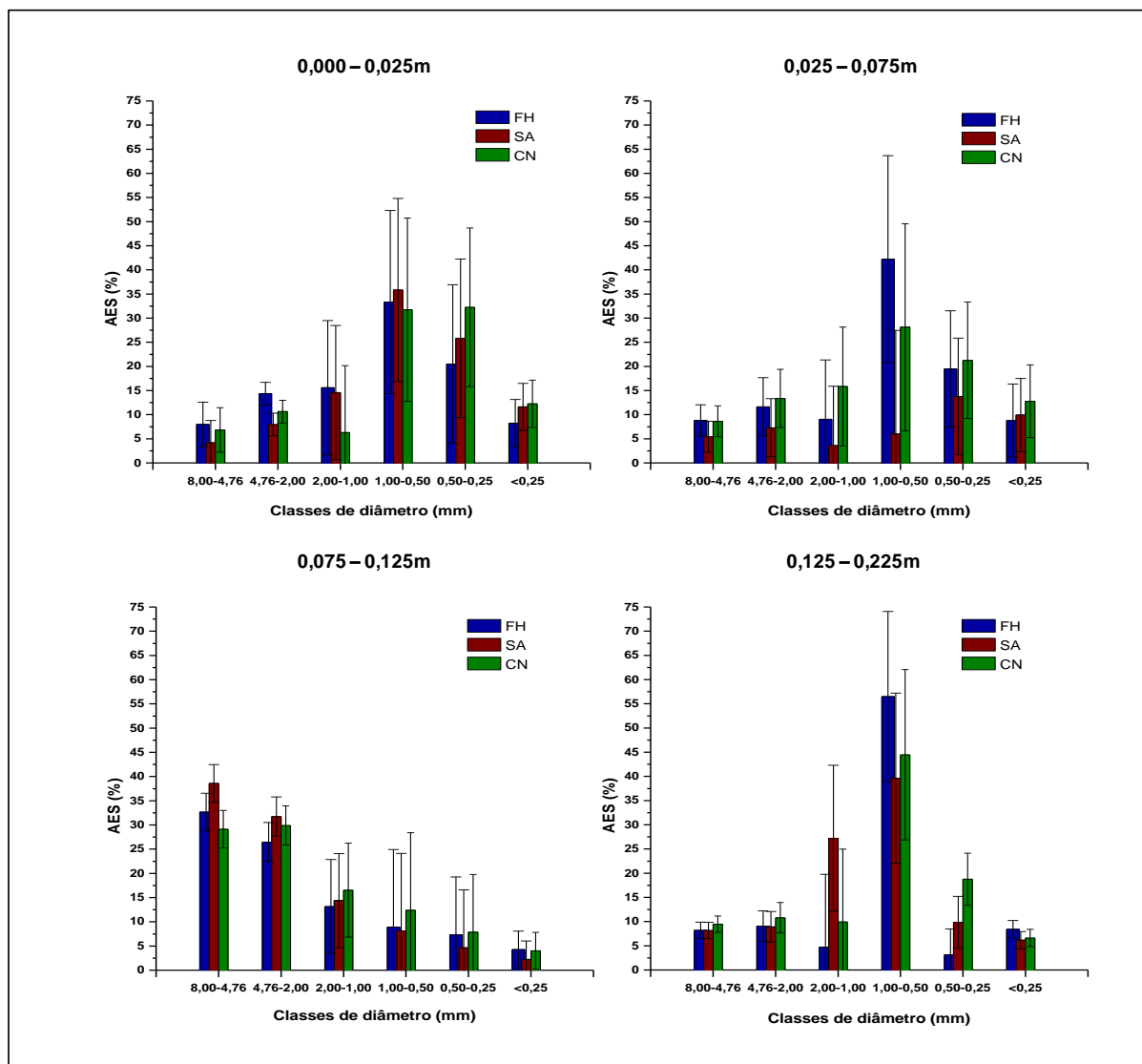
**Anexo D.** Processo de fracionamento físico da densimétrico das amostras. Conforme Conceição et al. (2008).



**Anexo E.** Vista aérea da área da Estação Experimental de Terras Baixas da Embrapa Clima Temperado, município de Capão do Leão.

