

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE BIOCÊNCIAS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BOTÂNICA

**ESTOQUE E DINÂMICA DE CARBONO EM PLANTIOS SUBTROPICAIS DE
Eucalyptus saligna E MEDITERRÂNEOS DE *Eucalyptus globulus***

TANISE LUISA SAUSEN

Tese de Doutorado

Porto Alegre, 25 de fevereiro de 2011.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE BIOCÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BOTÂNICA

**ESTOQUE E DINÂMICA DE CARBONO EM PLANTIOS SUBTROPICAIS DE
Eucalyptus saligna E MEDITERRÂNEOS DE *Eucalyptus globulus***

TANISE LUISA SAUSEN

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Botânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Botânica.

Orientador: Prof. Dr. Luís Mauro Gonçalves Rosa

Co-orientadora: Prof^a. Dr. Maria Manuela Chaves

Porto Alegre, 25 de fevereiro de 2011.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho dependeu da contribuição de diversas pessoas e instituições para as quais eu gostaria de registrar meus agradecimentos.

Ao Prof. Luís Mauro Gonçalves Rosa, pela orientação, incentivo, amizade e apoio.

À Profa. Maria Manuela Chaves, pela co-orientação durante a bolsa-sanduíche, pelo apoio e atenção durante o período de estadia no Instituto de Tecnologia Química e Biológica da Universidade Nova de Lisboa (ITQB/UNL).

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão das bolsas de estudo e pela atenção despendida durante todo o período de estágio sanduíche.

À Empresa Celulose RioGrandense, em especial ao pesquisador Elias Araújo, pelo apoio logístico e financeiro durante o desenvolvimento do experimento de campo no Brasil.

Ao Laboratório de Ecofisiologia Molecular do Instituto de Tecnologia Química e Biológica (LEM/ITQB) e ao Centro de Estudos Florestais do Instituto Superior de Agronomia (CEF/ISA), em especial, Ana Paula Rodrigues e Sofia Cerasoli, pela amizade, disponibilização de equipamentos, auxílio na realização dos experimentos de campo em Portugal e na análise dos resultados.

Ao professor João Santos Pereira (ISA/Portugal) pela revisão deste trabalho e pelas valiosas sugestões.

A Fundação de Ciência e Tecnologia (FCT/Portugal) pelo apoio financeiro ao estudo desenvolvido durante o período sanduíche integrante do Projeto Tree Age e coordenado pela Dr. Sofia Cerasoli.

Ao Programa de Pós-Graduação em Botânica (UFRGS) pela estrutura disponibilizada para a realização deste estudo e pela atenção despendida durante o processo de solicitação da bolsa sanduíche.

Ao Laboratório de Biogeoquímica Ambiental (Faculdade de Agronomia/UFRGS), em especial ao professor Cimélio Bayer e a Dra. Michely Tomazi pela infra-estrutura gentilmente disponibilizada para a realização deste trabalho e pela ajuda nas análises de solo.

Ao aluno Guilherme Schaefer, bolsista de Iniciação Científica, pelo auxílio nos experimentos de campo e de laboratório.

A doutoranda Lívia Schneumann, pela ajuda nas análises de lignina.

Aos professores Arthur Fett Neto, Janette Palma Fett, João Ito Bergonci e Lúcia Rebello Dillenburg pelo apoio e confiança durante o meu período como professora substituta na UFRGS.

Aos meus alunos dos cursos de Agronomia, Biologia, Biologia Marinha e Farmácia da UFRGS pela valiosa contribuição na minha formação acadêmica.

À banca examinadora do trabalho de qualificação, pelas excelentes sugestões.

Às colegas e amigas do Laboratório de Ecofisiologia Vegetal (Instituto de Biociências/UFRGS), Carla, Fernanda, Francine, Paula e Tatiana pelo divertido convívio durante estes 4 anos.

Aos amigos do Laboratório de Ecofisiologia Molecular (ITQB), em especial a Raquen Raíssa do Santos e Ana Rita Leandro dos Santos, pela grande amizade, apoio e atenção durante minha estadia em Portugal.

À minha querida amiga Franceli Kulscheski pelos momentos de diversão e pelo apoio nos momentos difíceis.

