

**IZABEL KLUG**

**ESTOQUE E FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS DO CARBONO  
EM SOLO DE ALTITUDE DO RIO GRANDE DO SUL SOB  
DIFERENTES VEGETAÇÕES**

Dissertação apresentada ao Centro de Ciências  
Agroveterinárias da Universidade do Estado de  
Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre  
em Ciência do Solo.

Orientador: Dr. Álvaro Luiz Mafra  
Co-orientador: Dr. Luciano Colpo Gatiboni

**LAGES, SC  
2014**

K66e Klug, Izabel

Estoque e frações granulométricas do carbono em solo de altitude do Rio Grande do Sul sob diferentes vegetações / Izabel Klug. - Lages, 2014.

80 p. : il. ; 21 cm

Orientador: Álvaro Luiz Mafra

Coorientador: Luciano Colpo Gatiboni

Bibliografia: p. 67-80

Dissertação (mestrado) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveteinárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Lages, 2014.

1. Carbono orgânico do solo. 2. Vegetação nativa. 3. Silvicultura. I. Klug, Izabel. II. Mafra, Álvaro Luiz. III. Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. IV. Título

CDD: 631.86 - 20.ed.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Setorial do  
CAV/UDESC

**IZABEL KLUG**

**ESTOQUE E FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS DO CARBONO  
EM SOLO DE ALTITUDE DO RIO GRANDE DO SUL SOB  
DIFERENTES VEGETAÇÕES**

Dissertação apresentada ao Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

**Banca examinadora**

Orientador: \_\_\_\_\_

Dr. Álvaro Luiz Mafra  
Universidade do Estado de Santa Catarina

Membro: \_\_\_\_\_

Dr. Fabrício Tondello Barbosa  
Universidade do Estado de Santa Catarina

Membro: \_\_\_\_\_

Dr. Tássio Dresch Rech  
EPAGRI, Lages

**LAGES, SC, 10 de março de 2014**



## AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias – Ciência do Solo - Universidade do Estado de Santa Catarina, em especial ao professor Álvaro Luiz Mafra pela orientação, auxílio e confiança, e a oportunidade de aprendizado e trabalho que recebi na realização deste mestrado e desenvolvimento do projeto.

À CAPES pela concessão da bolsa.

Aos funcionários da Floresta Nacional São Francisco de Paula, pela boa vontade em nos receber, especialmente ao Artur José Soligo, Analista Ambiental.

A todos os colegas que contribuíram na realização das coletas de solo.

Ao Augusto e Cleber, pelos ensinamentos na realização das análises.

Aos membros da banca, professor Fabrício e pesquisador Tássio, pelos ensinamentos que contribuíram com a finalização do trabalho.

Aos meus pais e aos amigos, pelo incentivo e carinho sempre presentes.



## RESUMO

KLUG, Izabel. **Estoque e frações granulométricas do carbono em solo de altitude do Rio Grande do Sul sob diferentes vegetações.** 2014. 80 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, Lages, SC., 2014.

No Sul do Brasil, as florestas e campos naturais que formam a típica paisagem de mosaicos, agem como reservatórios de carbono no solo, desempenhando importante papel no ciclo global deste elemento. No entanto, a vegetação destas áreas vem sendo retirada e substituída, especialmente para plantios florestais com espécies exóticas, o que pode afetar as frações e o estoque de carbono, bem como os nutrientes e a qualidade do solo. Nesse sentido, o objetivo do trabalho foi avaliar as diferenças nos estoques e frações granulométricas do carbono do solo e na qualidade deste, em áreas de mata nativa (MN) e campo nativo (CN), em comparação com área de campo em abandono por 22 anos (R22) e aos plantios florestais de pinus, com 49 anos (P49) e eucalipto com 21 anos (E21). As áreas localizam-se na Floresta Nacional São Francisco de Paula, situada na região dos Campos de Cima da Serra (RS), e apresentam condições semelhantes de altitude, inclinação de terreno, e o solo é um Cambissolo Húmico Alumínico. Amostras de solo foram coletadas nas camadas de 0 a 5, 5 a 10 e 10 a 20 cm de profundidade. As avaliações realizadas foram densidade do solo, análises químicas (pH, Al, Ca, Mg e K), carbono orgânico total (COT), C orgânico particulado (COP) e carbono associado aos minerais (CAM), estimando-se o estoque de C e o índice de manejo de carbono (IMC). Em geral, CN e MN apresentaram os maiores valores de COT, estoque de C e teores das frações granulométricas, o que demonstra que, sob sistema natural, o conteúdo de C é superior aos verificados nos cultivados. No entanto, E21 e P49 apresentaram em relação ao CN diferenças significativas dos teores de COT, COP, CAM, nutrientes, estoque de C e IMC, demonstrando a possível fragilidade desta formação vegetal quando submetida à silvicultura. No plantio E21, esta diferença foi maior na fração lábil do C, no IMC e nos teores de Ca e Mg. Já o P49 apresentou menores valores no estoque, na fração mais estável deste elemento e no

teor de K em relação ao CN. No geral a área R22 apresentou valores desses atributos similares aos do CN e MN, demonstrando boa capacidade de recuperação de C e nutrientes do solo.

**Palavras chave:** Carbono orgânico do solo. Vegetação nativa. Silvicultura.

## ABSTRACT

KLUG, Izabel. **Carbon stock and granulometric fractions in a highland soil of Rio Grande do Sul under different vegetations.** 2014. 80 f. Dissertation (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, Lages, SC., 2014.

The natural forests and grasslands mosaics in the southern Brazil landscapes can store carbon in the soil and play an important role in the global cycle of this element. However, vegetation cover of these areas has been removed and replaced, particularly by forest plantations using exotic tree species, which can affect fractions and carbon stocks, as well as nutrients and soil quality. In this sense, the objective of this study was to evaluate changes in stocks and granulometric fractions of soil carbon, and changes in some soil chemical properties in areas under native forest (NF) and native grassland (NG), in comparison with natural grassland regeneration for 22 years (R22), eucalypt plantations for 21 years (E21) and pine for 49 years (P49). These areas belong to São Francisco de Paula National Forest, in the Southern Brazil highlands and have similar altitude, topography and soil conditions. Soil is a Humic Dystrucept and soil samples were collected in the layers of 0-5; 5-10; 10-20 cm depth. The evaluated properties were bulk density, chemical composition (pH, Al, Ca, Mg and K), total organic carbon (TOC), particulate organic carbon (POC), and mineral-associated carbon (MAC), estimating the carbon stocks and carbon management index (CMI). In general, NG and NF presented higher TOC values, carbon stocks, and POC contents than the cultivated areas. Thus, E21 and P49 decreased TOC, POC, MAC, nutrients, carbon storage and CMI, demonstrating the fragility of these cultivated trees. In E21 plantation showed greater decline in the labile C fraction and CMI, and Ca and Mg contents. P49 showed lower stocks in the more stable MAC fraction and lower K content in relation to NG. In general, R22 area under regeneration showed values similar to those of NF and NG, showing good capacity to recover soil C and nutrient contents.

**Keywords:** Soil organic carbon. Native vegetation. Forestry.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Imagem por satélite das áreas de estudo, na Floresta Nacional São Francisco de Paula.....31
- Figura 2 – Teores de carbono orgânico total (COT) em diferentes tipos de uso do solo, em São Francisco de Paula, RS.....35
- Figura 3 – Teores de carbono orgânico particulado (COP) em três profundidades de diferentes tipos de uso do solo, em São Francisco de Paula, RS.....43
- Figura 4 – Teores de carbono associado aos minerais (CAM) em diferentes tipos de uso do solo, em São Francisco de Paula, RS.....46
- Figura 5 – Variação nos teores de frações de carbono em eucalipto, pinus e área em regeneração, em função da transformação do campo, tendo o campo nativo como referência e a mata nativa como comparação.....50
- Figura 6 – Proporções de carbono orgânico particulado (COP) e carbono associado aos minerais (CAM) em porcentagem, nas três camadas avaliadas dos diferentes usos do solo, em São Francisco de Paula, RS.....51
- Figura 7 – Estoques ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) de carbono em diferentes tipos de uso do solo, em São Francisco de Paula, RS.....52
- Figura 8 – Variação nos estoques de C e índice de manejo de C (IMC) nos sistemas eucalipto, pinus e regeneração, em função da transformação do campo nativo, tendo este como referência e a mata nativa como comparação.....53



## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 – Granulometria do Cambissolo Húmico na camada de 0-20 cm, em diferentes usos do solo em São Francisco de Paula, RS.....30
- Tabela 2 – Densidade do solo em  $\text{g cm}^{-3}$  em diferentes usos do solo em São Francisco de Paula, RS.....33
- Tabela 3 – Índice de manejo de carbono na camada de 0 a 20 cm do solo em diferentes tipos de uso do solo, em São Francisco de Paula, RS.....56
- Tabela 4 – Teores de pH em água e pH em  $\text{CaCl}_2$  e respectivos intervalos de confiança (IC), em diferentes tipos de uso do solo, em Cambissolo Húmico, em São Francisco de Paula, RS.....59
- Tabela 5 – Teores de Ca, Mg, Al e K e respectivos intervalos de confiança (IC), em sistemas de um Cambissolo Húmico, em São Francisco de Paula, RS.....60



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	17
1.1 HIPÓTESES.....	18
1.2 OBJETIVOS.....	18
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	19
2.1 POTENCIAL DE ARMAZENAMENTO DE CARBONO EM AMBIENTES NATURAIS DO RIO GRANDE DO SUL.....	19
2.2 POTENCIAL DE ARMAZENAMENTO DE CARBONO EM AMBIENTES DE FLORESTAS PLANTADAS.....	23
2.3 MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO.....	23
2.3.1 Carbono orgânico do solo.....	24
2.3.2 Carbono orgânico particulado e associado aos minerais.....	25
2.3.3 Mecanismos de proteção do carbono orgânico do solo.....	26
2.3.4 Estoque de carbono.....	26
2.3.5 Índice de manejo de carbono.....	27
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	29
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	29
3.2 AMOSTRAGEM E AVALIAÇÕES.....	32
3.3 ANÁLISE DOS DADOS.....	34
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	35
4.1 CARBONO ORGÂNICO TOTAL DO SOLO.....	35
4.2 CARBONO ORGÂNICO PARTICULADO.....	42
4.3 CARBONO ORGÂNICO ASSOCIADO AOS MINERAIS.....	45
4.4 ESTOQUE DE CARBONO.....	51
4.5 ÍNDICE DE MANEJO DE CARBONO.....	56
4.6 ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO: PH ALUMÍNIO E CÁTIONS TROCÁVEIS.....	58
<b>5 CONCLUSÕES</b> .....	65
<b>6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	67



## 1 INTRODUÇÃO

A matéria orgânica do solo desempenha importante papel na qualidade do solo e na dinâmica do carbono orgânico, representando a principal reserva deste elemento. Entretanto, mudanças no uso e manejo da terra podem alterar os atributos do solo e conseqüentemente os estoques de carbono das diferentes frações da matéria orgânica do solo.

Uma das atividades antrópicas que mais alteram os ambientes naturais é a implantação de florestas com espécies exóticas, para a produção de madeira e celulose. Assim, a retirada da vegetação nativa para introdução destas florestas pode modificar a dinâmica do carbono, com efeitos positivos ou negativos sobre o solo, que variam em função do tipo de solo, clima, vegetação, manejo, e tempo de substituição dessas áreas. No entanto, existem poucas informações sobre a efetividade destas plantações em armazenar o carbono no solo e o impacto que estas geram, nas frações deste elemento, em ambientes da região Sul do Brasil.

No Rio Grande do Sul, a expansão das florestas plantadas é crescente, especialmente na região nordeste, e ocorre sobre áreas de floresta de araucária e principalmente sobre campos nativos. Tais vegetações apresentam papel ecológico destacado e não devem ser substituídas indiscriminadamente, o que pode trazer conseqüências negativas na qualidade do solo.

A floresta de araucária também foi muito alterada no passado, principalmente até a década de 1960, quando não havia proibição do corte da araucária, e a exploração desta se dava de forma predatória. Atualmente, as áreas de floresta são poucas, e no geral se encontram em manchas formando mosaicos com os campos. Estes mosaicos fornecem serviços ambientais importantes, pois abrigam alta biodiversidade, garantem a conservação dos recursos hídricos e do solo e podem conter importante estoque de carbono orgânico do solo, quando este ecossistema é bem manejado. Entretanto, nas últimas décadas grandes áreas deste mosaico têm sido perdidas, influenciados pelas atividades humanas, por meio da agricultura e silvicultura.

Assim, a alteração da paisagem nativa do Rio Grande do Sul, por meio da remoção do campo e da floresta de araucária para implantação de pinus e eucalipto, pode resultar em modificações na matéria orgânica e até mesmo em perda de carbono orgânico do solo.

Nesse sentido, a avaliação dos estoques de carbono em solos onde foram plantadas estas culturas em substituição às vegetações

nativas, é necessária para obter a contribuição do bioma campo-floresta nos inventários nacionais de carbono. Além disso, uma análise detalhada da matéria orgânica no solo destes plantios é essencial para estimar a sustentabilidade e a capacidade destes em armazenar carbono, e possíveis alterações que possam causar na qualidade do solo, após substituição das áreas naturais.

## 1.1 HIPÓTESES

A transformação de áreas com vegetação nativa campestre e de floresta por plantios de eucalipto e pinus afeta o equilíbrio do solo, gerando efeito negativo sobre os teores de C nele contidos, bem como na sua labilidade, com consequência nos nutrientes e estoque de carbono no solo.

## 1.2 OBJETIVOS

Avaliar as diferenças nos estoques e nas frações granulométricas do carbono do solo, e na qualidade deste pelo índice de manejo de C (IMC), em áreas com cultivo de eucalipto e pinus e área de campo em regeneração, em relação àqueles sob vegetação de campo nativo remanescente e mata nativa, na região dos Campos de Cima da Serra (RS).

Avaliar a composição química do solo, em termos de nutrientes, alumínio trocável e pH como indicativos da influência da mudança de vegetação sobre o solo.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 POTENCIAL DE ARMAZENAMENTO DE CARBONO EM AMBIENTES NATURAIS DO RIO GRANDE DO SUL

A vegetação do Rio Grande do Sul é bastante diversa, sendo sua paisagem tipicamente formada por florestas, pastagens e cultivos diversos. A região nordeste possui uma das maiores biodiversidades deste estado e abrange a região fisiográfica Campos de Cima da Serra, composta por cânions, rios, cachoeiras, florestas e campos (KOCH e HENKES, 2013).

A vegetação campestre, também chamada de campos do sul do Brasil, está incluída em dois biomas (IBGE 2004) sendo eles: Pampa, correspondente à metade sul do estado do Rio Grande do Sul; e Mata Atlântica. Este último inclui áreas de campos no Planalto Sul-Brasileiro, formando mosaicos com as florestas na metade norte do Rio Grande do Sul (RS) e nos estados de Santa Catarina (SC) e Paraná (PR).

Os campos do estado do Rio Grande do Sul são ecossistemas naturais que já existiam antes da chegada dos primeiros grupos humanos na região, há milhares de anos. Devido ao clima mais seco e frio, apresentavam uma composição de espécies diferente da atual, sendo ambientes de pradarias com predomínio de gramíneas. Há cerca de 4 mil anos atrás teve início a expansão natural das florestas a partir de refúgios, formando em algumas regiões as florestas de galeria e em outras, maciços florestais, indicando mudança para um clima mais úmido, semelhante ao atual, enquanto a paisagem manteve-se predominantemente campestre (BEHLING et al., 2001). Entre 4 e 2 mil anos atrás, a floresta iniciou expansão sobre os campos, e de 2 mil anos até o presente a floresta forma mosaicos com as pastagens (LEONHARDT e LORSCHREITER, 2010). No entanto, essa expansão tem sido contida ao longo do tempo, devido ao efeito do fogo em impedir o estabelecimento de espécies lenhosas, decorrente das queimadas realizadas nas pastagens (MÜLLER et al., 2007).

Do ponto de vista ecológico, esses ambientes apresentam alta diversidade de espécies vegetais e animais, e constituem grande reserva de matéria orgânica no solo (TORNQUIST et al., 2009). Entretanto, esta formação não tem sido tratada como uma prioridade de conservação no passado e no presente, pois antigas áreas de produção de gado foram transformadas em grandes áreas de plantações de florestas exóticas que estão crescendo rapidamente a cada ano (OVERBECK et al., 2007). Em

consequência, nos últimos 30 anos, pelo menos 25% da área total de campos foram convertidos em áreas de plantações de milho, soja e ultimamente, nas plantações de árvores exóticas (PILLAR et al., 2006).

Áreas de floresta de araucária também foram perdidas em decorrência da silvicultura. Exemplo disso foi relatado por Lima e Cunha et al. (2011), que avaliaram a dinâmica da cobertura vegetal no Município de Jaquirana, nos Campos de Cima da Serra, entre os anos de 2002 e 2007, por meio de técnicas de sensoriamento remoto e de geoprocessamento. Os resultados revelaram significativo aumento da silvicultura em detrimento da cobertura florestal natural nesse curto espaço de tempo. Neste município, a silvicultura que ocupava 921 ha em 2002, passou a ocupar 4.814 em 2007, ou seja, teve um aumento de 422%. Em consequência, a perda da floresta de araucária foi de 5.643 ha em cinco anos. Foi observado também que extensas faixas ao longo das margens de rios que permeiam a região estavam ocupadas por plantações de pinus.