Fonte: Google Earth (acesso em: 05/06/2009)

# APÊNDICES



**Apêndice A.** Agregados estáveis a seco (AES) de um Argissolo Vermelho sob sistemas de uso. Alegrete-RS, 2008. FH = floresta homogênea de eucalipto; SA = sistema agrosilvipastoril na entrelinha e CN = Campo Nativo. Barras verticais indicam a diferença mínima significativa a 5% em cada classe de agregados do solo.



**Apêndice D.** Estoque de carbono orgânico total (COT) ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) em classes de agregados de um Argissolo Vermelho sob sistemas de uso do solo e camadas. Alegrete - RS, 2008.

Sistemas*	Classe de diâmetro (mm)					
	8,00 - 4,76	4,76 - 2,00	2,00 - 1,00	1,00 - 0,50	0,50 - 0,25	< 0,25
	0,000 – 0,025m					
FH	0,44 aBC	0,90 aAB	0,83 aABC	1,37 aA	0,64 aBC	0,25 aC
SA	0,16 bB	0,50 bB	0,51 aB	1,21 aA	0,72 aAB	0,33 aB
CN	0,24 bA	0,47 bA	0,33 aA	1,14 aA	0,87 aA	0,33 aA
	0,025 – 0,075m					
FH	0,55 aB	0,88 aB	0,66 aB	3,04 aA	0,98 aB	0,46 aB
SA	0,30 aB	0,45 aB	0,27 aB	3,62 aA	0,66 aB	0,49 aB
CN	0,48 aA	0,94 aA	0,91 aA	1,64 aA	1,18 aA	0,68 aA
	0,075 – 0,125m					
FH	0,61 aB	0,61 aB	0,35 aB	3,20 aA	0,61 aB	0,35 aB
SA	0,35 aC	0,40 aC	0,26 aC	2,90 aA	0,79 aB	0,46 aC
CN	0,43 aA	0,64 aA	0,72 aA	1,93 aA	1,05 aA	0,54 aA
	0,125 – 0,225m					
FH	0,75 aB	0,81 aB	0,53 aB	5,58 aA	1,18 aB	0,73 aB
SA	0,79 aA	1,07 aA	2,70 aA	3,89 aA	0,84 aA	0,53 aA
CN	1,04 aB	1,07 aB	1,26 aB	4,51 aA	1,62 aB	0,60 aB

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna em cada camada e minúscula na linha não diferem entre si pelo teste t que considera a diferença mínima significativa a 5%.

\*FH = floresta homogênea de eucalipto; SA = sistema agrosilvipastoril na entrelinha e CN = campo nativo.

**Apêndice E.** Estoque de carbono da fração grosseira (CFG) ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) em classes de agregados de um Argissolo Vermelho sob sistemas de uso do solo e camadas. Alegrete - RS, 2008.

Sistemas*	Classe de diâmetro (mm)					
	8,00 - 4,76	4,76 - 2,00	2,00 - 1,00	1,00 - 0,50	0,50 - 0,25	< 0,25
	0,000 – 0,025m					
FH	0,15 aC	0,48 aAB	0,35 aABC	0,60 aA	0,26 aBC	0,09 aC
SA	0,08 aC	0,30 aAB	0,17 aBC	0,48 aA	0,27 aBC	0,13 aBC
CN	0,11 aC	0,20 aBC	0,22 aBC	0,49 aA	0,35 aAB	0,12 aBC
	0,025 – 0,075m					
FH	0,20 aB	0,27 aB	0,26 aB	0,95 aA	0,43 aB	0,18 aB
SA	0,12 aB	0,23 aB	0,11 aB	1,26 aA	0,30 aB	0,20 aB
CN	0,23 aA	0,37 aA	0,40 aA	0,62 aA	0,44 aA	0,26 aA
	0,075 – 0,125m					
FH	0,22 aB	0,23 aB	0,12 aB	1,05 aA	0,24 aB	0,14 aB
SA	0,15 aC	0,14 aC	0,09 aC	1,12 aA	0,33 aB	0,19 aC
CN	0,19 aA	0,25 aA	0,29 aA	0,70 aA	0,43 aA	0,19 aA
	0,125 – 0,225m					
FH	0,31 aB	0,36 aB	0,21 aB	2,09 aA	0,48 aB	0,31 aB
SA	0,31 aA	0,35 aA	1,04 aA	1,72 aA	0,38 aA	0,24 aA
CN	0,41 aB	0,45 aB	0,47 aB	1,76 aA	0,71 aB	0,25 aB

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna em cada camada e minúscula na linha não diferem entre si pelo teste t que considera a diferença mínima significativa a 5%.