À amiga e co-orientadora extra oficial Marisa Azzolini pela amizade e preciosa ajuda durante todas as fases do doutorado.

Ao amigo Luciano Figueiredo pela ajuda no experimento de campo e pelas sugestões no trabalho.

À amiga Raquel Barro pela ajuda durante o doutorado, pela alegre convivência durante o ano de 2010 e por dividir comigo as angústias de final de doutorado.

Ao meu querido irmão Tiago Sausen, pela sua inesgotável paciência e pela sua eterna amizade;

Aos meus amores, Liria e Joarez pelo constante apoio, por acreditarem nos meus sonhos, pela força e compreensão da minha ausência. Sem o apoio de vocês eu jamais teria chegado até aqui.

A Deus, pela intensidade de sua presença em minha vida.

ESTOQUE E DINÂMICA DE CARBONO EM PLANTIOS SUBTROPICAIS DE *Eucalyptus saligna* E MEDITERRÂNEOS DE *Eucalyptus globulus*

AUTOR: Tanise Luisa Sausen

ORIENTADOR: Luís Mauro Gonçalves Rosa

CO- ORIENTADOR: Maria Manuela Chaves

RESUMO

O contínuo aumento na concentração de dióxido de carbono na atmosfera, resultado da combustão de combustíveis fósseis, de mudanças no uso do solo e do desmatamento para a agricultura, é um assunto de grande importância devido a suas implicações no aquecimento global e nas mudanças climáticas. O florestamento é visto como uma solução para frear o aumento na concentração de CO₂ atmosférico, podendo contribuir na mitigação das mudanças climáticas através do sequestro de carbono na biomassa das árvores e no solo. O presente estudo teve como objetivo avaliar alguns dos processos que envolvem o estoque e a dinâmica do carbono em sistemas florestais manejados com eucalipto. O estudo abrangeu trabalhos de campo para quantificar o estoque de carbono nos componentes do sistema florestal com árvores de *Eucalyptus saligna* com três anos de idade na região Sul do Brasil e a investigação do efeito de variações sazonais e ontogenéticas sobre as emissões respiratórias de CO₂ das folhas e do caule de *Eucalyptus globulus* com 6 e 11 anos de idade sob clima Mediterrâneo na região central de Portugal. Os resultados do experimento de campo realizado no Brasil mostraram que a biomassa do caule representa o principal *pool* de carbono no sistema florestal (média de 68% do estoque total), seguido pelo solo (média de 30%) enquanto que os *pools* mais lábeis de carbono, como a biomassa das folhas, raízes e a serrapilheira representam uma menor proporção do estoque total de carbono (média de 2%). O teor de argila e o conteúdo gravimétrico de água no solo foram positivamente relacionados com as variações observadas no estoque de carbono no solo e na biomassa de folhas e do caule. O acúmulo de carbono no solo não foi associado com a produção e composição química de serrapilheira. Por outro lado, as variações observadas no estoque de carbono nas frações do solo (carbono associado a minerais e carbono orgânico particulado) foram significativamente associadas com as características do solo, principalmente o teor de

argila e a concentração de cobre; e com a composição química das raízes. As relações observadas entre as características do solo e das raízes com as frações de carbono associado a minerais e de carbono orgânico particulado parecem estar associadas com a função dessas variáveis sobre os processos de decomposição e estabilização da matéria orgânica no solo. Os resultados do experimento de campo conduzido em Portugal evidenciaram que a medida que as árvores tornam-se maiores e mais velhas ocorre um aumento nas perdas respiratórias de CO₂ das folhas e do caule. Entretanto, o acentuado aumento observado nas emissões respiratórias nas árvores mais velhas (11 anos) ocorreu apenas durante o outono, sendo associado com a recuperação do status hídrico da planta após um período de déficit hídrico durante o verão. O aumento na respiração foliar e do caule nas árvores mais velhas após a recuperação do turgor celular durante o outono parece estar relacionado com o aumento na energia requerida para os processos de manutenção celular mais do que aos processos de respiração de crescimento. Os resultados deste estudo indicaram que em sistemas florestais manejados, o caule das árvores representa o principal *pool* de carbono e que as perdas de carbono através das emissões respiratórias de CO₂ tornam-se mais acentuadas nas árvores mais velhas, apenas em condições ambientais favoráveis ao ganho de carbono, tais como no outono, sendo influenciadas pelo turgor celular. Por outro lado, o acúmulo de carbono no solo parece estar relacionado com a relação entre as características intrínsecas do solo, sobretudo a granulometria, e a composição química das raízes, sobre os processos de estabilização da matéria orgânica no solo do que em relação à quantidade de serrapilheira depositada no solo.