Dessa forma, fica nítida a intensificação do processo de redução e fragmentação, não só dos campos, mas também das florestas naturais, o que pode trazer sérias consequências à manutenção dos ecossistemas, tais como o efeito de borda e o isolamento de manchas florestais em meio a áreas alteradas, o que impede o livre trânsito da fauna e a dispersão das sementes de espécies vegetais. Além dessas consequências, a propagação natural de pinus é estimulada pela silvicultura, que pelas suas características de planta invasora ocupa os domínios de floresta e campo naturais.

Assim, a prática continuada e extensiva da silvicultura em áreas originalmente ocupadas por sistemas florísticos complexos e heterogêneos, como os campos e floresta de araucárias, pode resultar em degradação das matas ciliares, contaminação dos aquíferos por pesticidas utilizados na silvicultura, alteração da microbiota responsável pela fertilidade do solo pelo emprego de agrotóxicos, descaracterização da paisagem natural e perda da biodiversidade (LIMA e CUNHA et al., 2011), além da perda de matéria orgânica do solo e consequentemente da capacidade de armazenamento de carbono deste, como foi observado nos trabalhos de Dick et al. (2011), Tomasi et al. (2012) e Wiesmeier et al. (2009), realizados na região dos Campos de Cima da Serra-RS.

Em contradição, há uma grande pressão tanto do governo como das empresas florestais para plantios de pinus e eucalipto no RS, ao mesmo tempo em que vários defensores do “florestamento” dos campos utilizam como premissa para tal, a alta capacidade de sequestro de

carbono das florestas, ignorando o importante papel que este bioma exerce como reserva deste elemento (FIDELIS et al., 2009). Desta maneira a proteção dos campos e sua função como dreno de carbono vêm sendo negligenciada (BEHLING et al., 2009), sem que limites e estratégias para sua conservação sejam efetivamente estabelecidos e aplicados.

Neste contexto, as pesquisas sobre alterações no carbono do solo e emissões de gases de efeito estufa decorrentes da substituição de áreas no bioma de pastagens sul brasileiro são recentes, e os resultados ainda são fragmentados (PILLAR et al., 2012), tornando necessário estudos mais detalhados nesse sentido.

A floresta de araucária também desempenha importante função ecológica e o seu papel como armazenadora de carbono tem sido destacado em diversos trabalhos. No estado do Paraná, Watzlawick et al. (2012) encontraram na vegetação da floresta estoque total de carbono orgânico de 104,7 Mg ha<sup>-1</sup>, o que demonstra a importância da manutenção e preservação desses ecossistemas naturais como forma de manutenção do estoque de carbono orgânico fixado na biomassa vegetal.

Entretanto, o papel da floresta como dreno de carbono tem sido revelado não só na vegetação, mas também no solo, armazenando quantidade significativa deste elemento. Em trabalho realizado em Campo Belo do Sul, Santa Catarina, Primieri (2008), constatou que a floresta de araucária e o campo nativo apresentaram os maiores estoques de carbono orgânico do solo, com 79,6 e 70,7 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente, na profundidade de 0 a 20 cm, e possuem a melhor capacidade de armazenar carbono no solo.

No município André da Rocha, Rio Grande do Sul, o estoque de carbono no solo na camada de 0 a 5 cm, encontrado na floresta de araucária por Santana et al. (2013), foi maior do que na pastagem nativa sem queima há 41 anos, e na pastagem nativa sem queima há oito anos, com valores de, 37,9, 30,3 e 26,7 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente. No entanto, não houve diferença no estoque de carbono entre a floresta, e a pastagem nativa em solo com calcário e adubado, sem queima há 41 anos. O maior estoque de carbono na floresta de araucária também foi encontrado por Potes et al. (2012), em relação às pastagens nativas sem queima, há um ano e há 23 anos, em São José dos Ausentes, Rio Grande do Sul, com valor de 137 Mg ha<sup>-1</sup> na profundidade de 0 a 15 cm, o que foi atribuído ao elevado aporte de resíduos vegetais da parte aérea em ambiente de floresta.

Porém, quando esses ecossistemas nativos de campo e floresta de araucária são modificados e posteriormente deixados em abandono, os estoques de carbono também podem sofrer alteração. No trabalho de Primieri (2008), a floresta de araucária em estágio avançado de regeneração demonstrou ser um ambiente em transição, que emitiu muito CO<sub>2</sub> para a atmosfera e armazenou pequena quantidade no solo, pois baixas concentrações de carbono na biomassa microbiana e altos índices de respiração basal do solo foram relatados. Entretanto, no trabalho de Froufe et al. (2011), nas áreas de capoeira, com 5, 20 e 30 anos, ocorreram os maiores valores de estoque de carbono na camada de 0 a 20 cm, contendo 45,3, 34,4 e 37,3 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente, em comparação aos SAFs, sistemas agrícolas e pastagens, na região do Alto Vale do Ribeira, SP. Assim, a área em regeneração também pode conter importante reserva de carbono.

Em Guarapuava, Paraná, Bini et al. (2013) constataram que após 40 anos de cultivo de pinus, submetido a corte, queima acidental e 13 anos de abandono da área, a floresta secundária com espécies nativas se estabeleceu espontaneamente, tornando possível a restauração da maioria das propriedades do solo, como do carbono orgânico total, apresentando 40,8 g kg<sup>-1</sup> na profundidade de 0 a 10 cm, a níveis próximos aos da floresta de araucária, com 40,4 g kg<sup>-1</sup>. Em contraste, em estudo realizado por Nogueira et al. (2006) em Londrina, também no Paraná, a floresta secundária em abandono por 20 anos, não atingiu nível de carbono próximo à floresta nativa. Essa diferença foi atribuída às condições climáticas mais úmidas e frias do primeiro local de estudo, que tornaram mais fácil a recuperação dos níveis de carbono orgânico do solo, em relação ao último.

Nos ambientes de campo onde é realizada a queima, o fogo exerce influência na sucessão da vegetação e consequentemente nos estoques de carbono, pois afeta o crescimento, sobrevivência e reprodução das plantas e atua sobre a dinâmica do banco de sementes. Assim, quando os campos são excluídos de manejo com pastejo e fogo, são sujeitos ao adensamento com arbustos e consequentemente tenderão a florestas (OLIVEIRA e PILLAR, 2004). Comprovando este fato, Overbeck e Pfadenhauer (2007) relataram que espécies de arbustos, principalmente brotando da comunidade de pastagens, estiveram presentes em grande quantidade, mesmo em áreas recentemente queimadas, próximo a Porto Alegre, RS. Entre os gêneros arbustivos, *Baccharis*, é o mais importante na vegetação campestre atual com

fisionomia marcada pela presença de arbustos, que se desenvolvem na ausência de fogo por períodos prolongados (MÜLLER et al., 2007).

## 2.2 POTENCIAL DE ARMAZENAMENTO DE CARBONO EM AMBIENTES DE FLORESTAS PLANTADAS.

O cultivo de florestas de pinus e eucalipto, principalmente nas regiões tropicais, tem sido apontado por alguns estudos como meio eficiente no sequestro de carbono em razão do acúmulo deste na madeira e aumento do estoque no solo. Exemplo disto é relatado por Rangel e Silva (2007) em Lavras, Minas Gerais, em estudo com pinus e eucalipto de 29 anos, na profundidade de 0 a 40 cm. Ambos plantios foram adubados na implantação, em área anteriormente cultivada com café, onde o eucalipto aumentou o estoque de carbono no solo, com 105,3 Mg ha<sup>-1</sup>, enquanto o pinus esteve com valor próximo ao da mata nativa, apresentando 87,9 e 90,6 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

Em trabalho realizado por Mafra et al. (2008), em Campo Belo do Sul, Santa Catarina, onde foram avaliados campo nativo sem pastejo desde 1993, floresta de pinus com 12 e 20 anos de idade, ambos sem calagem nem adubação, e reflorestamento de araucária com 18 anos de idade, os autores encontraram na profundidade de 0 a 40 cm, maior estoque de carbono no reflorestamento de pinus com 20 anos de idade, com 14,15 kg m<sup>-2</sup>, não diferindo do campo nativo e da mata nativa que apresentaram 13,50 e 13,07 kg m<sup>-2</sup>, e assim destacaram a capacidade desta cultura de armazenar carbono e nutrientes, em resposta à condição de manejo adotada. Já o reflorestamento de araucária teve estoque de carbono de 12,5, diferindo dos demais.

Entretanto, a capacidade dos reflorestamentos em armazenar carbono no solo depende das características do solo, das condições climáticas e condições sócio-econômicas (ALBRECHT e KANDJI, 2003), além da vegetação associada e do tipo de uso do solo.

## 2.3 MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO

A matéria orgânica do solo (MOS) é componente essencial nos diversos processos químicos, físicos e biológicos de ecossistemas terrestres, como na ciclagem e retenção de nutrientes, agregação do solo e dinâmica da água, desempenhando importantes funções na manutenção da qualidade do solo, na sustentabilidade dos sistemas naturais e agrícolas e no balanço de gases responsáveis pelo efeito

estufa. Sua perda pode interferir drasticamente nesses processos, dificultando o desempenho das funções do solo, provocando desequilíbrios no sistema e, conseqüentemente, desencadeando o processo de degradação (ROSCOE et al., 2006).

De todo o carbono orgânico no solo, uma parte considerável encontra-se na forma de MOS, e assim constitui um dos atributos da qualidade do solo, sendo sensível às condições ambientais e às mudanças no manejo. Quando associadas às partículas minerais, formam agregados estáveis fornecendo proteção física à MOS (SANTOS et al., 2009).

### **2.3.1 Carbono orgânico**

O solo forma um importante compartimento terrestre no ciclo e armazenamento de carbono. Entretanto, mudanças na vegetação original de um local ou o uso inadequado do solo podem prejudicar a ciclagem deste elemento, diminuir o teor de MOS e aumentar as emissões de CO<sub>2</sub> (PARK et al., 2012; MURTY et al., 2002). Dessa forma, plantações de florestas em áreas nativas podem alterar o equilíbrio e dinâmica da matéria orgânica do solo.

Nesse contexto, alterações nos teores de carbono foram avaliadas no Planalto dos Campos Gerais, em Santa Catarina, por Souza (2005) que observou maior teor de carbono na floresta de araucária e campo nativo, na profundidade de 0 a 10 cm, enquanto nas áreas com plantação de pinus de 20 e 12 anos, apresentaram menor teor de carbono, com diferença de 14,5 e 8%, respectivamente, em relação à floresta. Na região dos Campos de Cima da Serra, Dick et al. (2011) relataram que o florestamento com pinus em substituição ao campo nativo, reduziu nutrientes e MOS, e além disso afetou a qualidade desta, pois ao longo do tempo a proporção de estruturas quimicamente recalcitrantes e de grupos carboxílicos aumentou, enquanto a de grupos nitrogenados diminuiu.

No entanto, para uma avaliação precisa das alterações provocadas na MOS, é fundamental dispor de metodologias apropriadas para avaliar os efeitos do uso e manejo do solo sobre os compartimentos desta. Para tal, as técnicas de fracionamento da MOS são utilizadas, e baseiam-se em métodos químicos e físicos.

Atualmente o fracionamento físico da MOS tem se destacado para avaliar os compartimentos desta, e suas alterações pelos manejos

utilizados. Entre os métodos físicos, há dois tipos: o densimétrico e o granulométrico.

A MOS é separada em duas frações básicas pelo fracionamento físico granulométrico, segundo Cambardella e Elliott (1992), obtendo-se o carbono orgânico particulado (COP), e o associado aos minerais (CAM). O COP é o material presente na fração areia ( $> 53 \mu\text{m}$ ), sendo composto por materiais que ainda apresentam tecidos intactos, como resíduos de plantas e hifas de fungos. As partículas correspondentes ao CAM são associadas às frações silte e argila ( $< 53 \mu\text{m}$ ) e apresentam formas de proteção que proporcionam longo tempo de reciclagem.

### **2.3.2 Carbono orgânico particulado e associado aos minerais**

O COP constitui a fração lábil da MOS e é controlado principalmente pela adição de resíduos ao solo, pelo clima e por outras propriedades químicas e físicas do solo que afetam a atividade dos organismos decompositores (THENG et al., 1989). Dessa forma, constitui fração mais afetada pelas mudanças de uso do solo do que aquele associado a frações mais finas (STÜRMER et al., 2011). Em consequência, verifica-se que o COP pode funcionar como um indicador eficiente frente às alterações decorrentes do manejo dado ao solo em um curto período de tempo (LOSS et al., 2011).

Já a fração associada aos minerais, adquire resistência ao ataque microbiano, devido à proteção química pela associação às superfícies minerais, ou pela localização no interior de agregados, que dificulta o acesso aos microrganismos. Estas frações, como menciona Theng et al. (1989) e Stevenson (1994) representam 2/3 do C do solo e possuem maior tempo de permanência no solo. Dessa maneira, esta fração apresenta menor variação quando analisada em um curto período de tempo. Bayer et al. (2004), atribuíram a ausência de variação da MOS associada aos minerais em experimento com plantio direto em curto prazo, ao pequeno efeito do sistema de manejo na ruptura e formação de microagregados.

Ao analisar diversos trabalhos que avaliaram as mudanças na MOS após plantio de florestas, Eclesia et al. (2012) perceberam que as mudanças nos estoques de carbono ocorreram principalmente na fração associada aos minerais, enquanto estoques de carbono na fração lábil permaneceram relativamente constantes. Por outro lado, ao avaliar o efeito do plantio de eucalipto na vegetação nativa do cerrado, no Vale do Jequitinhonha, Minas Gerais, Pulrolnik et al. (2009) relataram que o

cultivo do eucalipto aumentou o estoque de carbono em frações mais lábeis, como o COP, em comparação com o Cerrado e a pastagem, e reduziu o estoque de carbono da fração mais estável.

### **2.3.3 Mecanismos de proteção do carbono orgânico do solo**

As formas de proteção do carbono podem ser de natureza física, interação organomineral e recalitrância química. Embora sejam estudadas separadamente, esses mecanismos podem ocorrer simultaneamente. A proteção física ou oclusão refere-se à proteção no interior dos agregados, onde a acessibilidade aos organismos do solo é menor, controlando a decomposição da MOS. A estabilização por esse meio depende da adição de resíduos ao solo, pois favorece a formação de agregados que irão proteger fisicamente o COP, pela ação de agentes ligantes produzidos por raízes e hifas de fungos (LOSS et al., 2011). A interação organomineral corresponde aos mecanismos de ligação entre a MOS e as superfícies minerais, que pode depender dos grupos funcionais envolvidos, teor de argila, tipo de carga, presença de cátions metálicos e do ambiente físico-químico do meio. Já a recalitrância química das moléculas que compõe a MOS é definida como uma resistência da própria molécula em ser decomposta e depende da sua conformação molecular, presença de grupos funcionais e sua composição elementar. O mecanismo mais importante de proteção e estabilização da matéria orgânica é a interação organomineral, seguida da oclusão e a recalitrância química. No entanto a interação organomineral tem forte relação com a oclusão (SANTOS et al., 2012).

### **2.3.4 Estoque de carbono**

O estoque de carbono orgânico é um atributo promissor para avaliação da qualidade do solo (NEVES et al., 2004).

Embora alguns autores relatem redução nos estoques de CO em áreas de plantação de eucalipto e pinus, em outros estudos não foi observada alteração (RANGEL e SILVA, 2007). Portanto, as alterações no uso da terra e a relação com as modificações nos estoques de carbono e na dinâmica da matéria orgânica podem ter resultados bastante variados, pois envolvem uma série de fatores como tipo de solo, vegetação e manejo. Estudos nesse sentido podem trazer informações para os diferentes casos, que auxiliem na melhoria da qualidade do solo e mantenha ou aumentem os estoques de carbono neste.

### 2.3.5 Índice de manejo de carbono

A integração entre os compartimentos do carbono e a labilidade podem ser representados pelo índice de manejo de carbono (IMC), como inicialmente proposto por Blair et al. (1995). O IMC é um indicador de qualidade do manejo do solo e permite avaliar o processo de perda ou ganho de qualidade do solo. Quanto maior o IMC, melhor a qualidade do solo e vice-versa. O IMC poderia ser utilizado com mais frequência, pois é um bom indicativo da qualidade do manejo na matéria orgânica em função dos sistemas de manejo de solo e de cultura (SOUZA et al., 2009).

A avaliação deste índice em florestas plantadas foi realizada por Inácio (2009), em mata nativa, pastagem e eucalipto e pinus com idade de 33 anos, bem como a sua distribuição no perfil de Latossolo Vermelho Distroférico, em Lavras, MG. Os valores de IMC foram inferiores a 100 nos diferentes sistemas de uso do solo, indicando o impacto negativo do uso e práticas de manejo sobre os teores de matéria orgânica e qualidade do solo, em relação à área sob mata nativa, sendo o cultivo de pinus o sistema que mais compromete a quantidade e qualidade da matéria orgânica na superfície do solo.

Existem vários trabalhos que avaliam alterações na MOS decorrentes da transformação de áreas naturais, nos diferentes ecossistemas do Brasil, com os mais diversos resultados. Entretanto, comparado a outras regiões, a região do Sul do Brasil é pouco estudada, apesar de sua importância nas mudanças climáticas (BEHLING et al., 2001).

Devido à tendência de mudança no uso da terra no ecossistema dos campos sulinos, e sua conversão para a silvicultura, é importante avaliar o comportamento do carbono do solo nesse processo. Assim, diferenças entre valores de COT, COP, CAM, IMC e estoque de carbono, relacionadas à mudança de vegetação, podem fornecer informações sobre a sustentabilidade ambiental e sobre a qualidade do solo em sistemas naturais e plantados, permitindo correções nas estratégias de uso e de manejo adotadas.



### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

As áreas estudadas localizam-se no município de São Francisco de Paula/RS, junto à Floresta Nacional (FLONA), no nordeste do estado do Rio Grande do Sul, na região fisiográfica dos Campos de Cima da Serra, entre as coordenadas 29°24' e 29°27'S e 50°22' e 50°25'W.

O clima da região é do tipo mesotérmico úmido "Cfb", segundo Köppen (MORENO, 1961). A temperatura média anual é de aproximadamente 14,5 °C e a precipitação média anual é de 2.252 mm. Chove regularmente todos os meses do ano e as chuvas mais intensas ocorrem durante a primavera e o verão. É frequente a formação de geada e, mais eventualmente, queda de neve. Toda a região está sujeita a frequentes e intensos nevoeiros e os ventos predominantes são E/SE/NE (NIMER, 1990; FERNANDES e BACKES, 1998). O solo é caracterizado como Cambissolo Húmico Alumínico, desenvolvido a partir de rochas extrusivas básicas (basalto). Esses solos são fortemente ácidos, com saturação e soma de bases baixa e teores altos de alumínio trocável e matéria orgânica, o que gera uma limitação de uso desses solos devido à elevada acidez e aos altos teores de alumínio trocável (STRECK et al., 2002). De acordo com análise granulométrica realizada, o solo foi classificado com textura franco argilosa (Tabela 1).

Tabela 1 – Granulometria do Cambissolo Húmico na camada de 0-20 cm, em diferentes usos do solo em São Francisco de Paula, RS.

Uso do solo	Profundidade	Areia	Argila	Silte
	---cm---		---%---	
Campo nativo	0-05	34	27	39
	05-10	32	33	35
	10-20	29	34	37
Regeneração	0-05	32	33	35
	05-10	30	34	36
	10-20	25	36	39
Mata nativa	0-05	32	33	35
	05-10	26	34	40
	10-20	25	36	39
Eucalipto	0-05	32	33	35
	05-10	24	38	38
	10-20	20	40	40
Pinus	0-05	25	35	39
	05-10	24	36	39
	10-20	21	40	39

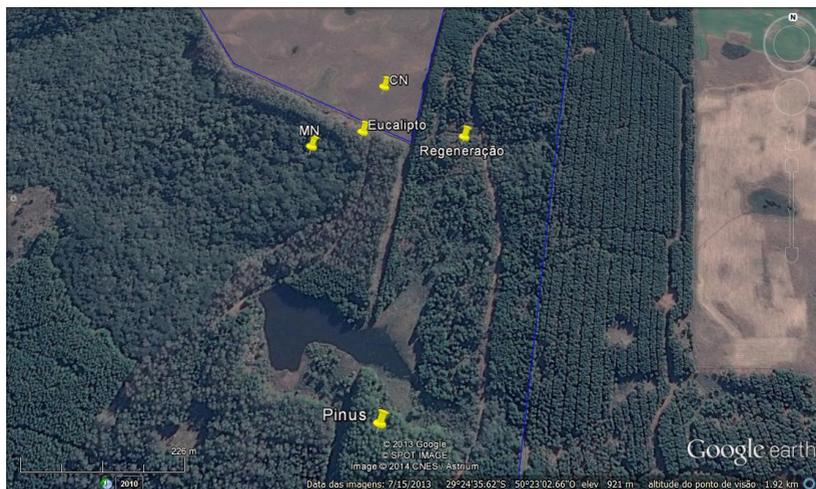
Fonte: produção do próprio autor. Granulometria realizada pelo método da pipeta por Day (1965) e Gee & Bauder (1986).

A cobertura vegetal que ocorre naturalmente na região é formada principalmente por vegetação campestre com Floresta Ombrófila Mista em galeria (BEHLING et al., 2001).

As áreas analisadas foram campo e floresta naturais, florestas plantadas com espécies exóticas (pinus e eucalipto) em área de campo nativo, e sucessão natural, a seguir descritas, próximas entre si, tendo o pinus a maior distância entre elas (Figura 1). Estas áreas foram escolhidas utilizando como critérios a proximidade entre elas, o histórico de transformação do campo nativo, a presença de área remanescente de campo e mata nativos, e por estarem sob a mesma classe de solo. Foi realizada caracterização prévia do solo para verificar condições edáficas e de relevo semelhantes entre as áreas, com análise

visual da variação de cor em profundidade, e medição de profundidades do solo, ambos utilizando trado holandês. Estas informações permitiram a comparação dos resultados finais das áreas, minimizando possíveis variações iniciais.

Figura 1 – Imagem por satélite das áreas de estudo, na Floresta Nacional São Francisco de Paula.



Fonte: Google Earth, 2013.

Campo nativo (CN): A principal cobertura destes campos é constituída pelo capim caninha (*Andropogus lateralis*), espécie dominante e característica da área, e pode apresentar outras espécies de gramíneas e leguminosas (BOLDRINI, 1997). As outras espécies não foram identificadas, apenas *A. lateralis*. Em níveis médios a altos de oferta de forragem, é definida uma típica estrutura em duplo estrato, ou seja, um estrato inferior formado por espécies de porte baixo, estoloníferas e/ou rizomatosas e um estrato superior formado por espécies cespitosas, como *A. lateralis* (NABINGER et. al, 2009). A área foi queimada a cada dois anos até 2006 e a partir de então não é mais queimada, apenas pastejada por gado, com a presença de 0,3 animais ha<sup>-1</sup>. A vegetação tinha altura de 30 a 50 cm durante a coleta de solo. Esta área é remanescente da área de campo que foi transformada ao longo do tempo, por plantios florestais ou área de campo em abandono, como será visto adiante.

Mata nativa (MN): A mata nativa constitui de um fragmento da Floresta Ombrófila Mista, que antes da implantação do pinus e eucalipto, intercalava-se naturalmente com a vegetação de campo, formando a paisagem típica de mosaicos da região. Esta floresta é caracterizada com base em Sonego et al. (2007), que encontrou maior densidade relativa para as espécies *Araucaria angustifolia*, *Casearia decandra*, *Blepharocalyx salicifolius*, *Sebastiania brasiliensis*, *Ilex paraguariensis* e *Myrceugenia mesomischa*. A vegetação sofreu interferência do gado até o ano de 1990, o que não ocorre mais desde então.

Pinus (P49): O plantio da floresta ocorreu em 1963 em 10 ha de área de campo nativo, com espaçamento de 1,5 x 2,0 m, tendo atualmente um volume de 428 m<sup>3</sup>/ha com área basal de 31,3 m<sup>2</sup>/ha e 1634 árvores/ha. Foram realizados quatro desbastes seletivos, sendo o último em 2001, e os resíduos permaneceram na superfície do solo após os desbastes, sem queima.

Eucalipto (E21): O plantio ocorreu em 1991, em 15 ha de campo nativo com espaçamento de 2 x 2,5 m, e apresenta atualmente um volume de 335 m<sup>3</sup>/ha, sem desbastes até então.

Para ambos florestamentos, na implantação dos povoamentos não foi realizado o preparo do solo, nem a adubação. As mudas foram plantadas na cova de forma manual, com a realização de coroamento e combate a formiga.

Área em regeneração (R22): Vegetação natural de capoeirão reestabelecida a partir de 1990 em área de campo nativo, em processo de sucessão natural, sem uso da queima e sem pastejo de gado. Pode ser notada a presença de muitos arbustos do gênero *Baccharis*. Atualmente recebe interferência do pastejo eventual de cavalos.

## 3.2 AMOSTRAGENS E AVALIAÇÕES

O solo foi coletado em julho de 2012, em amostras deformadas nas camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm com trado holandês, em dois transectos com quatro pontos de coleta equidistantes de 15 m, tendo oito amostras por profundidade, em cada uso do solo, com oito sub-amostras cada um. Em cada ponto foram coletadas amostras indeformadas para determinação da densidade do solo, utilizando anel volumétrico. As avaliações realizadas foram densidade do solo, carbono orgânico total, carbono orgânico particulado, estoque de carbono, análise granulométrica e análises químicas.

As amostras coletadas para a densidade foram secas em estufa a 105 °C por 24 horas e determinadas pelo método do anel volumétrico (EMBRAPA, 1997). Para mesma classe de solo, a variação da densidade é influenciada por fatores como uso e manejo do solo e pelo teor de matéria orgânica (CARVALHO et al., 1999). Os valores de densidade foram utilizados como base para o cálculo do estoque de carbono (Tabela 2).

Tabela 2 – Densidade do solo em  $\text{g cm}^{-3}$  em diferentes usos do solo em São Francisco de Paula, RS.

Uso do solo	Camadas (cm)			Média
	0-5	5-10	10-20	
Campo nativo	0,797	0,858	0,920	0,858
Regeneração	0,799	0,906	0,937	0,881
Mata nativa	0,807	0,937	0,922	0,889
Eucalipto	0,941	1,107	1,118	1,055
Pinus	1,005	1,086	1,151	1,080

Fonte: produção do próprio autor.

O carbono orgânico total foi analisado pelo método de combustão úmida, conforme Tedesco et al. (1995), com oxidação com dicromato de potássio, ácido sulfúrico, e determinação por titulação. Para separação do carbono particulado (COP) do associado aos minerais (CAM) foi realizado fracionamento do solo com agitação de 20 gramas de solo com hexametáfosfato de sódio por 16 horas, seguida de lavagem e separação em peneira de 53  $\mu\text{m}$ , conforme metodologia descrita por Cambardella e Elliott (1992). A fração particulada foi seca em estufa a 60°C e moídas em gral de porcelana para realizar análise de carbono pelo método já descrito. A partir da diferença entre COT e COP, foi obtido o CAM.

O estoque de C orgânico do solo foi calculado pelo método de massa equivalente, baseado em Guareschi et al. (2012), através da fórmula: Estoque de COT =  $\sum C_{ti} + [M_{tn} - (\sum M_{ti} - \sum M_{Si})] C_{Tn}$ , onde  $\sum C_{ti}$  é o somatório do carbono da primeira à penúltima camada ( $n^{-1}$ ) no perfil avaliado ( $\text{Mg ha}^{-1}$ );  $\sum M_{Si}$  é o somatório da massa do solo da primeira à última camada no perfil avaliado ( $\text{Mg ha}^{-1}$ );  $\sum M_{ti}$  é o somatório da massa do solo da primeira à última camada no perfil de referência ( $\text{Mg ha}^{-1}$ );  $M_{tn}$  é a massa do solo na última camada do perfil avaliado ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ).

<sup>1</sup>);  $C_T$  é a concentração de carbono na última camada do perfil avaliado ( $\text{Mg de C Mg}^{-1}$  de solo). Para o presente estudo foram consideradas, como referência, as massas de solo das camadas correspondentes ao campo nativo (CN). O índice de manejo de carbono (IMC) foi obtido de acordo com a fórmula:  $\text{IMC} = \text{IEC} \times \text{IL} \times 100$ , onde IEC representa índice de eficiência do carbono ( $\text{IEC} = \text{COT}_{\text{uso do solo}} / \text{COT}_{\text{CN}}$ ) e IL o índice de labilidade ( $\text{IL} = \text{L}_{\text{uso do solo}} / \text{L}_{\text{CN}}$ ) e L a labilidade do carbono ( $\text{L} = \text{COPu}_{\text{so do solo}} / \text{CAM}_{\text{uso do solo}}$ ) (VIEIRA et al., 2007).

A análise granulométrica foi determinada pelo método da pipeta conforme descrito por Day (1965) e Gee & Bauder (1986), com dispersão de 50 gramas de terra fina seca ao ar (TFSA) em 70 mL de água e 10 mL de NaOH 1N e 4 h de agitação mecânica em agitador horizontal.

Os atributos químicos do solo analisados foram pH em água, pH em  $\text{CaCl}_2$ , alumínio, cálcio, magnésio e potássio, segundo metodologia de Tedesco et al. (1995).

### 3.3 ANÁLISE DOS DADOS

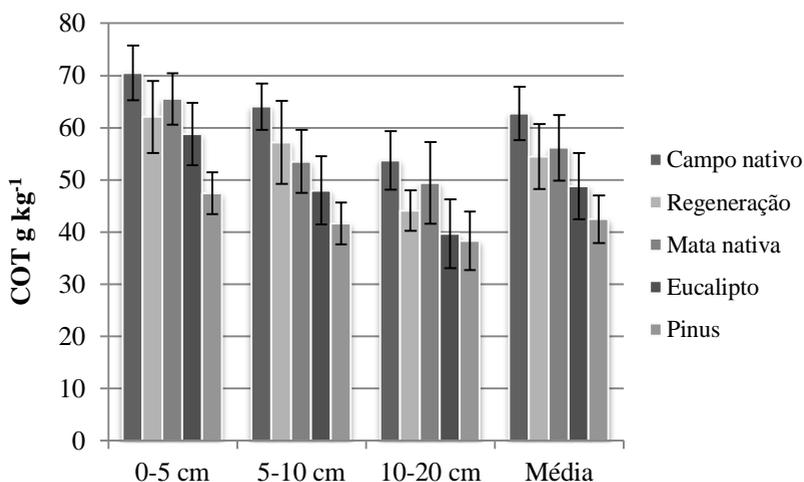
A comparação dos dados obtidos foi realizada usando o intervalo de confiança (95 %). Foram comparadas cada camada individualmente.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 CARBONO ORGÂNICO TOTAL DO SOLO

O teor de COT variou de 38,3 a 70,5 g kg<sup>-1</sup> nas camadas avaliadas do solo sob diferentes vegetações (Figura 2). Foi verificado decréscimo nos teores de COT em profundidade em todos os usos do solo, e menor variação destes valores conforme aumento da profundidade, entre as áreas avaliadas, o que pode ser atribuído a maior adição de resíduos na superfície do solo bem como pela natureza superficial das raízes da maioria dos vegetais (MORAES et al., 2012).

Figura 2 – Teores de carbono orgânico total (COT) em diferentes tipos de uso do solo, em São Francisco de Paula, RS.



Fonte: produção do próprio autor. As barras indicam o intervalo de confiança (95 %). As médias são estatisticamente diferentes quando não ocorre sobreposição das barras.

As região dos Campos de Cima da Serra, os solos sob vegetação nativa apresentam alta capacidade de acúmulo de carbono, atribuída à alta saturação por alumínio do solo e baixa temperatura, neste ambiente de altitude (SILVA et al., 2008). Concordando com este fato, o CN apresentou alto valor de COT na primeira camada, com 70,5 g kg<sup>-1</sup>, e

64,1 e 53,8 g kg<sup>-1</sup> na segunda e última camada do solo, respectivamente. A MN apresentou valores altos de COT, de forma semelhante ao CN, com média de 56,2 g kg<sup>-1</sup>. Na área R22 foram verificados valores de COT próximos aos da MN, com média de 54,5 g kg<sup>-1</sup>, e diferiu do CN apenas na última camada.

Em relação aos plantios florestais realizados em área de campo nativo, P49 apresentou o menor teor de COT na primeira camada, com 47,4 g kg<sup>-1</sup>, o que foi 33% inferior ao CN (área de campo remanescente), e não diferiu do E21 nas demais camadas do solo. No geral, estes cultivos apresentaram baixos teores de COT, com médias de 42,5 e 48,8 g kg<sup>-1</sup>, o que representou diferença de 32 e 22%, respectivamente, em relação à média da área CN.

Para entender a diferença entre os valores de COT do solo sob CN em relação aos plantios E21 e P49, e que sugerem uma possível diminuição de C após substituição do campo nativo, é preciso analisar uma série de aspectos próprios aos ambientes dessas vegetações e ao manejo delas. Inicialmente, a interferência realizada em área natural para implementar uma cultura, seja agrícola ou florestal, favorece a quebra dos agregados e a conseqüente liberação do C orgânico que estava protegido nos macroagregados, tornando-o então sujeito à perda por oxidação (LOSS et al., 2009). Após diminuição da matéria orgânica original do solo e de seu C, a mudança de vegetação sugere declínio inicial da produção de serapilheira e mudanças na composição qualitativa da mesma, que podem aumentar ou diminuir o teor de MOS ao longo do cultivo, uma vez que tecidos com maiores percentuais de celulose, hemicelulose e lignina são mais resistentes à decomposição do que tecidos mais pobres nesses materiais (SILVA et al., 2009). No entanto, a perda de C pela quebra de agregados no E21 e P49 provavelmente foi baixa, pois o plantio destes foi realizado manualmente e com pouca interferência, tendo maior importância as perdas relacionadas a mudança de vegetação.

A alteração de vegetação de uma área também pode transformar propriedades físicas do solo, como a umidade e temperatura. Estas propriedades influenciam na atividade biológica do solo, que atuam na decomposição da serapilheira e em conseqüência, no ganho ou perda de C orgânico do solo. Isto acontece pois a ciclagem de nutrientes e C é conseqüência da atividade microbiana, sendo a respiração microbiana um atributo bioquímico de alta sensibilidade para captar alterações ocorridas no ambiente. No entanto esta é influenciada por diversos fatores no solo, na maioria sensíveis à mudança de vegetação, tais como:

a umidade, a temperatura, a estrutura, a disponibilidade de nutrientes, a textura, a relação C/N, a presença de resíduos orgânicos, dentre outros (CARVALHO, 2005). A importância dos microrganismos também está relacionada com o efeito adesivo de polissacarídeos extracelulares provindos de hifas e de bactérias, que aumentam a resistência de agregados, e assim diminuem a destruição destes (GUGGENBERGER et al., 1999).