FH = floresta homogênea de eucalipto; SA = sistema agrosilvipastoril na entrelinha e CN = campo nativo.

**Apêndice F.** Estoque de carbono associado aos minerais (CAM) ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) em classes de agregados de um Argissolo Vermelho sob sistemas de uso do solo e camadas. Alegrete - RS, 2008.

Sistemas*	Classe de diâmetro (mm)					
	8,00 - 4,76	4,76 - 2,00	2,00 - 1,00	1,00 - 0,50	0,50 - 0,25	< 0,25
	0,000 – 0,025m					
FH	0,20 aC	0,42 aBC	0,32 aC	0,78 aA	0,38 aAB	0,16 aBC
SA	0,07 aA	0,20 aA	0,07 aA	0,73 aA	0,46 Aa	0,20 aA
CN	0,13 aA	0,27 aA	0,12 aA	0,65 aA	0,52 aA	0,21 aA
	0,025 – 0,075m					
FH	0,35 aB	0,61 aB	0,40 aB	2,08 aA	0,55 aB	0,28 aB
SA	0,18 aB	0,22 aB	0,16 aB	2,36 aA	0,36 aB	0,29 aB
CN	0,25 aA	0,57 aA	0,51 aA	1,03 aA	0,73 aA	0,42 aA
	0,075 – 0,125m					
FH	0,39 aB	0,38 aB	0,23 aB	2,15 aA	0,37aB	0,21 aB
SA	0,21 aC	0,25 aC	0,16 aC	1,78 aA	0,47 aB	0,27 aC
CN	0,25 aA	0,39 aA	0,44 aA	1,23 aA	0,62 aA	0,35 aA
	0,125 – 0,225m					
FH	0,44 aB	0,45 aB	0,32 aB	3,49 aA	0,71 aB	0,42 aB
SA	0,47 aA	0,71 aA	1,65 aA	2,17 aA	0,46 aA	0,29 aA
CN	0,63 aB	0,62 aB	0,78 aB	2,76 aA	0,91 aB	0,35 aB