CARBON STOCK AND DYNAMICS ON SUBTROPICAL PLANTATIONS OF *Eucalyptus saligna* AND MEDITERRÂNEAN PLANTATIONS OF *Eucalyptus globulus*

AUTHOR: Tanise Luisa Sausen

ADVISER: Luís Mauro Gonçalves Rosa

CO- ADVISER: Maria Manuela Chaves

ABSTRACT

The continuous increase in the concentration of carbon dioxide in the atmosphere, due to the combustion of fossil fuels, changes in land use and deforestation for agriculture, is a matter of great importance due to its implications on global warming and climate change. Afforestation is seen as a solution to mitigate the increase in atmospheric CO₂ concentration and may contribute to climate change mitigation through carbon sequestration in the trees' biomass and soil. In this study we tried to assess some of the processes involving the carbon balance in forestry systems with eucalyptus. The study included field work to quantify the carbon stocks in the components forest system with trees of *Eucalyptus saligna* in the South of Brazil and the investigation of the effect of seasonal and ontogenetic variations on CO₂ respiratory emissions from the leaves and stem of *Eucalyptus globulus* under the Mediterranean climate in central Portugal. The results of the Brazilian experiment showed that the stem biomass is the main pool of carbon in the forestry system (average 68% of total stock), followed by soil (30%) while the more labile carbon pools, such as leaf and root biomass and litter mass represent a smaller proportion of total carbon stock (2%). Clay and gravimetric water contents in the soil were associated with the observed variations in carbon storage in the soil and in the leaf and stem biomass. The accumulation of soil carbon was not directly associated with the production and chemical composition of the litter. However, the observed variations in carbon stock in the soil fractions (particulate and mineral organic carbon) were significantly associated with soil characteristics, especially the clay content, the concentration of copper and the chemical composition of roots. The observed

relationships between soil characteristics and root fractions with the mineral and particulate organic carbon fractions seem to be associated with the function of the variables, cited above, on the processes of decomposition and stabilization of organic matter in soil. The results of the field experiment conducted in Portugal revealed that as the trees become larger and older, there is an increase in CO₂ respiratory losses from leaves and stems. However, the marked increase in respiratory emissions observed in the older trees occurred only during the autumn, being associated with the recovery of plant water status after a period of drought during the summer. The increase in leaf and stem respiration of older trees after the recovery of cell turgor during the autumn seem to be related to increased energy costs in the processes of cellular maintenance rather than on growth respiration. The results of this study indicated that in managed forestry systems, the tree stem represents the major pool of carbon and carbon losses through the CO₂ respiratory emissions become more pronounced in older trees, only under conditions favorable for carbon gain, such as in the autumn, being influenced by cell turgor. Moreover, the accumulation of carbon in the soil seems to be more related to the relationship between the intrinsic characteristics of the soil, particularly grain size and chemical composition of roots on the processes of stabilization of organic matter in the soil rather than the amount of litter deposited in soil.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL.....	1
Hipóteses.....	6
Objetivos.....	6
Referências Bibliográficas.....	8
CAPÍTULO 1	
<i>Pools de carbono em um sistema florestal manejado com Eucalyptus saligna (Labill.) sob clima subtropical na região Sul do Brasil.....</i>	11
INTRODUÇÃO.....	11
MATERIAL E MÉTODOS.....	13
<i>Local de estudo.....</i>	<i>13</i>
<i>Estratégia Experimental.....</i>	<i>18</i>
<i>Levantamento de Dados.....</i>	<i>21</i>
<i>Análise dos Dados.....</i>	<i>25</i>
RESULTADOS.....	28
<i>Condições ambientais durante o estudo.....</i>	<i>28</i>
<i>Heterogeneidade espacial nas características do solo.....</i>	<i>29</i>
<i>Concentração de carbono orgânico no solo.....</i>	<i>32</i>
<i>Produção de serrapilheira.....</i>	<i>36</i>
<i>Concentração de carbono orgânico na serrapilheira.....</i>	<i>39</i>
<i>Crescimento e Biomassa.....</i>	<i>41</i>
<i>Carbono orgânico na biomassa.....</i>	<i>44</i>
<i>Carbono orgânico no sistema florestal.....</i>	<i>44</i>
<i>Influência das condições hídricas no estoque de carbono.....</i>	<i>46</i>