Levando em consideração estes aspectos na transformação do solo de campo nativo para o pinus, que ocorreu no P49, sendo utilizada a área CN como comparativo por se tratar de área de campo remanescente, pode-se destacar uma série de contrastes entre estes ambientes. O campo, por ser um ecossistema aberto, cujas espécies vegetais características são predominantemente de hábitos rasteiro e herbáceo e assim tendo ausência de sombreamento, possui tendência de maior produção de biomassa pelas gramíneas e, provavelmente, maior deposição de serapilheira (FREITAS et al., 2013), tendo esta menor relação C/N e menor conteúdo de C aromático em relação à do pinus, o que a torna mais facilmente decomponível (WIESMEIER et al., 2009). Em contraste, no pinus as árvores possuem estrato superior que tende a ser fechado e a dificultar a passagem de luz, formando um micro-clima no sub-bosque, devido à menor velocidade do vento e radiação solar, que diminuem a evaporação da água do solo, com consequente aumento na umidade e diminuição na amplitude térmica do solo (SOARES et al., 2009). Estas condições podem levar a uma decomposição mais lenta dos resíduos adicionados ao solo (OSAKI, 2008), o que pode ter acontecido no plantio P49, em comparação às condições do solo sob CN, auxiliando a justificar a diferença dos teores de COT. Ademais, a espessa camada de serapilheira do pinus formada na superfície constitui uma proteção eficaz contra as oscilações térmicas e de umidade, assim tamponando as condições edafoclimáticas no nível do horizonte A. Essas condições podem ter favorecido a biota do solo no processo de mineralização da MOS residual (aquela do campo anterior ao plantio P49), diminuindo-a gradativamente (CHAVES e CORREA, 2005).

Tal acúmulo de serapilheira que ocorre na superfície do solo após crescimento e estabelecimento do pinus está relacionado a fatores como o baixo teor de nutrientes encontrados na mesma, à composição de suas acículas, sendo de difícil e lenta decomposição em função da alta relação C/N e compostos fenólicos e ligninas, que podem alterar direta e negativamente o crescimento e a disponibilidade do C à ação da microbiota (CARVALHO et al., 2008). Isto resulta em menor

quantidade de microrganismos no solo do pinus em relação ao de áreas naturais, exceto organismos celulolíticos (OSAKI, 2008). Outro efeito do pinus que pode ser destacado é a alelopatia, ou seja, substâncias químicas liberadas durante a decomposição das acículas, com ação inibitória no desenvolvimento de microrganismos, diminuindo assim a formação e incorporação de C no solo (SARTOR et al., 2009). Assim, após implantação do plantio P49 e declínio inicial na MOS residual e na produção de serapilheira, a deposição e contribuição desta ao longo do amadurecimento da floresta para o retorno de carbono ao solo possivelmente foi baixa, em comparação à vegetação original, e o que pode ter influenciado no conteúdo de C, gerando a diferença de COT encontrada entre P49 e CN.

Em contraste, diferente resultado foi relatado por Baretta et al. (2005), que encontraram valores de COT semelhantes na profundidade de 0 a 5 cm, entre campo nativo, sem queima há 50 anos e com queima tradicional, e monocultivo de pinus com 8 anos, na localidade de Coxilha Rica, em Lages, SC. Embora a plantação de pinus não tenha afetado o teor de COT após 8 anos, os autores verificaram aumentos nos valores de quociente metabólico microbiano deste plantio, e que poderia refletir-se em decréscimos futuros nos estoques e na qualidade da MOS, comprometendo a ciclagem de nutrientes.

De forma semelhante ao pinus, no eucalipto também há redução da transmissão de luz ao sub-bosque do sistema, devido ao sombreamento imposto pelas árvores e que gera um microclima mais úmido e com menor variação térmica em relação ao exterior (ANDRADE et al., 2001). Na serapilheira, ocorre baixo coeficiente de decomposição, em função do alto teor de lignina e relação C/N (VIERA et al., 2013), fazendo com que o acúmulo desta apresente tendência a aumentar conforme aumento da idade do plantio (WITSCHORECK e SCHUMACHER, 2000). Além disso, várias espécies de eucalipto produzem substâncias alelopáticas, capazes de interferir na atividade microbiana do solo (MOURA et al., 1996). Assim, estas características relacionados ao eucalipto sugerem que no plantio E21, assim como no P49, durante o período entre a retirada do campo para o plantio, até o desenvolvimento da floresta em estágio capaz de produzir serapilheira, pode ter ocorrido consumo da MOS residual, e com o desenvolvimento da floresta e a deposição dos resíduos, baixa decomposição da serapilheira e conseqüentemente menor retorno de C orgânico ao solo, o que pode ser utilizado como subsídio para entender o menor teor de COT do plantio E21 em relação ao CN.

Outro aspecto a ser levado em consideração na compreensão da dinâmica desses ambientes, são as diferenças entre o sistema radicular de P49 e E21 em relação ao CN. No ambiente de campo, há alta densidade de raízes finas, principalmente próximo à superfície, que geram alta formação de exsudatos radiculares importantes no processo de formação de agregados e acumulação e proteção física do C. Em contraste, as raízes de pinus e eucalipto são mais grossas e entram mais profundamente no solo, com um tempo de ciclagem mais longo em relação ao campo (DICK et al., 2011).

Resultado conforme ao verificado neste trabalho foi relatado por Silva et al. (2009), ao avaliar o impacto de plantios florestais em um Latossolo Vermelho-Amarelo de cerrado, em amostras de solo de 0 a 10 cm, onde encontraram menores teores de matéria orgânica sob pinus com 21 anos e eucalipto com 24 anos, ambos adubados, apresentando 30 e 29 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente, em comparação a área natural de cerrado, com 39 g kg<sup>-1</sup>, o que representou redução de 23 e 26%, respectivamente em relação ao cerrado. Assim, esses cultivos não se mostraram eficientes para aumentar o teor de carbono no solo, mesmo numa condição climática como a do cerrado.

Nos Campos de Cima da Serra, mesma região fisiográfica do presente trabalho, estudos sobre o efeito de plantios de pinus no C do solo tem relatado comportamento semelhante, como foi observado nos estudos de Dick et al. (2011), Tomasi et al. (2012) e Wiesmeier et al. (2009).

Dick et al. (2011), ao avaliar o efeito da plantação de pinus, em camadas do solo de 0 a 15 cm, com idades de 8 e 30 anos, no campo nativo sem queima por 22 anos com dois animais por ha, em Neossolo Litólico, constataram que o solo sob pastagem apresentou maior teor de MOS, com média ponderada de COT de 89 g kg<sup>-1</sup>, comparativamente ao solo sob pinus, que apresentou médias de 68 e 54 g kg<sup>-1</sup>, nas idades de 8 e 30 anos, respectivamente, refletindo a maior taxa de decomposição de resíduos subsuperficiais em ambiente de campo. A maior diferença de C foi relatada na camada de 0 a 5 cm no campo, com 137 g kg<sup>-1</sup>, contrastando com o pinus de 8 e 30 anos, que apresentaram respectivamente 74 e 84 g kg<sup>-1</sup>. Pode-se notar que estes teores, apesar de corresponderem à profundidade de 15 cm do solo, apresentam-se muito superiores em comparação aos valores encontrados no presente trabalho em uma profundidade maior, de 20 cm. Além disso, pode ser observado que o pinus com maior idade apresentou menor teor de C em relação ao de idade mais recente, o que sugere uma possível relação entre a idade e

o armazenamento de C ao longo do tempo de cultivo. Em estudo realizado em mesma área e solo, na profundidade de 0 a 45 cm, Wiesmeier et al. (2009) não somente observaram menor conteúdo de carbono resultante da conversão do campo (com queima a cada dois anos) para plantação de pinus, como também encontraram relação desta redução com a idade do florestamento, já que foram observadas diferenças, em relação ao campo, de 28 e 43% do teor de C após a implantação do pinus em 8 e 30 anos, respectivamente.

Tomasi et al. (2012), em diferentes usos de um Latossolo Vermelho, também encontraram teores de COT no pinus (18 anos), inferiores aos observados na floresta nativa e no campo nativo (ambiente original do pinus e com queima anual), nas cinco profundidades avaliadas de 0 a 30 cm, apresentando médias ponderadas de 23,2, 49,4 g e 36,4 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente. A profundidade de 0 a 5 cm do solo apresentou altos teores de C, com 54,1, 164,5 e 97,1 g kg<sup>-1</sup>, para os respectivos usos do solo. Pode-se notar a partir destes resultados, que apesar dos altos teores de C encontrados na primeira camada, abaixo desta o armazenamento foi inferior, quando comparado aos valores relatados no presente trabalho nas profundidades abaixo de 5 cm para o CN, P49 e MN.

Dessa forma, quando ocorre a substituição do sistema campestre por pinus, fica nítida a tendência que existe em acelerar a decomposição da matéria orgânica do solo e a redução da entrada de carbono neste plantio, em comparação com os solos das áreas nativas CN e MN, assim como foi observado nos estudos citados, na região Campos de Cima da Serra.

Embora pertençam à mesma região fisiográfica, o contraste de valores altos de conteúdo de C, relatados por estes trabalhos, em comparação aos menores teores que foram aqui apresentados, podem estar relacionados a diferenças das espécies de gramíneas, das características dos solos, e de manejo das pastagens e do pinus. A característica que parece ter a maior influência, relacionada aos solos, é o teor de argila destes, por possuir relação direta com o teor de MOS e em consequência com o teor de C (TOGNON et al., 1998). Como foi visto, o solo da área de estudo apresentou textura franco-argilosa (Tabela 1). Já o Neossolo, como foi relatado por Wiesmeier et al. (2009), apresentou teor de argila entre 47 e 58% nos usos avaliados, revelando uma textura mais argilosa, o que pode auxiliar a explicar a diferença de C entre estes solos, pois quanto maior o teor de argila, maior é a área superficial específica (ASE) para interação coloidal e,

consequentemente, para a estabilização da MOS por maior período de tempo.

Fato que pode ser notado, quando colocado estes trabalhos citados de Dick et al. (2011), Tomasi et al. (2012) e Wiesmeier et al. (2009) em comparação, é que tanto na presença ou ausência de queima nas pastagens, o teor de C das áreas de campo foi alto, e superior ao pinus, não demonstrando ser a queima um mecanismo determinante nesse sentido, nas condições dos Campos de Cima da Serra. Em contraste, em São José dos Ausentes, também na mesma região fisiográfica, Potes et al. (2012) avaliaram três camadas na profundidade de 0 a 15 cm de um Neossolo e relataram que o campo sem queima há um ano obteve maiores teores de C, em relação ao campo sem queima há 22 anos, o qual atribuiu ao rápido consumo do compartimento lábil da MOS e menor aporte de resíduo após eliminação do fogo. Porém, no primeiro, a lotação era de 0,5 animal/ha, e neste último, de 2 animais/ha e incluía outros animais além do gado. Assim, a alta intensidade de pastejo do ambiente sem queima pode ter maior influência no teor de C do que a própria queima, pois ao consumir maior quantidade de forragem, impede o crescimento da parte aérea e, consequentemente, diminui o sistema radicular.

No entanto, vale ressaltar que o fogo e o superpastejo podem atuar como um distúrbio ecológico sobre o carbono orgânico do solo, sendo a magnitude deste efeito dependente da combinação e da intensidade de ambos os fatores. Além disso, a combustão incompleta da vegetação resulta na formação do chamado “black carbon”, que é constituído por carvão ou material de planta carbonizada e que, devido a sua relativa elevada aromaticidade, contribui para o aumento da recalcitrância da MOS (POTES et al., 2012). Devido à quantidade de variáveis, as conclusões sobre os efeitos do fogo na matéria orgânica são contraditórias, e são escassos os estudos na região dos Campos de Cima da Serra, RS (POTES, 2009).

Já na ausência de fogo e pastejo, os campos são sujeitos ao adensamento de arbustos e, quando próximos de vegetação florestal, à expansão florestal (MÜLLER et al. 2007). Assim, a proximidade dos valores de COT da área R22 e MN, demonstrou os efeitos da substituição gradual da vegetação na dinâmica do C, o que ocorreu após abandono da área de campo nativo. Isto acontece pois a substituição da vegetação de gramíneas do campo por arbustos da capoeira, além de mudanças quanto a deposição da serapilheira, gera mudanças locais próprias de ambiente, aumentando as condições de sombra e reduzindo a

concorrência das gramíneas, o que leva a uma condição de ambiente e vegetação intermediária a de pastagens e florestas (HOFFMANN, 1996; HOLL, 2002).

Em estudo realizado em Guarapuava, Paraná, Bini et al. (2013) encontraram para a floresta secundária com 13 anos, anteriormente cultivada com pinus por 40 anos e abandonada após queima acidental, teor de C orgânico similar ao solo da floresta nativa. Esta recuperação pode ser atribuída aos resíduos orgânicos diversificados de fácil degradação produzidos pelas espécies nativas, que permitem melhores condições para o estabelecimento de comunidades microbianas, já que estas desempenham importante papel na ciclagem do C.

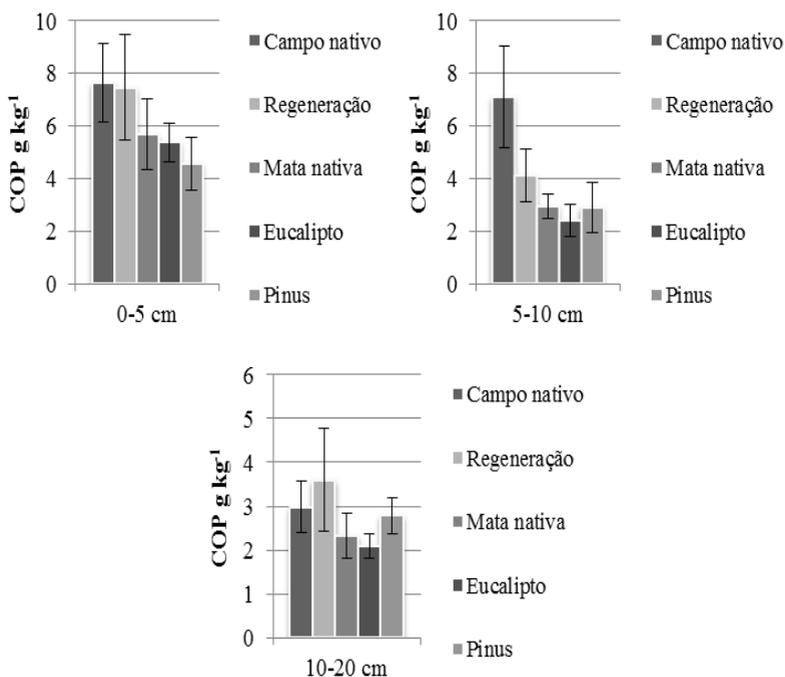
Já Fontana et al. (2011), ao avaliar os compartimentos da matéria orgânica do solo, na profundidade de 0 a 5 e 5 a 10 cm, em áreas com diferentes coberturas vegetais em Ubatuba, SP, encontraram menores teores de COT nas áreas de capoeira, independente da profundidade e estação do ano. Como a velocidade de recuperação de carbono orgânico depende do ecossistema em que tal área está inserida, há uma dificuldade na comparação de estudos realizados em diferentes ecossistemas (STÜRMER et al., 2011), e em especial ao campestre do Sul do Brasil, pois envolve variáveis relacionadas às queimadas, como velocidade, intensidade, tempo de ausência de queima, e a efeitos de borda.

## 4.2 CARBONO ORGÂNICO PARTICULADO

Os maiores teores de COP na primeira camada do solo avaliada ocorreram no solo sob CN, seguido por R22 e MN. Os plantios E21 e P49 apresentaram diferença em relação ao CN, tendo menores valores de COP que este (Figura 3). Na segunda camada do solo, exceto para o CN, os teores de COP diminuíram em torno da metade, em relação aos teores da camada superficial, o que ocorre possivelmente em função da menor participação da serapilheira em profundidade e menor contribuição de raízes finas em ambiente sob floresta, em comparação com a vegetação de campo (POTES et al., 2012). Na última camada do solo o valor de COP do CN apresentou uma brusca queda, em relação às camadas sobrejacentes, evidenciando a alta densidade de raízes finas e de rápido crescimento nos primeiros centímetros do solo de campo nativo, capazes de agrupar fisicamente as partículas de solo e, em conjunto com a liberação de exsudatos, estimulam a cimentação dessas partículas (macroagregados) e, conseqüentemente, o acúmulo de COP

(FERREIRA et al., 2012). Nesta camada os valores foram baixos, sendo que R22 e CN apresentaram os maiores teores de COP. Já P49 e MN tiveram valores intermediários e o plantio E21 apresentou menor teor de C desta fração em relação às áreas R22 e CN.

Figura 3 – Teores de carbono orgânico particulado (COP) em três profundidades de diferentes tipos de uso do solo, em São Francisco de Paula, RS.



Fonte: produção do próprio autor. As barras indicam o intervalo de confiança (95 %). As médias são estatisticamente diferentes quando não ocorre sobreposição das barras.

Para analisar as diferenças entre os teores de COP do solo das áreas avaliadas, além dos aspectos próprios de vegetação e de ambientes locais mencionados anteriormente, deve-se levar em consideração aspectos relacionados ao manejo de cada área, pois o COP é a fração mais influenciada pelo cultivo e manejo do solo, que determinam a

deposição de resíduos na superfície do solo, a ação de agentes temporários, como raízes e hifas de fungos, assim como a quantidade de C liberada por estes, e que tem relação com a formação de macroagregados e com a proteção física do C no interior destes (LOSS et al., 2011). Os resíduos podem ser depositados de forma natural ou a partir de desramas e desbastes, sendo o carbono decomposto na superfície, e incrementado ao solo a partir da superfície (BRUN, 2008).