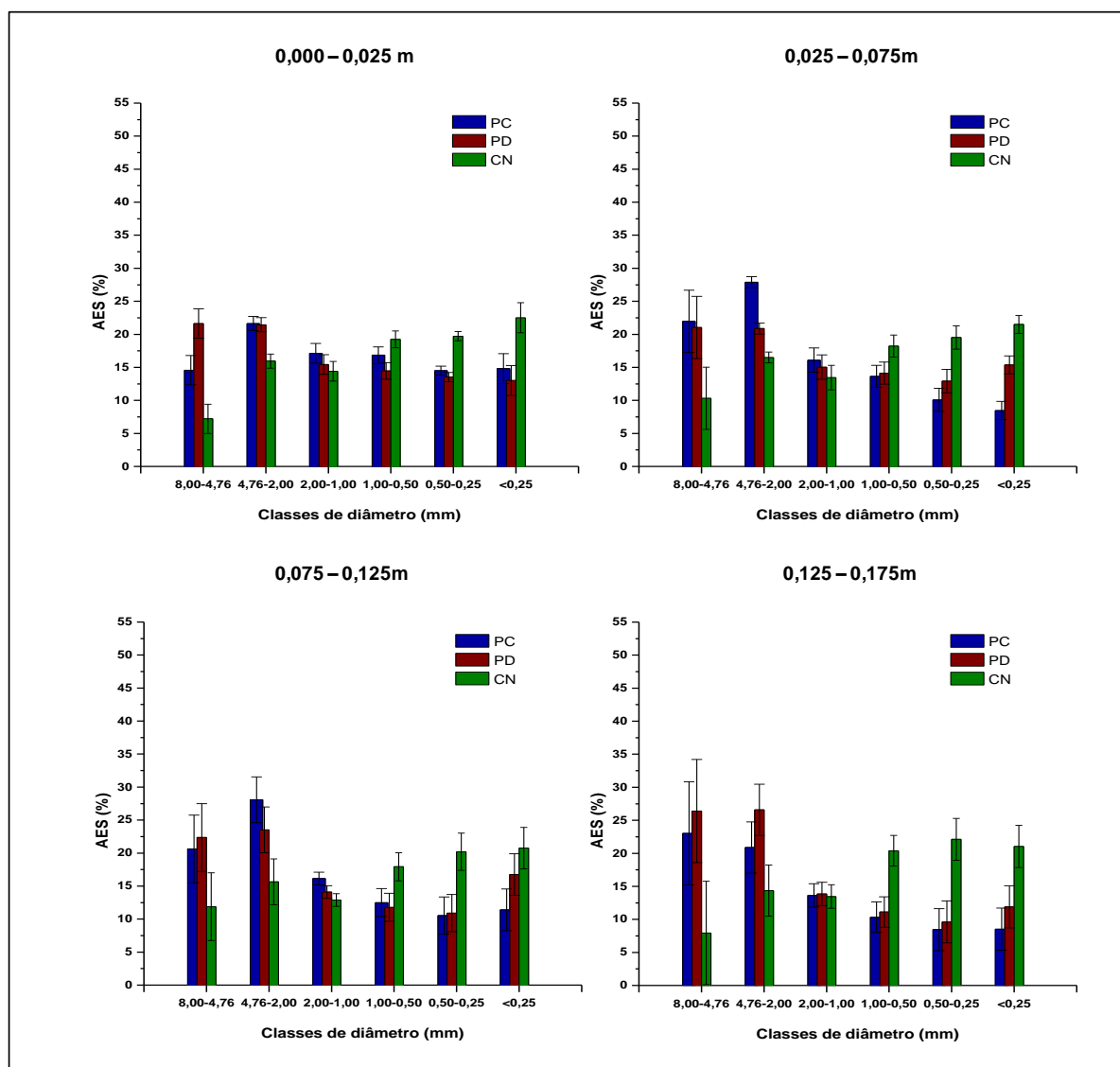
Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna em cada camada e minúscula na linha não diferem entre si pelo teste t que considera a diferença mínima significativa a 5%.

FH = floresta homogênea de eucalipto; SA = sistema agrosilvipastoril na entrelinha e CN = campo nativo.

**Apêndice G.** Equações da reta de relação entre os agregados estáveis à seco (AES) e o carbono orgânico total (COT), carbono da fração grosseira (CFG), carbono associados aos minerais (CAM), fração leve livre (FLL), fração leve oclusa (FLO) e fração pesada (FP) de um Argissolo Vermelho sob sistemas de uso. Alegrete - RS, 2008.

	FH	SA	CN
COT	$y = 0,1393x + 0,2515$	$y = 0,1188x + 0,1284$	$y = 0,1118x + 0,2368$
CFG	$y = 0,0492x + 0,2059$	$y = 0,0383x + 0,2065$	$y = 0,0416x + 0,1883$
CAM	$y = 0,0959x + 0,1394$	$y = 0,0753x - 0,082$	$y = 0,0702x + 0,0486$
FLL	$y = 0,0155x + 0,2935$	$y = 0,006x + 0,3128$	$y = 0,0032x + 0,2804$
FLP	$y = 0,0113x + 0,1207$	$y = 0,0072x + 0,00766$	$y = 0,0104x + 0,0925$
FP	$y = 0,1126x - 0,1626$	$y = 0,105x - 0,261$	$y = 0,0982x - 0,136$





Apêndice H. Agregados estáveis a seco (AES) de um Planossolo Háplico sob sistemas de manejo e camadas. Capão do Leão-RS, 2009. PC = preparo convencional, PD = plantio direto e CN = campo nativo. Barras verticais indicam a diferença mínima significativa a 5% em cada classe de agregados do solo.