DISCUSSÃO.....	48
CONCLUSÕES.....	54
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55

CAPÍTULO 2

Estoque de carbono no solo em uma floresta manejada de eucalipto: Influência de características do solo ou da planta?.....	58
INTRODUÇÃO.....	58
MATERIAL E MÉTODOS.....	60
<i>Local de estudo e delineamento experimental.....</i>	<i>60</i>
<i>Quantificação do carbono orgânico total e das frações do solo...</i>	<i>61</i>
<i>Estoque de carbono orgânico total e das frações do solo.....</i>	<i>63</i>
<i>Produção Sazonal de Serrapilheira.....</i>	<i>63</i>
<i>Concentração de Nutrientes e Carbono na Serrapilheira.....</i>	<i>64</i>
<i>Concentração de nutrientes nas raízes.....</i>	<i>64</i>
<i>Taxa de Decomposição Foliar.....</i>	<i>65</i>
<i>Quantificação do conteúdo de lignina.....</i>	<i>66</i>
<i>Análise dos Dados.....</i>	<i>67</i>
RESULTADOS.....	68
<i>Solo.....</i>	<i>69</i>
<i>Serrapilheira.....</i>	<i>71</i>
<i>Decomposição Foliar.....</i>	<i>75</i>
<i>Acúmulo de C no solo.....</i>	<i>78</i>
DISCUSSÃO.....	81
CONCLUSÕES.....	86
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	87

CAPÍTULO 3

Effects of Tree Age on CO₂ Respiratory Emissions from Leaves and Stems of <i>Eucalyptus globulus</i> (Labill.). Seasonal water deficits and Acclimation to Temperature.....	90
INTRODUCTION.....	90
MATERIAL AND METHODS.....	92
<i>Study site and experimental design.....</i>	<i>92</i>
<i>Environmental conditions and water status of trees.....</i>	<i>93</i>
<i>Soil nutrients.....</i>	<i>93</i>
<i>Gas exchange.....</i>	<i>94</i>
<i>Tree Sap flow.....</i>	<i>95</i>
<i>Relationship between temperature and respiration.....</i>	<i>95</i>
<i>Statistics.....</i>	<i>96</i>
RESULTS.....	97
<i>Environmental and soil characteristics.....</i>	<i>97</i>
<i>Leaf dark respiration.....</i>	<i>98</i>
<i>CO₂ efflux, radial growth and sap flow.....</i>	<i>101</i>
<i>Relationship between respiration and water status of trees.....</i>	<i>105</i>
DISCUSSION.....	107
CONCLUSIONS.....	110
REFERENCES.....	112
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	115

INTRODUÇÃO GERAL

Nos últimos 50 anos, principalmente nas regiões tropicais e subtropicais, grandes extensões de terras degradadas e áreas de pastagens foram gradualmente substituídas por plantações de espécies arbóreas exóticas, principalmente do gênero *Pinus* e *Eucalyptus*. O florestamento compreende a conversão de terras que anteriormente não apresentavam árvores em plantações florestais (Evans, 1992) e tem sido reconhecido como uma importante atividade que pode contribuir para frear o aumento na concentração de CO₂ atmosférico (IPCC, 2003; 2007).