Dessa forma, no CN após a interrupção da queima em 2006, o manejo era realizado apenas pelo pastejo, com intensidade de 0,3 cabeças de gado por ha, sendo esta considerada baixa, o que pode ter favorecido o bom desenvolvimento das gramíneas (constatada pela altura da vegetação durante a coleta) e produção de resíduos. Isto ocorre, pois quanto menor é a intensidade de pastejo, maior é o desenvolvimento da área foliar para captura da radiação solar, refletindo em maior crescimento vegetal, tanto da parte aérea quanto do sistema radicular, que devido à exsudação de compostos orgânicos, contribui no aumento de COP e proteção física deste. Comportamento contrário ocorre quando a intensidade de pastejo é alta, prejudicando a produção de resíduos pelas gramíneas, e o desenvolvimento das raízes e seu papel no acúmulo de C, assim como foi verificado por Souza et al. (2008), em estudo realizado na região fisiográfica do Planalto Médio do Rio Grande do Sul, em solo submetido a sistema de integração agricultura-pecuária, sob plantio direto com diferentes intensidades de pastejo. Além disso, os autores verificaram que a biomassa microbiana do solo é influenciada pela intensidade de pastejo, apresentando relação inversa com a intensidade de pastejo e relação direta com a massa de raízes, e assim na formação de COP.

Outro aspecto a ser analisado no solo sob CN é a ausência de queima no manejo das pastagens, que também pode ter contribuído na formação de COP, como foi constatado por Santana et al. (2013), em estudo realizado em André da Rocha, Rio Grande do Sul, onde encontraram para a pastagem nativa sem queima há 8 anos e com menor intensidade de pastejo, menor teor de C total e nas frações lábeis e estáveis, em comparação à pastagem sem queima há 41 anos, e pastagem nativa em solo com calcário e adubado, sem queima há 41 anos, mesmo estas tendo maior intensidade de pastejo, mostrando que a queima pode diminuir o C do solo. Estes fatores relacionados ao manejo do CN, somados às características e dinâmica do C neste ambiente comentadas anteriormente, em conjunto podem ter contribuído para os

altos valores de COP observados no CN, especialmente nas duas primeiras camadas do solo.

Assim, a diferença entre os valores de COP no CN e os plantios florestais P49 e E21, pode ser justificada pelas diferenças de sistema radicular, deposição, composição e velocidade de decomposição da serapilheira, como vistos anteriormente. Além disso, os baixos teores de COP encontrados no solo do E21 podem ser justificados em função do menor tempo de cultivo desta floresta em relação aos demais usos do solo avaliados, e ao fato de não ter sido realizado corte nesta, o que impediu retorno de carbono do solo além do que ocorre pela deposição normal de serapilheira.

Na área R22, situação onde o manejo do campo deixou de ser feito pela pastagem do gado e pela queima (responsáveis por impedir a expansão florestal em áreas campestres), o que favoreceu a mudança de vegetação da condição de gramíneas para cobertura de arbustos que formam a capoeira e assim nas condições de ambiente local, de deposição e composição da serapilheira na superfície, influenciando nos teores de COP, que se apresentou menor do que o CN na segunda camada do solo.

O menor valor de COP encontrado na MN em relação ao CN revela uma possível perturbação deste sistema natural nos últimos anos, causando desequilíbrio na produção de resíduos, no processo de transformação destes e na estabilização do COP. Possível justificativa para tal é o fato de esta área ser um pequeno fragmento de floresta de araucária isolado entre plantios de pinus e eucalipto, sujeito a perda da diversidade florística e da biota do solo, onde foi notada a presença de indivíduos invasores, como pinus. Dessa forma, a fragmentação de ecossistemas pode modificar os padrões de diversidade da fauna do solo em escala de habitat, ao alterar a quantidade e qualidade da serapilheira (RANTALAINEN et al., 2004), o que pode afetar a disponibilidade de C lábil. Além disso, havia a presença do gado nesta área até 1990.

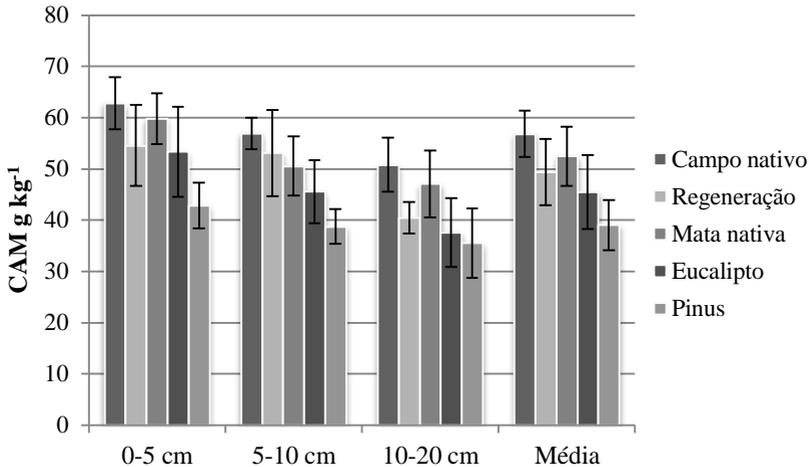
Nesse sentido, pode ser inferida a ação negativa exercida por plantações de florestas exóticas não só sobre campos nativos, mas também sobre o ecossistema de floresta de araucárias, que faz parte da paisagem nativa do nordeste do Rio Grande do Sul.

#### 4.3 CARBONO ORGÂNICO ASSOCIADO AOS MINERAIS

O CAM mostrou-se mais importante em termos de concentração no solo sob CN e MN, o que demonstra a capacidade dos

sistemas nativos em proteger o C, seguidos do solo da área R22, com as respectivas médias de 56,9, 52,5 e 49,4 g kg<sup>-1</sup>. O plantio E21 diferiu do CN, exceto na primeira camada do solo, com média de 45,5 g kg<sup>-1</sup>. Já P49 diferiu dos teores de CAM do CN em todas as profundidades avaliadas, com média de 39,1 g kg<sup>-1</sup> (Figura 4).

Figura 4 – Teores de carbono associado aos minerais (CAM) em diferentes tipos de uso do solo, em São Francisco de Paula, RS.



Fonte: produção do próprio autor. As barras indicam o intervalo de confiança (95 %). As médias são estatisticamente diferentes quando não ocorre sobreposição das barras.

Segundo Brun (2011), o menor teor de CAM encontrado em áreas plantadas com pinus de primeira rotação ocorre devido ao consumo de MOS após mudança de uso do solo e cultivo de pinus no decorrer do tempo, sendo este consumo maior que o retorno de MO via deposição de resíduos, o qual poderia ser revertido nas próximas rotações pelas entradas de carbono no sistema, pela fração particulada. Entretanto, foi observado que após 49 anos de plantio, a área P49 apresentou valores baixos de COP e diferenças significativas de CAM em relação às áreas nativas MN e CN. Assim, a deposição de resíduos no P49, de forma natural e a provinda dos desbastes realizados, pode não ter sido eficiente em manter a MOS protegida.

O CAM é a fração do C que apresenta ciclagem bem mais lenta, no que se refere à sua formação e decomposição, sendo altamente estável devido a sua interação com a fração mineral (proteção pela interação organomineral) e localização no interior de microagregados estáveis (proteção física), o que torna necessário um período maior para que a alteração dos sistemas de manejo tenha efeito no estoque de C desta fração (BAYER et al., 2004). Nas diferentes classes de solos representativas dos Campos de Cima da Serra, sob campo nativo, Silva et al. (2008) verificaram que a proteção química da MOS ocorre em grande parte devido à complexação com Al.

Dessa forma, para entender as diferenças de conteúdo de CAM entre áreas naturais e antropizadas, além dos aspectos quanto à mudança na composição e qualidade dos resíduos adicionados ao solo, é preciso analisar efeitos que a mudança da vegetação e de manejo no solo possam trazer na eficiência quanto a transformação destes resíduos, sua incorporação e estabilização da MOS no interior dos microagregados, ou na ruptura destes, expondo o C orgânico à oxidação. Inicialmente, a fauna do solo apresenta importante papel, pois os organismos maiores, chamados de macrofauna, atuam na ingestão, escavação e transporte de materiais no solo, influenciando na agregação do solo, na dinâmica da MOS e na composição e diversidade de outros organismos do solo, como os microrganismos (LAVELLE e SPAIN, 2001), que podem atuar na perda ou aumento da MOS, como visto anteriormente. No entanto, estes organismos tem grande sensibilidade à interferência no ambiente BARETTA et al., 2010).

Em comparação às vegetações de floresta de araucária e campo nativo, o plantio do pinus produz resíduos mais recalcitrantes (DICK et al., 2011) e altera o equilíbrio da fauna do solo afetando-a negativamente (CÓRDOVA et al., 2013). Com isso, a decomposição da serapilheira produzida pelo pinus é lenta, fazendo com que nas primeiras décadas deste plantio ocorra a degradação da MOS residual. Nos Campos de Cima da Serra, após 30 anos do plantio do pinus em campo nativo, Wiesmeier et al (2009) a partir de espectros de ressonância magnética nuclear de  $^{13}\text{C}$  com polarização cruzada e rotação no ângulo mágico (RMN-CPMAS de  $^{13}\text{C}$ ), verificou pequena contribuição dos resíduos do pinus na MOS, devido à alta recalcitrância das acículas produzidas por este plantio, que permanecem pouco modificadas, acumulando na superfície do solo. Devido à entrada desacelerada do material orgânico provindo do pinus, ocorreu então a diminuição da MOS residual no solo deste plantio, e assim declínio no armazenamento

de C. Dessa forma, ao longo do tempo, além de afetar a quantidade de MOS, o plantio do pinus afetou a qualidade desta, pois a proporção de estruturas quimicamente recalcitrantes e de grupos carboxílicos aumentou, enquanto a de grupos nitrogenados diminuiu (devido ao consumo dos microrganismos). Já no solo sob campo nativo, a MOS apresenta maior proporção de grupos menos decompostos, como carboidratos e estruturas de origem microbiana (DICK et al., 2011).

Assim, é possível que na área P49 tenha ocorrido o mesmo processo, devido ao consumo da MOS e das frações COP e CAM da área de campo nativo anterior ao plantio, e baixa contribuição e entrada de C pelos resíduos produzidos pelo P49, justificando os menores teores de CAM encontrados no P49 em relação ao do solo sob CN. Dessa forma mesmo que a MOS formada pelo pinus apresente a característica de proteção do C através de recalcitrância química, por outro lado os resultados encontrados sugerem que a proteção física e interação organomineral não foram eficientes na estabilização da MOS no solo sob P49. Cabe destacar também o papel da renovação periódica das raízes das gramíneas, que proporcionam incorporação de materiais orgânicos ao solo, além da proteção física que estas proporcionam à MOS, em comparação às raízes do pinus, que tem ciclagem mais lenta e são mais profundas. Já a floresta de araucária é formada por associação de plantas rasteiras e arbóreas, tendo maior diversidade de raízes em comparação ao ambiente de pinus (TOMASI et al., 2012).

Embora o plantio de eucalipto também apresente serapilheira mais recalcitrante, com baixo coeficiente de decomposição e com efeito antimicrobiano (VIERA et al., 2013), em comparação à serapilheira do campo, foi observado que a diferença dos teores de CAM entre E21 e CN foi menor que a diferença notada entre P49 e CN. Uma possível razão para tal resultado é a diferença do tempo de substituição do campo nativo, que foi de 21 anos no E21 e 49 anos no P49. Além disso, foi verificado por Silva et al. (2009) que embora as áreas de eucalipto e pinus tenham apresentado teores semelhantes de carbono da biomassa microbiana, o pinus apresentou menores níveis de atividade enzimática (fosfatase ácida, arilsulfatase e beta-glucosidase) em relação ao eucalipto, o que indica mudanças na atividade e estrutura funcional (taxonômica e fisiológica) da microbiota entre as áreas, responsáveis em converter os resíduos orgânicos do solo em biomassa, dificultando dessa forma etapas do processo de formação da MOS.

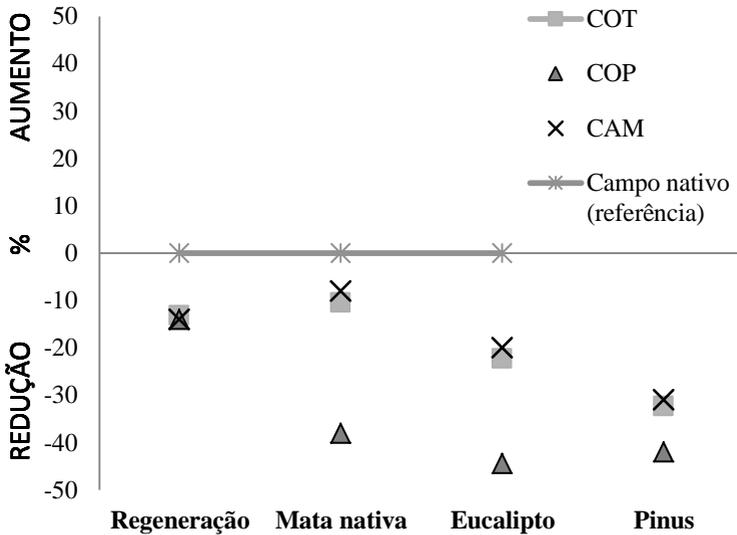
Para esclarecer qual fração da MOS foi mais afetada pelo uso do solo, foram apresentadas as diferenças percentuais dos teores de

carbono total e das diferentes frações, nas camadas de 0 a 20 cm dos diferentes sistemas de uso do solo (Figura 5). Os atributos do solo na área de CN foram utilizados como referência, por se tratar da área de campo próxima que permaneceu como tal. As comparações foram realizadas levando em conta a possibilidade de que as áreas de campo alteradas e/ou cultivadas ao longo do tempo (P49, R22 e E21) apresentariam condições semelhantes ao CN caso tivessem permanecido como área de campo nativo, assim como esta área.

Dessa forma, as variações notadas no CAM em relação ao sistema referência demonstra que possivelmente o C orgânico associado às frações finas do solo está sujeito a perdas devido à substituição do campo para plantios florestais, especialmente no P49, que teve diferença de 31%. Entretanto, esta fração apresentou menor variação em comparação ao COP, uma vez que constitui fração mais estável do solo.

A área R22 não apresentou diferença significativa em relação ao CN na maioria das camadas, e por isso não foi indicada qual a fração mais sensível para este uso. Já nos plantios florestais, dentre os atributos avaliados, as maiores alterações se apresentaram no COP, comparativamente aos demais, apontando a fração lábil como um indicador mais sensível para identificar alterações na MOS, frente à transformação de áreas naturais pela silvicultura.

Figura 5 – Variação nos teores de frações de carbono em eucalipto, pinus e área em regeneração, em função da transformação do campo, tendo o campo nativo e a mata nativa como referências para comparação.



Fonte: produção do próprio autor

Fato a ser observado nas áreas E21 e MN é a grande diferença entre seus valores de CAM e COP, demonstrando menor disponibilidade de C lábil, e que pode influenciar no estoque de C em longo prazo, pois a manutenção do conteúdo de C do solo é dependente da entrada deste elemento através do COP e de sua estabilização e proteção nos agregados. Além disso, a redução do teor de COP devido aos efeitos negativos do cultivo ao solo faz com que os microrganismos utilizem compostos orgânicos complexados às superfícies das frações silte e argila, resultando em decréscimo do CAM (BLAIR et al., 1998; SILVA et al., 2006).

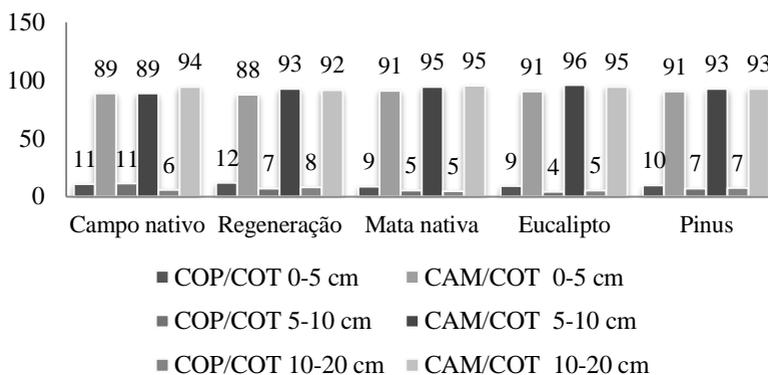
A proporção de COP e CAM demonstra a contribuição e importância destas frações para o COT dos solos. Em todos os tipos de uso do solo, foi verificado que entre 88 e 96% do COT é composto de CAM, o que indica a predominância de acúmulo de compostos orgânicos de maior estabilidade química, principalmente nas camadas subsuperficiais, e a importância deste solo como reserva de C (Figura 6).

Por outro lado, a proporção de COP variou de 12 a 4% do COT, e foi afetada pelo uso do solo, o que pode afetar a qualidade química do solo, já que esta fração é importante compartimento por ser considerada

fonte de energia para a biota do solo e por atuar como fonte de nutrientes às plantas (GREGORICH e JANSEN, 1996).

As áreas R22 e CN tiveram as maiores proporções COP/COT em relação aos demais usos, o que pode ser explicado pelos maiores teores da fração particulada do C apresentado por estes sistemas, e que caracteriza uma maior deposição de resíduos vegetais no solo e maior retorno de C na fração lábil. Já as áreas E21 e MN apresentaram condição oposta, com as menores proporções de COP, e maiores de CAM.

Figura 6 – Proporções de carbono orgânico particulado (COP) e carbono associado aos minerais (CAM) em porcentagem, nas três camadas avaliadas dos diferentes usos do solo, em São Francisco de Paula, RS.



Fonte: produção do próprio autor.