Apêndice I. Densidade do solo (Ds) de um Planossolo Háplico sob sistemas de manejo e camadas. Capão do Leão-RS, 2009.

Sistemas de uso	Ds (Mg m <sup>-3</sup> )
	0,000 – 0,025 m
PC	1,56
PD	1,56
CN	1,35
	0,025 – 0,075 m
PC	1,67
PD	1,68
CN	1,56
	0,075 – 0,125 m
PC	1,74
PD	1,67
CN	1,59
	0,125 – 0,175 m
PC	1,83
PD	1,74
CN	1,61

\*FH = floresta homogênea de eucalipto; SA = sistema agrossilvipastoril na entrelinha e CN = campo nativo.

Apêndice J. Estoque de carbono orgânico total (COT), nitrogênio total (NT), relação carbono/nitrogênio (C/N), carbono da fração grosseira (CFG), carbono associado aos minerais (CAM), carbono da fração leve livre (FLL), carbono da fração leve oclusa (FLO) e carbono da fração pesada (FP) de um Planossolo Háplico sob sistemas de manejo e camadas. Capão do Leão-RS, 2009.

Sistemas*	COT ----- Mg ha <sup>-1</sup> -----	NT -----	C/N	CFG	CAM	FLL ----- Mg ha <sup>-1</sup> -----	FLO	FP
				0,000 – 0,025m				
PC	5,93 a	0,33 a	19	1,64 b	4,29 a	0,88 b	1,41 a	3,65 a
PD	6,57 a	0,38 a	18	2,06 a	4,51 a	1,06 a	1,38 a	4,12 a
CN	7,72	0,54	17	2,47	5,08	2,04	2,62	3,06
				0,025 – 0,075m				
PC	11,12 a	0,60 a	19	2,13 a	9,00 a	0,90 a	2,42 a	7,81 a
PD	10,25 a	0,48 a	22	2,32 a	7,94 a	0,91 a	1,64 b	7,71 a
CN	12,23	0,83	15	3,26	8,97	0,70	3,23	8,29
				0,075 – 0,125m				
PC	10,60 a	0,57 a	20	2,35 a	7,78 a	nd	nd	nd
PD	9,87 a	0,58 a	17	2,19 a	7,68 a	nd	nd	nd
CN	10,32	0,73	14	2,62	7,70	nd	nd	nd
				0,125 – 0,175m				
PC	10,05 a	0,68 a	16	2,06 a	7,99 a	nd	nd	nd
PD	9,74 a	0,52 a	19	2,05 a	7,69 a	nd	nd	nd
CN	9,11	0,36	28	2,37	6,91	nd	nd	nd

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna em cada camada não diferem entre si pelo teste t que considera diferença mínima significativa a 5%.

\*PC = preparo convencional; PD = plantio direto e CN = campo nativo.

Nd = não determinado

Apêndice K. Estoque de carbono orgânico total (COT) ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) em classes de agregados de um Planossolo Háplico sob sistemas de manejo do solo e camadas. Capão do Leão-RS, 2009.

Sistemas <sup>1</sup>	Classe de diâmetro (mm)					
	8,00 - 4,76	4,76 - 2,00	2,00 - 1,00	1,00 - 0,50	0,50 - 0,25	< 0,25
	0,000 – 0,025m					
PC	0,86 aB	1,34 aA	0,99 aB	0,87 aB	0,83 aB	0,87 aB
PD	1,12 aB	1,31 aA	1,01 aB	0,67 aC	0,70 aC	0,85 aBC
CN	0,57 B	1,44 D	1,14 C	0,79 DE	0,81 D	1,80 A
	0,025 – 0,075m					
PC	2,57 aB	3,21 aA	1,85 aC	1,48 aD	1,04 aE	1,03 aE
PD	2,20 aA	2,14 aA	1,60 aA	1,44 aA	1,34 aBA	1,76 aA
CN	1,37 D	2,16 B	1,64 CD	1,65 CD	1,92 BC	3,30 A
	0,075 – 0,125m					
PC	2,25 aAB	3,44 aA	1,76 aB	1,35 aB	1,69 aB	1,72 aB
PD	2,27 aA	2,01 aA	1,43 aB	1,12 aB	1,25 aB	2,27 aA
CN	1,30 C	1,81 C	1,31 C	1,82 BC	2,53 AB	2,74 A
	0,125 – 0,175m					
PC	2,66 aA	2,70 aA	1,50 aA	1,51 aA	1,09 aA	1,06 aA
PD	2,41 aA	2,59 aA	1,44 aA	1,50 aA	1,09 aA	1,55 aA
CN	0,77 C	1,43 BC	0,98 C	2,23 AB	2,88 A	2,50 A