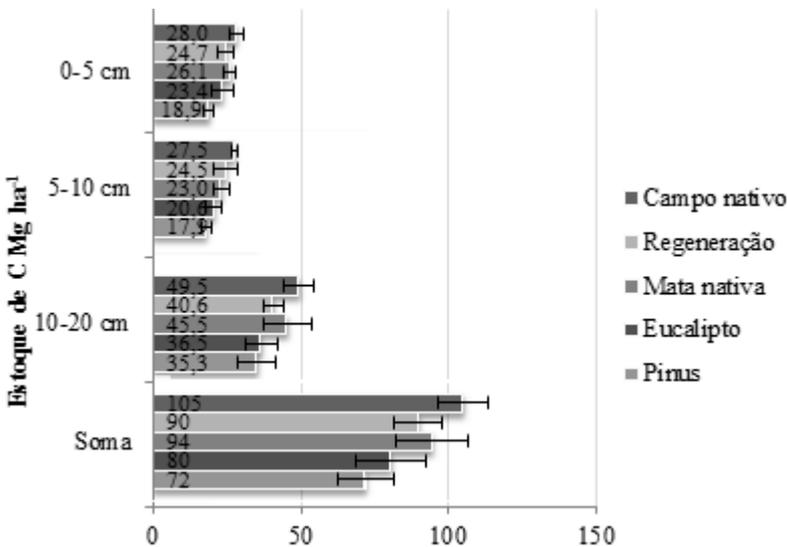
#### 4.4 ESTOQUE DE CARBONO

A soma dos estoques de COT das camadas estudadas variou de 72 a 105 Mg ha<sup>-1</sup> entre as áreas amostradas e aumentou em profundidade (Figura 7). Nas camadas inferiores, o acúmulo de C pode ser resultante de processos de translocação de MOS e sua sorção nos minerais, como também de decomposição de raízes (DALMOLIN et al., 2006).

O solo sob CN apresentou estoques superiores às demais áreas, exceto em relação à MN e R22, em todas as camadas, totalizando 105 Mg ha<sup>-1</sup> na camada 0 a 20 cm, demonstrando o potencial do sistema campestre nativo do Sul do Brasil em armazenar carbono. O alto

armazenamento de C em campos bem manejados do Sul do Brasil foi relacionado por Pillar et al. (2012) a alta produção primária líquida das pastagens, que gera maior entrada de C superficial e subsuperficial no solo. Além disso, esses resultados podem ser atribuídos ao sistema radicular mais desenvolvido e bem distribuído das gramíneas, o que favorece a elevada deposição de C ao solo pelas raízes (RANGEL e SILVA, 2007).

Figura 7 – Estoques ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) de carbono em diferentes tipos de uso do solo, em São Francisco de Paula, RS.

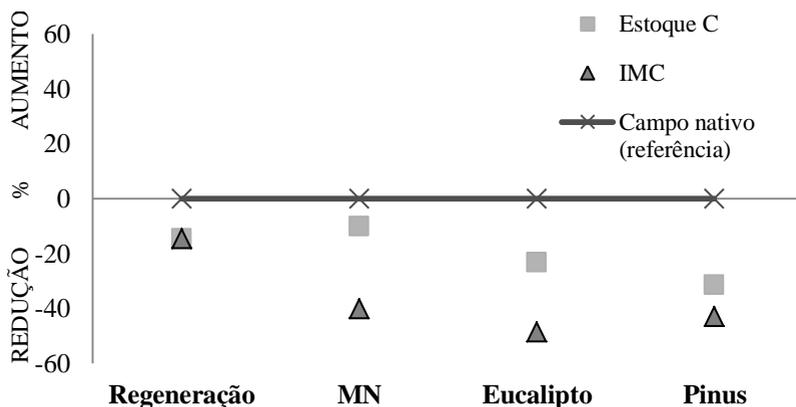


Fonte: produção do próprio autor. As barras indicam o intervalo de confiança (95 %). As médias são estatisticamente diferentes quando não ocorre sobreposição das barras.

A variação dos estoques de C em relação ao sistema referência dá uma estimativa do incremento ou redução do armazenamento de C do solo. Os atributos do solo na área CN foram utilizados como referência. As comparações foram realizadas levando em conta a possibilidade de que as áreas de campo alteradas e cultivadas ao longo do tempo (P49, R22 e E21) apresentariam condições semelhantes ao CN caso tivessem permanecido como área de campo nativo, assim como esta área. Nesse sentido, os plantios florestais E21 e P49 apresentaram valores menores

de estoque de C em relação ao CN, o que indica possível perda de C, principalmente das camadas superficiais dos solos quando estes são submetidos a diferentes sistemas de uso e manejo. Em comparação aos sistemas naturais, as diferenças nos estoques de C das áreas avaliadas em relação ao CN na profundidade de 0 a 20 cm foram de 23 e 31 % para o E21 e P49, respectivamente. Já a diferença encontrada entre o estoque de C da MN foram valores 15 e 24 % abaixo desta (Figura 8) O estoque de C da área R22 não apresentou diferença significativa em relação ao CN, e por isso a diferença de valores entre estes não foi considerada.

Figura 8 – Variação nos estoques de C e índice de manejo de C (IMC) nos sistemas eucalipto, pinus e regeneração, em função da transformação do campo nativo, tendo este e a mata nativa como referências para comparação.



Fonte: produção do próprio autor.

Como pode ser observado, o solo sob P49 apresentou estoque de C na profundidade de 0 a 20 cm, inferior às demais áreas, exceto à área E21, comprovando o seu baixo potencial em armazenar este elemento no solo. Contrastando com este resultado, Mafra et al. (2008) analisando o C orgânico e atributos químicos de um Nitossolo Háplico, em Campo Belo do Sul, SC, não encontraram diferença de estoque no reflorestamento de pinus com 20 anos de idade, pinus com 12 anos, campo nativo e floresta.

Já Almeida et al. (2012) em estudo da MOS em plantações de pinus em Cambissolo do Planalto Catarinense, plantado em área de pastagem nativa, sem adubação ou correção com calcário, e sem realização de corte até o momento da coleta, relataram maior estoque de C para pinus com idade de 14 anos na camada de 0 a 5 cm, em relação ao pinus de 10 anos e ao campo nativo, enquanto que nas camadas abaixo, não foram observadas diferenças nos estoques entre os usos do solo.

Essas diferenças encontradas em relação aos estoques de C em pinus, se devem a diferenças nos tipos de solo, clima, e até mesmo de diferenças nos sistemas de manejo florestal, entre os diferentes estudos (ALMEIDA et al., 2012). Um fator a ser analisado é a idade da cultura, pois no geral, os trabalhos em que os plantios florestais não alteraram ou aumentaram o teor de C em área anterior de campo nativo, na região Sul do Brasil, são plantios relativamente recentes, e conforme foi observado nos trabalhos de Wiesmeier et al. (2009) e Dick et al. (2011), há uma tendência em diminuir o armazenamento em plantios florestais mais antigos. Este fato pode ser justificado pela recalitrância química dos resíduos dessas florestas e a ciclagem lenta de nutrientes e C, que faz com que ocorra um consumo da MOS residual pela biota do solo, como já comentado anteriormente. Em consequência, com o avanço da idade da floresta plantada, a biomassa microbiana do solo, sob estresse, utiliza maior quantidade de C para sua manutenção. Assim, mais C é perdido como CO<sub>2</sub> pela respiração e menor é a eficiência dos microrganismos em utilizar o substrato para sua atividade e em incorporar o C à sua biomassa. Dessa forma os microrganismos refletem as mudanças de vegetação conforme os fatores abióticos e práticas de manejo antes mesmo que ocorram mudanças nos níveis de MOS, mas que futuramente influenciarão nos estoques de C (GAMA-RODRIGUES et al., 2005).

O cultivo E21 também diferiu do estoque de C do CN na profundidade de 0 a 20 cm do solo, apresentando 80 Mg ha<sup>-1</sup>, o que representou diferença de 23% em relação ao conteúdo do CN.

Resultado contrário foi observado por Lima et al. (2008), em Virgíópolis, Minas Gerais, na profundidade de 0 a 20 cm de um Latossolo Vermelho, onde os maiores estoques de C foram obtidos sob eucalipto com 30 anos, em relação à pastagem, e menor que o solo sob mata nativa nos primeiros 10 cm. Tal fato foi explicado devido à pastagem ser degradada, e assim a floresta de eucalipto recuperou os estoques de C.

Já Coutinho et al. (2010), ao avaliar a substituição de pastagens por outros usos do solo, em Cruzeiro, São Paulo, em um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico, observaram que o plantio de eucalipto de três anos, não alterou o estoque de C e N do solo, em relação à pastagem original. No entanto, este tempo de cultivo é insuficiente para avaliar mudanças no solo, pois estudos têm demonstrado alterações nos plantios com idade a partir de dez anos. Fato a ser observado, é que nesses estudos, a vegetação natural era formada de floresta, que foi desmatada para implantação de outros usos e posteriormente de pastagens, o que é diferente à condição do presente trabalho, onde o campo foi a vegetação referência do local.

Assim, a variação destes resultados quanto aos estoques de C, além da condição da pastagem, possivelmente, está associada à variabilidade de condições ambientais, tipo de cultivo adotado e o tempo de substituição dessas pastagens (PEGORARO et al., 2011). Ademais, Gatto et al. (2010) constataram que o estoque de carbono sob eucalipto em cinco regiões no centro-leste do Estado de Minas Gerais, variou com as condições edafoclimáticas regionais, sendo que altitude, déficit hídrico e teores de argila e Al foram as características responsáveis pelas maiores variações no estoque de carbono.

Outro aspecto a ser observado quanto às diferenças entre os solos sob vegetação nativa e plantios florestais, é o de que a atividade microbiana em solos de eucalipto e pinus está diretamente relacionada com o teor de nutrientes do solo (RIGOBELLO e NAHAS, 2004). Entretanto, em geral os solos sob vegetação natural dos Campos de Cima da Serra já são relativamente pobres, podendo diminuir ainda mais após a implementação da silvicultura (DICK et al., 2011) e, em consequência diminuindo a atividade microbiana e assim o estoque de C do solo.

Já o estoque de C da área R22 não diferiu do CN e MN, porém apresentou valor intermediário ao não diferir do E21, mostrando que após abandono do campo e substituição gradual da vegetação de gramíneas por arbustos ocorreu possível declínio deste estoque. Entretanto o processo de sucessão de vegetação deste solo tem recuperado o estoque de C, o que pode ser notado pelo valor de COP deste. De forma semelhante, Stürmer et al. (2011) em um Neossolo no município de Agudo, região central do Rio Grande do Sul, constataram que a revegetação natural foi suficiente para elevar os estoques de C de áreas intensivamente cultivadas, próximos ao da mata nativa, em um período de tempo de apenas seis anos, apresentando estoques de 81 e

111 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente, na camada de 0 a 15 cm. Em contraste, no Chernossolo, estes autores encontraram na capoeira e na mata estoque de C de 28 e 68 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

Estes resultados confirmam a importância dos estoques de C nos ecossistemas campestres naturais do sul do Brasil e, a possibilidade de ocorrer expressiva e rápida perda de C no solo em consequência da substituição destas áreas para o cultivo de pinus e eucalipto, o que revela a necessidade de se adotar medidas de conservação e manejo adequado destes ecossistemas, e de implantar mecanismos que auxiliem no incremento dos estoques de C e na mitigação das emissões de gases de efeito estufa, nas áreas já convertidas.

#### 4.5 ÍNDICE DE MANEJO DE CARBONO

O índice de eficiência de carbono (IEC) é medida sensível das mudanças na dinâmica do carbono no solo em relação a um sistema referência, sob condições estáveis. Os diferentes tipos de uso do solo estudados apresentaram comportamento diferenciado quanto à esse índice, porém com valores abaixo de 1 (Tabela 3). Entretanto, as áreas MN e R22 apresentaram os índices mais próximos à referência, indicando acúmulo de C semelhante ao CN. A maior diferença foi verificada no plantio E21, influenciada pelo baixo teor de COP deste, seguido pelo P49.

Tabela 3 – Índice de manejo de carbono na camada de 0 a 20 cm do solo em diferentes tipos de uso do solo, em São Francisco de Paula, RS.

Uso do solo	IEC	L	IL	IMC
Campo nativo	1,00	0,10	1,00	100,00
Regeneração	0,87	0,10	0,98	85,39
Mata nativa	0,89	0,07	0,67	59,86
Eucalipto	0,78	0,07	0,66	51,39
Pinus	0,68	0,09	0,84	57,02

Fonte: produção do próprio autor.

Quanto ao IMC, os usos do solo apresentaram índice abaixo do CN, considerado como referência e, portanto, indicam possível declínio nos estoques de C. O valor de IMC abaixo de 100, para estes usos,

indicam menor aporte ou redução no armazenamento de carbono no solo.

Nos solos sob E21 e P49, o IMC foi de 51 e 57, o que representa diferença de 49 e 43% respectivamente, em relação ao sistema referência (Figura 8). Assim como o COP, o IMC foi sensível em avaliar as mudanças decorrentes da substituição do campo nativo, em comparação ao estoque de C, exceto no solo sob regeneração. Quando um novo tipo de uso do solo é introduzido em uma área natural, o IMC indica se este está degradando ou reabilitando o solo (BLAIR et al. 1995). Dessa forma, o IMC sugere que o plantio destas espécies florestais exóticas no campo nativo resultou em impacto negativo sobre o C do solo. Ademais, o baixo IEC apresentado, comprova a menor capacidade de acúmulo de C destes plantios.

Comportamento semelhante foi verificado para o pinus por Wendling et al. (2010), em Sete Lagoas, Minas Gerais, num Latossolo Vermelho típico, onde a substituição do sistema nativo, no caso o cerrado, pelo pinus com 30 anos e culturas anuais reduziram os teores de C e o IMC, em todas as profundidades avaliadas.

O impacto negativo destes plantios aqui encontrados, concordaram com os resultados de Inácio (2009), que realizou avaliação do IMC em florestas plantadas ao comparar as diferenças na MOS entre floresta nativa, utilizada como referência, pastagem plantada com 16 anos, e eucalipto e pinus com idade de 33 anos, bem como a sua distribuição no perfil de Latossolo Vermelho Distroférico, em Lavras, Minas Gerais. O autor constatou que os resultados do IMC foram inferiores a 100, tendo na camada de 0 a 20 cm, valores de 85, 58 e 59 no eucalipto, pinus e pastagem, respectivamente. Dessa forma, o cultivo de pinus foi o sistema que mais comprometeu a quantidade e qualidade da matéria orgânica do solo.

Em contraste, Moraes (2012) relatou para plantios de eucalipto com sete anos, IMC igual ou superior a 100, na profundidade de 0 a 15 cm, com exceção do Neossolo Regolítico, em estudo realizado com eucalipto e campo nativo, em quatro áreas do bioma Pampa inseridas na parte Sul do Rio Grande do Sul, indicando que o cultivo de eucalipto não alterou os estoques de MOS e a qualidade desses solos. No entanto, a idade desses plantios é recente, e o efeito gerado na matéria orgânica em longo prazo não pode ser determinado com base nesse resultado.

A área R22 apresentou IMC de 85 e, portanto diferença de apenas 15% em relação ao CN. Sabe-se que a recuperação de uma área em abandono é dependente das entradas e saídas de carbono orgânico do

sistema, e da condição inicial da área (STÜRMER et al., 2011). De acordo com Overbeck et al. (2005), em pastagens abandonadas situadas em mosaicos com florestas de araucária nos planaltos do nordeste do Rio Grande do Sul, ocorre dominância de espécies de touceira de capim, e baixa diversidade de espécies herbáceas. Assim, esta diferença pode estar relacionada à mudança de vegetação e dos aportes de resíduos sobre o solo, e assim das entradas e saídas de C, uma vez que a serapilheira e raízes do campo contribuem para altos teores de C. Entretanto, estes valores ficaram acima do pinus e eucalipto, demonstrando que a área em sucessão tem mantido a labilidade da matéria orgânica de forma próxima à área referência. Contudo, é válido ressaltar que as florestas secundárias são importantes do ponto de vista social, econômico e ecológico, mas estas não substituem as áreas primárias (PEREIRA e VIEIRA, 2001).

Já a área MN obteve um IMC relativamente baixo e próximo ao do P49, influenciado pelos baixos teores de COP apresentados nesse sistema natural, como visto anteriormente, possivelmente devido ao efeito de fragmentação e isolamento da área.

#### 4.6 ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO: pH, ALUMÍNIO E CÁTIOS TROCÁVEIS

Os valores de pH em água nas diferentes profundidades dos usos de solo avaliados variaram de 3,78 a 4,50, indicando elevada acidez (Tabela 4). Este comportamento é típico de solos de altitude do Sul do Brasil e está geralmente associado com a ocorrência de quantidade considerável de ácidos orgânicos, que se acumulam no solo devido à decomposição e mineralização lenta dos resíduos vegetais, em comparação com os solos de climas mais quentes e secos (SILVA et al., 2008). Além disso, não foi aplicado corretivo de acidez do solo nas áreas avaliadas.

Os menores valores de pH em água ocorreram na MN, em todas as camadas. Valores baixos de pH e altos de Al+H também foram encontrados por Skorupa et al. (2012) em fragmento de Floresta Ombrófila, em Minas Gerais, em comparação à outras formações naturais, as quais atribuiu a maior altitude e alta precipitação pluvial que ocorre no local, e que pode favorecer o acúmulo de MOS e conseqüente acidificação do solo. Além disso, o pH baixo foi reportado por Potes et al. (2010), que em estudo realizado com campo e mata nativos na região

dos Campos de Cima da Serra, concluiu que no ambiente de mata, ocorre maior atividade microbiana, influenciando nestes valores.

Em avaliação de classes de solo representativos sob campo nativo, da região Campos de Cima da Serra, Silva et al. (2008) verificaram no Cambissolo Húmico valor de pH em água de 4,5 na profundidade até 10 cm, o que foi semelhante ao encontrado no CN.

Tabela 4 – Valores de pH em água e pH em CaCl<sub>2</sub> e respectivos intervalos de confiança (IC), em diferentes tipos de uso do solo, em Cambissolo Húmico, em São Francisco de Paula, RS.

Uso do solo	Camadas		
	0-5 cm	5-10 cm	10-20 cm
		pH em água	
Campo nativo	4,50 ± 0,26	4,23 ± 0,41	3,98 ± 0,50
Regeneração	4,17 ± 0,45	4,30 ± 0,16	4,16 ± 0,30
Mata nativa	3,78 ± 0,36	3,78 ± 0,10	3,81 ± 0,29
Eucalipto	3,93 ± 0,52	4,12 ± 0,43	4,47 ± 0,07
Pinus	4,33 ± 0,20	4,36 ± 0,13	4,42 ± 0,12
		pH em CaCl <sub>2</sub>	
Campo nativo	3,96 ± 0,21	3,85 ± 0,02	3,92 ± 0,05
Regeneração	3,78 ± 0,09	3,79 ± 0,02	3,81 ± 0,02
Mata nativa	3,64 ± 0,11	3,63 ± 0,12	3,64 ± 0,11
Eucalipto	3,66 ± 0,05	3,71 ± 0,05	3,77 ± 0,04
Pinus	3,90 ± 0,19	3,86 ± 0,05	3,89 ± 0,05

Fonte: produção do próprio autor. As médias são estatisticamente diferentes quando não ocorre sobreposição entre os valores no intervalo de confiança (95 %).

O pH em CaCl<sub>2</sub> variou de 3,63 a 3,96 e foi menor do que o pH em água, em todas as profundidades.

Os solos na região Campos de Cima da Serra são na maioria pobres, fortemente ácidos e com altos teores de alumínio, sendo este responsável em grande parte pela estabilização da MOS através de complexação, relevante para teores de Al trocável maiores do que 5,5 cmolc kg<sup>-1</sup> (SILVA et al., 2008). Concordando com este fato (Tabela 6), os teores de Al trocável verificados atingiram valores de 6,76 a 9,59 cmolc dm<sup>-3</sup>. Estes valores foram considerados altos, o que pode ser explicado devido aos baixos valores de pH, facilitando a solubilização do Al trocável no solo. Além disso, o alto teor de Al encontrado nos

solos dessa região foi relacionado por Tomasi et al. (2012) à composição mineralógica, caulínica e oxidica destes. As áreas CN e MN tiveram conteúdos de Al relativamente baixos na superfície e aumentaram em profundidade, o que pode estar associado com a formação de complexos insolúveis de Al-matéria orgânica, removendo esse elemento dos sítios de troca (HAYNES e MOKOLOBATE, 2001).

Tabela 5 – Teores de Ca, Mg, Al e K e respectivos intervalos de confiança (IC), em sistemas de um Cambissolo Húmico, em São Francisco de Paula, RS.

Uso do solo	Camadas		
	0-5 cm	5-10 cm	10-20 cm
-----Cmolc dm <sup>-3</sup> -----			
Alumínio			
Campo nativo	7,63 ± 1,08	8,12 ± 0,47	7,82 ± 0,57
Regeneração	9,59 ± 1,17	9,30 ± 0,83	8,99 ± 0,67
Mata nativa	7,70 ± 1,29	8,39 ± 0,79	8,49 ± 0,80
Eucalipto	8,31 ± 1,56	8,43 ± 0,44	7,84 ± 0,42
Pinus	7,27 ± 1,47	7,89 ± 0,73	7,23 ± 0,49
Cálcio			
Campo nativo	5,83 ± 0,91	4,56 ± 0,53	3,40 ± 0,45
Regeneração	4,32 ± 0,81	2,92 ± 1,01	2,67 ± 0,63
Mata nativa	8,13 ± 3,43	5,57 ± 1,83	4,30 ± 1,56
Eucalipto	2,00 ± 0,28	1,74 ± 0,32	1,60 ± 0,25
Pinus	4,42 ± 0,49	3,83 ± 0,51	3,67 ± 1,66
Magnésio			
Campo nativo	0,59 ± 0,20	0,30 ± 0,10	0,12 ± 0,05
Regeneração	0,34 ± 0,18	0,17 ± 0,08	0,11 ± 0,09
Mata nativa	0,50 ± 0,20	0,32 ± 0,21	0,30 ± 0,28
Eucalipto	0,23 ± 0,14	0,11 ± 0,08	0,09 ± 0,06
Pinus	0,41 ± 0,23	0,21 ± 0,11	0,09 ± 0,06
-----Mg dm <sup>-3</sup> -----			
Potássio			
Campo nativo	112,53 ± 20,81	84,19 ± 4,04	61,44 ± 7,22
Regeneração	88,85 ± 15,14	58,23 ± 4,84	44,99 ± 8,43
Mata nativa	127,06 ± 31,98	88,31 ± 10,44	67,79 ± 15,27
Eucalipto	96,30 ± 23,23	86,27 ± 15,18	63,78 ± 15,06
Pinus	65,47 ± 19,06	47,57 ± 12,13	45,00 ± 9,20

Fonte: produção do próprio autor. As médias são estatisticamente diferentes quando não ocorre sobreposição entre os valores no intervalo de confiança (95 %).

Os teores de Ca, Mg e K variaram entre os tipos de uso do solo e diminuíram em profundidade. As diferenças encontradas podem ser explicadas pelo comportamento diferenciado entre espécies vegetais, quanto à absorção de nutrientes extraídos do solo, deposição e qualidade de resíduos na superfície, contendo parte destes, velocidade de decomposição da serapilheira e liberação dos nutrientes, e consequente efeito sobre os teores destes no solo, dando sequência à ciclagem de nutrientes. Foram observados teores de Mg e K menores do que os teores de Ca, em consequência da elevada acidez do solo (VIERA e SCHUMACHER, 2010), e à perda por lixiviação desses, que é normalmente maior em relação ao Ca, pois este é mais fortemente adsorvido no solo (MAGGI et al., 2011).

Em comparação, os solos sob CN e P49 apresentaram diferenças em relação a essas análises, mostrando que, com exceção do Ca, a substituição do campo possivelmente resultou em declínio, especialmente nos teores de K, o que pode ser justificado pela elevada capacidade de absorção desse elemento pelo pinus (MAFRA et al., 2008), e pelos baixos teores de K e também de Mg que a serapilheira do pinus apresenta, e consequentemente baixo retorno destes nutrientes ao solo (VIERA e SCHUMACHER, 2010). Além disso, quanto maior a idade do povoamento, maior a exportação de nutrientes e de biomassa para o tronco, em relação à copa, ocorrendo comportamento oposto durante o desenvolvimento inicial da árvore, pois canaliza os componentes para a produção de biomassa da copa (VIERA et al., 2011). Assim, a exportação de nutrientes pela retirada da vegetação (através dos desbastes que foram realizados na área P49), a idade deste plantio, e a qualidade da serapilheira, podem ser possíveis causas da diminuição de cátions trocáveis no solo desta área.

Em contraste, a vegetação do campo nativo apresenta maior entrada de nutrientes ao solo, devido à maior qualidade e decomposição da serapilheira, em relação ao pinus (ALMEIDA et al., 2012), além da alta densidade de raízes, principalmente nos primeiros 5 cm, que promove o retorno de nutrientes e C para o solo através da decomposição de resíduos vegetais, enquanto no pinus as raízes entram mais profundamente no solo e apresentam uma ciclagem mais lenta,

levando a um ciclo de nutrientes inferior, embora mais uniforme, ao longo do perfil (DICK et al., 2011).

Resultados semelhantes foram encontrados por Almeida et al. (2012), que relataram empobrecimento do solo em termos de nutrientes, devido à introdução do pinus em área de campo nativo do planalto catarinense, sendo que neste o pH foi maior, o conteúdo de Ca e Mg trocáveis foi melhor e Al foi menor em relação ao pinus de 10 e 14 anos. Nos Campos de Cima da Serra, Dick et al. (2011) encontrou teores de Ca e Mg trocáveis consideravelmente menores em todas as amostras de pinus de 8 e 30 anos, em relação ao campo nativo, enquanto o K trocável diferiu apenas nas amostras mais profundas que 5 cm. No cerrado, Silva et al. (2009) encontraram para as áreas sob pinus, previamente adubado, reduções no pH e nos teores de K, Ca e Mg e aumento médio de 40% na saturação por Al (m%), em comparação com o cerrado nativo.

O solo sob E21 apresentou teores de Mg e Ca abaixo do CN, mas não diferiu deste em relação ao teor de K. Essa diferença pode ser explicada pela absorção dos cátions pelo eucalipto, e menor retorno destes ao solo através dos resíduos, pois com o aumento da idade, há uma tendência de redução dos nutrientes alocados na copa e aumento dos nutrientes alocados no tronco (SANTANA et al., 2008), o que reduz o teor de nutrientes da serapilheira do eucalipto. No entanto, esta libera boa quantidade de K, pois este elemento apresenta o maior coeficiente de devolução, ou seja, é o elemento que apresenta menor tempo médio de residência na serapilheira do eucalipto. Em contraste, o Mg e Ca apresentam coeficiente de devolução menor, sendo o do Ca o menor entre eles, e a liberação destes depende da taxa de decomposição da serapilheira do eucalipto, que no geral é de baixa qualidade nutricional e lenta decomposição (COSTA et al., 2005; VIERA et al., 2013).

Silva et al. (2009) relataram que no cerrado, o eucalipto aumentou o teor de K do solo, enquanto os teores de Ca e Mg e saturação por bases não diferiram em relação ao cerrado nativo, porém foram superiores aos dos plantios de pinus. Uma vez que as espécies foram adubadas na sua implantação e não houve replantio, os autores atribuíram esses resultados à absorção de nutrientes pelo eucalipto, nas camadas mais profundas do solo, e seu retorno via decomposição da serapilheira.

No Rio Grande do Sul, Castro et al. (2010) realizaram análises químicas de solo para avaliar a reserva e a disponibilidade de nutrientes para o crescimento do eucalipto e constataram que esta reserva é

variável, sendo desde praticamente nula nos Neossolos Quatzarênicos, até moderadamente boa nos Cambissolos, Neossolos Litólicos e Argissolos Vermelhos. Solos com problemas de drenagem (Gleissolos e Planossolos Háplicos) apresentam baixa reserva em nutrientes, principalmente em função da natureza dos sedimentos depositados.

Dessa forma, a variação de resultados quanto aos efeitos do eucalipto e pinus sobre os atributos químicos do solo se deve a diferenças de clima, solo, espécies plantadas, ecossistema nativo usado como referência e manejo das áreas reflorestadas, que tornam imprópria a generalização dos efeitos gerados por estes plantios no solo.

Em relação às áreas nativas avaliadas, a MN apresentou valores dos nutrientes de forma semelhante ao CN, possivelmente em função da alta diversidade vegetal deste ecossistema e relativamente baixo grau de resistência à decomposição, que possibilita o retorno dos nutrientes ao solo (OSAKI, 2008). Além disso, as florestas de araucária, compostas por estrato superior e consorciadas com espécies latifoliadas tropicais, que formam os estratos inferiores, constituem sistemas florísticos e estruturais heterogêneos e complexos, capazes de desenvolver estratégias que ampliam suas variáveis funcionais, possibilitando alcançar, desta maneira, boa eficiência em todos os processos e assim boa ciclagem de nutrientes (BACKES et al., 2005). Schumacher et al. (2004) em floresta de araucária em Pinhal Grande-RS, relatou que as acículas foram as principais responsáveis pela devolução de nutrientes ao solo, tendo o Ca a maior devolução, seguido pelo N, K, Mg e P. Em relação aos teores de nutrientes da área R22, estes foram similares aos do CN e MN, exceto em relação aos de K, o que sugere que a mudança de vegetação nesta área produziu resíduos com menor qualidade e menor facilidade de decomposição em relação aos resíduos das áreas CN e MN.



## 5 CONCLUSÕES

A vegetação campestre apresentou maiores teores e estoques de carbono e de nutrientes no solo, em comparação ao cultivo de pinus e eucalipto, sugerindo alta decomposição da matéria orgânica do solo nestes plantios, bem como a fragilidade do ambiente campo nativo.

O índice de manejo de carbono (IMC) apontou impacto negativo da substituição do campo nativo para os plantios de pinus e eucalipto, sobre os teores de carbono orgânico e conseqüentemente sobre a qualidade do solo.

O plantio de pinus apresentou condição de menor armazenamento de carbono total e associado aos minerais e de estoque deste elemento no solo, em relação ao campo e mata nativos e à área em regeneração. O eucalipto apresentou menor IMC em relação ao solo dessas áreas.



## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBRECHT, A.; KANDJI, S. T. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. **Agriculture, Ecosystems and Environment, Netherlands**, v.99, n.1, p.15-27, 2003.

ALMEIDA, H. C. et al. Distribution of chemical compartments of soil organic matter and c stocks of a cambisol from south Brazil as affected by Pinus afforestation. **Química Nova**, São Paulo, v. 35, n. 7, 2012.

ANDRADE, C. M. S. de et al. Fatores limitantes ao crescimento do capim-Tanzânia em um sistema agrossilvipastoril com eucalipto, na região dos Cerrados de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 30, n. 4, Jul. 2001.

BACKES, A.; PRATES, F.L.; VIOLA, M.G. Produção de serapilheira em Floresta Ombrófila Mista, em São Francisco de Paula, Rio Grande do Sul, Brasil. **Acta Botanica Brasilica**, São Paulo, v. 19, n. 1, Mar. 2005.

BARETTA, D. et al. Efeito do monocultivo de Pinus e da queima do campo nativo em atributos biológicos do solo no Planalto Sul Catarinense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 5, Out. 2005.

BARETTA, D.; BROWN, G. G.; CARDOSO, E. J. B. N. Potencial da macrofauna e outras variáveis edáficas como indicadores da qualidade do solo em áreas com Araucaria angustifolia. **Acta Zoológica Mexicana**. Xalapa, México, v. 26, n. 2, 2010.

BAYER, C. et al. Armazenamento de carbono em frações lábeis da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 7, Jul. 2004.

BEHLING, H.; BAUERMANN, S.G.; NEVES, P.C.P. Holocene environmental changes in São Francisco de Paula region, southern Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**. v. 14, n. 6, p. 631-639, Nov. 2001.

BEHLING, H. et al. Dinâmica dos campos no sul do Brasil durante o Quaternário tardio. In: PILLAR, V.P et al. **Campos Sulinos - conservação e uso sustentável da biodiversidade**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2009. p.13-25.

BINI, D. et al. Effects of land use on soil organic carbon and microbial processes associated with soil health in southern Brazil. **European Journal of Soil Biology**, Oxford, v. 55, p.117-123, mar./apr. 2013.

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

BLAIR, et al. Soil carbon changes resulting from trash management at two locations in Queensland, Australia and in Nort-east Brazil. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v.6, n.4, p.873-882, 1998.

BOLDRINI, I. I. Campos do Rio Grande do Sul: Caracterização fisionômica e problemática ocupacional. **Boletim do Instituto de Biociências**, Porto Alegre, v. 56, p. 1-39, 1997.

BRUN, E. J. Matéria orgânica do solo em plantios de *Pinus taeda* e *Pinus elliottii* em duas regiões do Rio Grande do Sul. 2008. **Tese** (Doutorado em Engenharia Florestal) - Área de Concentração em Silvicultura, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

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

CARVALHO, A. M. X. de et al. Atividade microbiana de solo e serapilheira em áreas povoadas com *Pinus elliottii* e *Terminalia ivorensis*. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. spe, Dec. 2008 .

CARVALHO, E. J. M.; FIGUEIREDO, M. de S.; COSTA, L. M. da. Comportamento físico-hídrico de um podzólico vermelho-amarelo

câmbico fase terraço sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 2, Fev. 1999.

CARVALHO, Fernanda de. Atributos bioquímicos como indicadores da qualidade de solo em florestas de Araucaria angustifolia (Bert.) O. Ktze. no estado de São Paulo. 2005. **Dissertação** (Mestrado em Ecologia de Agroecossistemas) - Ecologia de Agroecossistemas, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

CASTRO, P. P. et al. Química e mineralogia de solos cultivados com Eucalipto (*Eucalyptus* sp.). **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 8, p. 645-657, 2010.

CHAVES, R. de Q.; CORREA, G. F. Macronutrientes no sistema solo-Pinus caribaea Morelet em palntios apresentando amarelecimento das acículas e morte de plantas. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 5, Out. 2005.

CÓRDOVA, M.; CHAVES, C. L.; MANFREDI-COIMBRA, S. Fauna do solo x vegetação: Estudo comparativo da diversidade edáfica em áreas de vegetação nativa e povoamentos de Pinus sp. **Geoambiente On-line**, [S.l.], n. 12, p. 01-12, 2013.

COSTA, G.S.; GAMA-RODRIGUES, A.C.; CUNHA, G.M. Decomposição e liberação de nutrientes da serrapilheira foliar em povoamentos de *Eucalyptus grandis* no norte fluminense. **Revista Árvore**, Viçosa, v.29, n.4, p.563-570, Ago. 2005.

COUTINHO, R. P. et al. Carbon and nitrogen stocks and N<sub>2</sub>O emission under different land use in Atlantic Forest biome. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 2, Fev. 2010.