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna em cada camada e minúscula na linha não diferem entre si pelo teste t que considera a diferença mínima significativa a 5%.

\*PC = preparo convencional; PD = plantio direto e CN = campo nativo.

Apêndice L. Estoque de nitrogênio total (NT) ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) em classes de agregados de um Planossolo Háplico sob sistemas de manejo do solo e camadas. Capão do Leão-RS, 2009.

Sistemas <sup>1</sup>	Classe de diâmetro (mm)					
	8,00 - 4,76	4,76 - 2,00	2,00 - 1,00	1,00 - 0,50	0,50 - 0,25	< 0,25
	0,000 – 0,025m					
PC	0,05 aBC	0,09 aA	0,10 aA	0,08 aAB	0,04 bC	0,07 aAB
PD	0,05 aC	0,13 aA	0,09 aB	0,05 aC	0,05 aC	0,07 aBC
CN	0,05 D	0,11 AB	0,10 AB	0,05 CD	0,08 BC	0,12 A
	0,025 – 0,075m					
PC	0,18 aAB	0,21 aA	0,15 aABC	0,07 aC	0,09 aBC	0,08 aBC
PD	0,18 aA	0,16 aA	0,13 aA	0,10 aA	0,09 aA	0,10 aA
CN	0,10 A	0,13 A	0,15 A	0,12 A	0,16 A	0,23 A
	0,075 – 0,125m					
PC	0,17 aA	0,23 aA	0,15 aA	0,09 aA	0,13 aA	0,15 aA
PD	0,21 aA	0,14 aBC	0,12 aBC	0,06 aD	0,11 aCD	0,17 aAB
CN	0,12 A	0,12 A	0,07 A	0,13 A	0,15 A	0,17 A
	0,125 – 0,175m					
PC	0,18 aA	0,22 aA	0,10 aA	0,11 aA	0,06 aA	0,07 aA
PD	0,15 aAB	0,20 aA	0,08 aC	0,11 aBC	0,06 aC	0,12 aBC
CN	0,05 C	0,07 BC	0,08 BC	0,13 BC	0,23 A	0,15 AB

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna em cada camada e minúscula na linha não diferem entre si pelo teste t que considera a diferença mínima significativa a 5%.

\*PC = preparo convencional; PD = plantio direto e CN = campo nativo.

Apêndice M. Estoque de carbono da fração grosseira (CFG) ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) em classes de agregados de um Planossolo Háplico sob sistemas de manejo do solo e camadas. Capão do Leão-RS, 2009.

Sistemas <sup>1</sup>	Classe de diâmetro (mm)					
	8,00 - 4,76	4,76 - 2,00	2,00 - 1,00	1,00 - 0,50	0,50 - 0,25	< 0,25
	0,00 – 0,025m					
PC	0,22 aD	0,41 aA	0,28 aB	0,25 bC	0,21 bD	0,16 bE
PD	0,29 aA	0,49 aA	0,34 aA	0,36 aA	0,37 aA	0,29 aA
CN	0,11 C	0,35 BC	0,40 B	0,37 B	0,39 B	0,78 A
	0,025 – 0,075m					
PC	0,55 aAB	0,58 aA	0,53 aB	0,36 aC	0,31 aC	0,20 bD
PD	0,34 bBC	0,58 aA	0,39 bB	0,35 aBC	0,31 aC	0,30 aC
CN	0,30 C	0,41 DE	0,45 CD	0,56 BC	0,60 B	0,86 A
	0,075 – 0,125m					
PC	0,37 aB	0,59 aA	0,33 aBC	0,27 aC	0,37 aB	0,30 aBC
PD	0,44 aA	0,47 bA	0,30 aB	0,30 aB	0,27 bB	0,31 aB
CN	0,33 C	0,43 BC	0,36 C	0,50 AB	0,56 A	0,58 A
	0,125 – 0,175m					
PC	0,36 aB	0,60 aA	0,32 aB	0,21 aC	0,18 aC	0,12 aC
PD	0,52 aA	0,49 bA	0,29 aB	0,26 aBC	0,22 aCD	0,18 aD
CN	0,18 D	0,32 C	0,34 C	0,53 A	0,55 A	0,44 aB