DALMOLIN, R.S.D. et al. Organic matter characteristics and distribution in Ferralsol profiles of a climosequence in Southern Brazil. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.57, p.644-654, 2006.

DAY, P.R. Particle fractionation and particle-size analysis. In: BLACK, C.A. Methods of soil analysis. Part 1. **American Society of Agronomy**, Madison, p. 545-566, 1965.

DICK, D. P. et al. Pinus afforestation in South Brazilian highlands: soil chemical attributes and organic matter composition. **Scientia Agricola (Piracicaba, Braz.)**, Piracicaba, v. 68, n. 2, Apr. 2011.

ECLESIA, R. P. et al. Shifts in soil organic carbon for plantation and pasture establishment in native forests and grasslands of South America, **Global Change Biology**, Urbana, v. 18, n. 10 p. 3237–3251, Oct. 2012.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. Brasília, Embrapa Produção de Informações; Rio de Janeiro, Embrapa Solos. 212p. 1997.

FERREIRA, Ademir de Oliveira et al. Relação de estratificação como indicador do sequestro de carbono em macroagregados de Latossolo sob plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 42, n. 4, Abr. 2012.

FERNANDES, A. V.; BACKES, A. Produtividade primária em floresta com Araucaria angustifolia no Rio Grande do Sul. **Iheringia, Série Botânica**, Porto Alegre, v. 51, n. 1, p. 63-78, 1998.

FIDELIS, A.; APPEZZATO-DA-GLORIA, B.; PFADENHAUER, J. A importância da biomassa e das estruturas subterrâneas nos Campos Sulinos. In: PILLAR, V. D. et al. **Campos Sulinos - conservação e uso sustentável da biodiversidade**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2009. p. 88-100.

FONTANA, A. et al. Avaliação dos compartimentos da matéria orgânica em área de Mata Atlântica. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 33, n. 3, Set. 2011.

FREITAS, E. C. S. de et al. Deposição de serapilheira e de nutrientes no solo em Sistema Agrossilvipastoril com eucalipto e acácia. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 37, n. 3, Jun. 2013.

FROUFE, L.C.M.; RACHVAL, M.F.G.; SEOANE, C.E.S. Potencial de Sistemas agroflorestais multiestrata para sequestro de carbono em áreas de ocorrência de floresta atlântica. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, PR, v.31, n.66, p.143-154, 2011.

GAMA-RODRIGUES, E. F. da et al. Nitrogênio, carbono e atividade da biomassa microbiana do solo em plantações de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 6, Dec. 2005.

GATTO, A. et al. Estoques de carbono no solo e na biomassa em plantações de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 4, p. 1069-1079, Ago. 2010.

GEE, G.W. & BAUDER, J.W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A. Methods of soil analysis. Part 1. **American Society of Agronomy**, Madison, p. 383-411, 1986.

GREGORICH, E.G.; JANZEN, M.H. Storage of soil carbon in the light fraction and macro organic matter. In: CARTER, M.R. & STEWART, B.A. Advances in soil science. **Structure and organic matter storage in agricultural soils**. Boca Raton, CRC Lewis, p.167-385, 1996

GUARESCHI, R. F.; PEREIRA, M. G.; PERIN, A. Estoque de carbono em Latossolo Vermelho Distroférrico sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 7, n. 4, p. 597-602, Dez. 2012.

GUGGENBERGER, G. et al. Microbial contributions to the aggregation of a cultivated grassland soil amended with starch. **Soil Biology and Biochemistry**, Fort Collins, v. 31, n. 3, p. 407-419, 1999.

Haynes, R.J.; Mokolobate, M.S. Amelioration of Al toxicity and P deficiency in acid soils by additions of organic residues: a critical review of the phenomenon and the mechanisms involved. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Netherland, v. 59, n. 1, p 47-63. Jan. 2001.

HOFFMANN, W. A. The effects of fire and cover on seedling establishment in a Neotropical savanna. **Journal of Ecology**, England, v. 84, n. 3, p. 383-393, Jun. 1996.

HOLL, K. D. Effect of shrubs on tree seedling establishment in an abandoned tropical pasture. **Journal of Ecology**, England, v. 90, p. 179-187, Feb. 2002.

Inácio ESB. Distribuição vertical de carbono orgânico em Latossolo sob diferentes usos. 2008. **Tese** (Doutorado em Ciência do Solo)- Ciência do Solo. Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Mapa da vegetação do Brasil e Mapa de Biomas do Brasil**, Brasília, 2004.

LEONHARDT, A., LORSCHBITTER, M.L. The last 25,000 years in the Eastern Plateau of Southern Brazil according to Alpes de São Francisco record. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 29, n. 2, p. 454-463, Mar. 2010.

KOCH, M., HENKES, J. A interferência das plantações de pinus spp nos ecossistemas dos Campos de Cima da Serra, RS. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, Florianópolis, v. 2, n.1, p.64-91, jun. 2013.

LAVELLE, P.; SPAIN, A.V. **Soil ecology**. Amsterdam: Kluwer Scientific, 2001. 678p

LIMA, A. M. N. et al. Frações da matéria orgânica do solo após três décadas de cultivo de eucalipto no Vale do Rio Doce-MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 1053-1063, jun. 2008.

LIMA E CUNHA, M. do C. et al. Quantificação da dinâmica dos remanescentes florestais no município de Jaquirana, RS, em imagens de satélite. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 35, n. 4, ago. 2011.

LOSS, A. et al. Distribuição dos agregados e carbono orgânico influenciados por manejos agroecológicos. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 31, n. 3, p. 523-528, 2009.

LOSS, A. et al. Frações orgânicas e índice de manejo de carbono do solo em diferentes sistemas de produção orgânica. **Idesia** (Arica), Arica, Chile v. 29, n. 2, ago. 2011.

MAGGI, C.F et al. Lixiviação de nutrientes em solo cultivado via aplicação de água residuária de suinocultura. **Revista Brasileira de**

**Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 2, p. 170-177, 2011.

MAFRA, Á. L. et al. Carbono orgânico e atributos químicos do solo em áreas florestais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 32, n. 2, Apr. 2008.

MÜLLER, S.C. et al. Plant functional types of woody species related to fire disturbance in forest grassland ecotones. **Plant Ecology**, Oxford, v. 189, n. 1, p. 1-14, 2007.

MORAES, J. R., de. Alterações nos atributos microbiológicos e nos estoques de carbono do solo decorrentes do cultivo de eucalipto no Bioma Pampa. 2010. **Dissertação** (Mestrado em Ciências) - Área de conhecimento: Solos, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2012.

MORENO, J. A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura, 1961, 42 p.

MOURA, V.T.L. et al. Nodulação e crescimento de leguminosas cultivadas em solos coletados sob eucaliptal e sob mata atlântica: relação com os efeitos alelopáticos do *Eucalyptus*. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 20, n. 3, p. 399-405, set./dez. 1996.

MURTY, D. et al. Does conversion of forest to agricultural land change soil carbon and nitrogen? A review of the literature. **Global Change Biology**, Urbana. V. 8, n. 2, p. 105-123, 2002.

NABINGER, C. et al. Produção animal com base no campo nativo: aplicações de resultados de pesquisa. In: PILLAR, V. de P. et al. **Campos sulinos: conservação e uso sustentável da biodiversidade**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2009. 403 p.

NIMER, E. Clima. In: **Geografia do Brasil: Região Sul**. Rio de Janeiro: IBGE. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1990. p. 151-187.

NEVES, C. M. N. das et al. Estoque de carbono em sistemas agrossilvopastoril, pastagem e eucalipto sob cultivo convencional na região noroeste do Estado de Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 28, n. 5, p. 1038-1046, out. 2004.

- NOGUEIRA, M.A. et al. Promising indicators for assessment of agroecosystems alteration among natural, reforested and agricultural land use in southern Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Netherlands, v. 115, p. 237-247, 2006.
- OLIVEIRA, J.M.d.; PILLAR, V.D. Vegetation dynamics on mosaics of Campos and Araucaria forest between 1974 and 1999 in Southern Brazil. **Community Ecology, Hungary** vol. 5, n. 2, p. 197-202, Nov. 2004.
- OSAKI, F. Distribuição espacial de microrganismos e fertilidade em solos de dois ecossistemas florestais. 2008. **Tese** (Doutorado em Ciências Florestais) – Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.
- OVERBECK, G.E. et al. Brazil's neglected biome: The South Brazilian Campos. **Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics**, Germany, v.9, p.101-116, 2007
- OVERBECK, G.E. et al. Fine-scale post-fire dynamics in South Brazilian subtropical grassland. **Journal of Vegetation Science**, United States, v. 16, p. 655–664. 2005
- OVERBECK, G.E.; PFADENHAUER, J. Adaptive strategies in burned subtropical grassland in southern Brazil. **Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants**, v. 202, n. 1, p. 27–49, Feb. 2007.
- PARK, C.-W. et al. Differences in soil aggregate, microbial biomass carbon concentration, and soil carbon between *Pinus rigida* and *Larix kaempferi* plantations in Yangpyeong, central Korea. **Forest Science and Technology**, London, v. 8, 2012.
- PEGORARO, R. F. et al. Estoques de carbono e nitrogênio nas frações da matéria orgânica em Argissolo sob eucalipto e pastagem. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.21, p.261-273, abr.-jun. 2011.

PEREIRA, C.; VIEIRA, I. A importância das florestas secundárias e os impactos de sua substituição por plantios mecanizados de grãos na Amazônia. **Interciência**, Caracas, v. 26, n. 8, ago. 2001

PILLAR, VD. Et al. **Workshop Estado atual e desafios para a conservação dos Campos**. UFRGS, Porto Alegre, 24 p. 2006.

PILLAR, VD; TORNQUIST, CG; BAYER, C. The southern Brazilian grassland biome: soil carbon stocks, fluxes of greenhouse gases and some options for mitigation. **Brazilian Journal of Biology**, São Carlos, v. 72, n. 3, supl. Aug. 2012.

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, 2009.

POTES, M. L. et al. Matéria orgânica em Neossolos de altitude: influência da queima da pastagem e do tipo de vegetação na sua composição e teor. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 1, p. 23-32, Feb. 2010.

POTES, M. da L. et al. Soil organic matter in fire-affected pastures and in an Araucaria forest in South-Brazilian Leptosols. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 5, p.707-715, maio 2012.

PRIMIERY, S. O impacto da mudança no uso do solo sobre o sequestro de carbono e seus atributos microbiológicos. 2008. 114f. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

PULROLNIK, K. et al. 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**, Viçosa, v. 33, n. 5, 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**, Viçosa, v. 31, n. 6, p. 1609-1623, 2007.

RANTALAINEN, M.L. et al. Influence of resource quality on the composition of soil decomposer community in fragmented and continuous habitat. **Soil Biology and Biochemistry**, Fort Collins, v. 36, p. 1983-1996, Dec. 2004.

RIGOBELLO, E.C.; NAHAS, E. Flutuação sazonal da comunidade bacteriana e da atividade microbiana em solos sob eucalipto e pinus. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 61, n. 1, p. 88-93, jan./fev. 2004.

ROSCOE, R. O sequestro de carbono no sistema plantio direto: Possibilidades de contabilização. In: ROSCOE, R.; MERCANTE, F. M.; SALTON, J. C. **Dinâmica da matéria orgânica do solo e, sistemas conservacionistas**. Dourados, MS: Embrapa Agropecuária Oeste, 2006. p.43-63.

SANTANA, G. S. et al. Chemical composition and stocks of soil organic matter in a south Brazilian oxisol under pasture. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, São Paulo, v. 24, n. 5, p.821-829, May 2013.

SANTANA, R. C. et al. Alocação de nutrientes em plantios de eucalipto no Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. spe, Dec. 2008.

SANTOS, D. C. dos et al. Agregação e proteção física da matéria orgânica em planossolo háplico sob diferentes sistemas de manejo. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 28, Supl. 1, p. 54-63, Mar. 2012.

SANTOS, D.C. dos et al. Avaliação da qualidade física e da matéria orgânica de um Argissolo Vermelho derivado de arenito da Fronteira Oeste do Rio Grande do Sul. Pelotas: **Embrapa Clima Temperado**, 2009. 26p. Embrapa Clima Temperado. Boletim de pesquisa e desenvolvimento.

SARTOR, L. R. et al. Alelopatia de acículas de Pinus taeda na germinação e no desenvolvimento de plântulas de Avena strigosa. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 6, p. 1653-1659, set. 2009.

SCHUMACHER et al. Produção de serapilheira em uma floresta de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze no município de Pinhal Grande-RS. **Revista Árvore**, Viçosa, v28, n. 1, p. 29-37, 2004.

SILVA, A. J. N. da; CABEDA, M. S. V.; CARVALHO, F. G. de. Matéria orgânica e propriedades físicas de um Argissolo Amarelo Coeso sob sistemas de manejo com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 3, p.579–585, 2006.

SILVA, L. B. da; DICK, D. P.; INDA JUNIOR, A.V. Solos subtropicais de altitude: atributos químicos, teor de matéria orgânica e resistência à oxidação química. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 4, p. 1167-1171, jul. 2008.

SILVA, L. G. da et al. Physical, chemical and biological attributes of a cerrado Oxisol under different forest species. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, n. 6, p. 613-620, jun. 2009.

SKORUPA, A. L. A. et al. Propriedades de solos sob vegetação nativa em Minas Gerais: distribuição por fitofisionomia, hidrografia e variabilidade espacial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 1, p. 11-22, 2012.

SOARES, A. B. et al. Influência da luminosidade no comportamento de onze espécies forrageiras perenes de verão. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 38, n. 3, Mar. 2009.

Sonego, R.C.; Backes, A.; Souza, A.F. Descrição da estrutura de uma Floresta Ombrófila Mista, RS, Brasil, utilizando estimadores não paramétricos de riqueza e rarefação de amostras. **Acta Botanica Brasilica**, São Paulo, v. 21, n. 4, p. 943-955, 2007.

SOUZA, E. D. de et al. Carbono orgânico e fósforo microbiano em sistema de integração agricultura-pecuária submetido a diferentes intensidades de pastejo em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 1273-1282, 2008.

SOUZA, E. D. de et al. Estoques de carbono orgânico e de nitrogênio no solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto, submetido a intensidades de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 6, p. 1829-1836, 2009.

SOUZA, I.M.Z. de. Carbono e Nitrogênio da Biomassa do solo em áreas reflorestadas comparadas ao Campo e Mata Nativa no Planalto dos Campos Gerais. 2005. 50 p. **Dissertação** (Mestrado em Ciência do Solo) -Centro de Ciências Agroveterinárias, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, Santa Catarina. 2005.

STEVENSON, F.J. **Humus chemistry: genesis, composition, reactions**. 2th ed. New York: J. Wiley, 1994. 496 p.

STRECK, E. V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Emater-RS/UFRGS, 2002. 107 p.

STÜRMER, S. L. K. et al. Variações nos teores de carbono orgânico em função do desmatamento e revegetação natural do solo. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 2, p. 241-250, abr./jun. 2011.

TEDESCO, M. J. et al. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p.

THENG, B. K. G.; TATE, K. R.; SOLLINS, P. Constituents of organic matter in temperate and tropical soils. In: COLEMAN, D. C., OADES, J. M.; UEHARA, G. (Eds.). **Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems**. Honolulu: University of Hawai, 1989. p. 5-32.

TOGNON, A.A.; DEMATTE, J.L.I.; DEMATTE, J.A.M. Teor e distribuição da matéria orgânica em latossolos das regiões da floresta amazônica e dos cerrados do Brasil central. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 55, n. 3, 1998.

TOMASI, C. A.; INDA, A. V.; DICK, D. P. Substâncias húmicas em Latossolo subtropical de altitude sob usos e manejos distintos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 42, n. 12, p. 2180-2184, dez. 2012.

TORNQUIST, C.G. et al. Soil organic carbon stocks of Rio Grande do Sul, Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, United States vol. 73, n. 3, p. 975-982. May 2009.

VIEIRA, F.C.B. et al. Carbon management index based on physical fractionation of soil matter in an Acrisol under long-term no-till cropping systems. **Soil and Tillage Research**, Netherlands, v.96, p.195-204, 2007.

VIERA, M.; SCHUMACHER, M. V.; BONACINA, D. M. Biomassa e nutrientes removidos no primeiro desbaste de um povoamento de Pinus taeda L. em Cambará do Sul, RS. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 35, n. 3, p.371-379, 2011.

VIERA, M.; SCHUMACHER, M. V.; CALDEIRA, M. V. W. Dinâmica de decomposição e nutrientes em plantio de Eucalyptus Urophylla X Eucalyptus Globulus no sul do Brasil. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 20, n. 3, p. 351-360, jul./set. 2013.

VIERA, M.; SCHUMACHER, M. V. Teores e aporte de nutrientes na serapilheira de Pinus taeda L., e sua relação com a temperatura do ar e pluviosidade. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 34, n. 1, p. 85-94, 2010.

WATZLAWICK, L.F. et al. Estoque de biomassa e carbono na Floresta Ombrófila Mista Montana Paraná. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v.40. p. 353-362, set. 2012.

WENDLING, B. et al. Organic-matter pools of soil under pines and annual cultures. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 41, n. 14, p.1707-1722, 2010.

WIESMEIER, M. et al. Depletion of soil organic carbon and nitrogen under Pinus taeda plantations in Southern Brazilian grasslands (Campos). **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.60, p.347-359, June 2009.

WITSCHORECK, R.; SCHUMACHER, M.V. Estimativa do carbono da serapilheira em florestas de eucalipto de diferentes idades. In: CONGRESSO FLORESTAL ESTADUAL DO RIO GRANDE DO

SUL, 9., 2003, Nova Prata, RS. **Anais**. Nova Prata: Prefeitura Municipal, 2003.