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna em cada camada e minúscula na linha não diferem entre si pelo teste t que considera a diferença mínima significativa a 5%.

\*PC = preparo convencional; PD = plantio direto e CN = campo nativo.

Apêndice N. Estoque de carbono associados aos minerais (CAM) ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) em classes de agregados de um Planossolo Háplico sob diferentes sistemas de manejo do solo e camadas. Capão do Leão-RS, 2009.

Sistemas <sup>1</sup>	Classe de diâmetro (mm)					
	8,00 - 4,76	4,76 - 2,00	2,00 - 1,00	1,00 - 0,50	0,50 - 0,25	< 0,25
	0,000 – 0,025m					
PC	0,64 aB	0,94 aA	0,70 aB	0,59 aB	0,59 aB	0,71 aB
PD	0,86 aA	0,81 aAB	0,66 aAB	0,31 bC	0,32 bC	0,56 aBC
CN	0,46 C	1,09 A	0,72 BC	0,42 C	0,44 C	1,02 AB
	0,025 – 0,075m					
PC	2,03 aB	2,64 aA	1,33 aC	1,12 aCD	0,73 aE	0,90 bD
PD	1,86 aA	1,56 bA	1,21 aA	1,12 aA	1,04 aA	1,47 aA
CN	1,06 C	1,75 B	1,19 C	1,02 C	1,32 BC	2,44 A
	0,075 – 0,125m					
PC	1,89 aA	2,85 aA	1,42 aA	1,08 aA	1,32 aA	1,42 aA
PD	1,83 aA	1,53 aAB	1,14 aBC	0,81 aC	0,98 aC	1,96 aA
CN	0,98 aC	1,40 BC	1,00 C	1,33 BC	1,98 AB	2,16 A
	0,125 – 0,175m					
PC	2,30 aA	2,10 aA	1,18 aA	1,30 aA	0,91 aA	0,94 aA
PD	1,88 aA	2,10 aA	1,15 aA	1,23 aA	0,87 aA	1,36 aA
CN	0,59 C	1,10 A	0,65 C	1,69 aAB	2,34 A	2,06 A

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna em cada camada e minúscula na linha não diferem entre si pelo teste t que considera a diferença mínima significativa a 5%.

\*PC = preparo convencional; PD = plantio direto e CN = campo nativo.

Apêndice O. Equações da reta de relação entre os agregados estáveis à seco (AES) e o carbono orgânico total (COT), carbono da fração grosseira (CFG), carbono associados aos minerais (CAM), fração leve livre (FLL), fração leve oclusa (FLO) e fração pesada (FP) de um Planossolo Háplico sob sistemas de manejo. Capão do Leão-RS, 2009.

	PC	PD	CN
COT	$y = 0,241x + 0,2064$	$y = 0,2214x - 0,0317$	$y = 0,216x + 0,6062$
CFG	$y = 0,0455x + 0,1792$	$y = 0,0265x + 0,6547$	$y = 0,1093x - 0,4744$
CAM	$y = 0,1955x - 0,3856$	$y = 0,1948x - 0,6864$	$y = 0,1067x + 1,0806$
FLL	$y = 0,021x + 0,0952$	$y = 0,0109x + 0,7545$	$y = 0,0135x + 0,5519$
FLP	$y = 0,0349x + 0,1111$	$y = 0,0323x + 0,0796$	$y = 0,0176x + 0,7119$
FP	$y = 0,1851x - 0,4128$	$y = 0,1979x - 0,809$	$y = 0,1868x - 0,5396$