No Brasil, as florestas plantadas são responsáveis por 100% do suprimento nacional de madeira para a indústria da celulose, além de suprirem as indústrias moveleira e siderúrgica e contribuírem para a conservação e preservação de formações nativas. As árvores do gênero *Eucalyptus* são as mais cultivadas devido a sua alta produtividade e seu rápido crescimento (apresenta ciclo de 6 – 7 anos). Atualmente, o Brasil possui a maior área plantada de *Eucalyptus* do mundo, com mais de 3 milhões de hectares, sendo o maior produtor mundial de celulose, com cerca de 6,3 milhões de toneladas por ano (Ministério da Ciência e Tecnologia 2007). No caso específico do Rio Grande do Sul, o florestamento com espécies de *Eucalyptus* ocupa cerca de 220 mil hectares, sobretudo na região fisiográfica da Depressão Central, onde as espécies mais cultivadas são *E. saligna*, *E. grandis*, *E. dunni* e *E. globulus*, respectivamente (CMPC 2011).

Apesar do reconhecido benefício econômico é amplamente difundida a idéia de que, a médio e longo prazo, plantações de árvores exóticas são prejudiciais ao ambiente devido ao seu possível impacto na depleção de fontes de nutrientes e água, além de causar a salinização dos solos. Porém, de acordo com os trabalhos de Hatton et al.

(1998), Eamus et al. (2005) e Jackson et al. (2005), o uso de água pelas árvores por unidade de área foliar e o efeito de salinização do solo são determinados, principalmente, pelas características do solo e do clima. Adicionalmente, os prejuízos no solo devido ao cultivo de eucalipto, estão associados principalmente com as técnicas de preparo do solo e de corte das árvores. A utilização de práticas de manejo mais sustentáveis, evitando a remoção ou a queima dos resíduos da colheita é uma importante medida para reduzir os impactos negativos do plantio de eucalipto na fertilidade do solo (Bertrung et al. 2009; Madeira et al. 2007).

Por outro lado, as plantações de árvores exóticas podem apresentar benefícios sócio-econômicos, além de recuperar solos degradados e melhorar o microclima (Keenan et al. 1997; Hardwick et al. 1997; Feyera et al. 2002). Espécies do gênero *Eucalyptus* adaptam-se bem em solos de baixa fertilidade e destacam-se no uso para recuperação de áreas degradadas (Souza & Davide 2001). Além disso, tem sido demonstrado que plantações de *Eucalyptus* podem ter um efeito “berçário”, isto é, as plantas nativas, incluindo arbustos e árvores sob a proteção do seu dossel, podem regenerar e formar florestas (Feyera et al. 2002; Lüttge et al. 2003). O rápido crescimento de florestas exóticas comparado com florestas nativas, e a alta produção de madeira são responsáveis pela redução da quantidade de terra necessária para atender a demanda mundial de madeira (Wright et al. 2000).

O florestamento pode contribuir na mitigação dos efeitos das mudanças climáticas através do suprimento sustentável de produtos da madeira, pela substituição de combustíveis fósseis pela bioenergia e principalmente, através do seqüestro de carbono (Seidl et al. 2007).

Sistemas florestais manejados são considerados grandes drenos de carbono atmosférico devido a alta produção de biomassa, ao grande aporte de resíduos orgânicos

no solo e pelo menor revolvimento do solo durante o período de cultivo. Embora a biomassa produzida pelas árvores represente um grande reservatório de carbono, há uma considerável incerteza em relação a capacidade de estoque de carbono no solo. A espécie utilizada, o teor de argila no solo, tipo de vegetação presente antes do florestamento, técnicas de manejo do solo e características climáticas como temperatura e precipitação têm forte influência no acúmulo e retenção de carbono no solo (Laganière et al. 2010; Meier & Leuschner 2010).

A fotossíntese é a principal rota para a entrada natural de carbono em ecossistemas florestais, enquanto que as principais perdas de carbono ocorrem pela respiração autotrófica dos tecidos vegetais e pela respiração heterotrófica dos microorganismos do solo. Especificamente, cerca da metade do carbono fixado diariamente pela fotossíntese retorna para atmosfera através do processo de respiração. Entre os processos de aquisição e perda, o carbono é armazenado temporariamente nos sistemas florestais em dois principais *pools*, no caule das árvores e na matéria orgânica do solo (Lorenz & Lal 2010).

A serrapilheira é a fonte primária da matéria orgânica no solo e o processo de decomposição da serrapilheira é responsável pelo retorno para a atmosfera de grandes quantidades de CO₂, bem como pela formação de substâncias húmicas que contribuem para a fertilidade e para o estoque de carbono no solo (Berg & McLaugherty 2009).

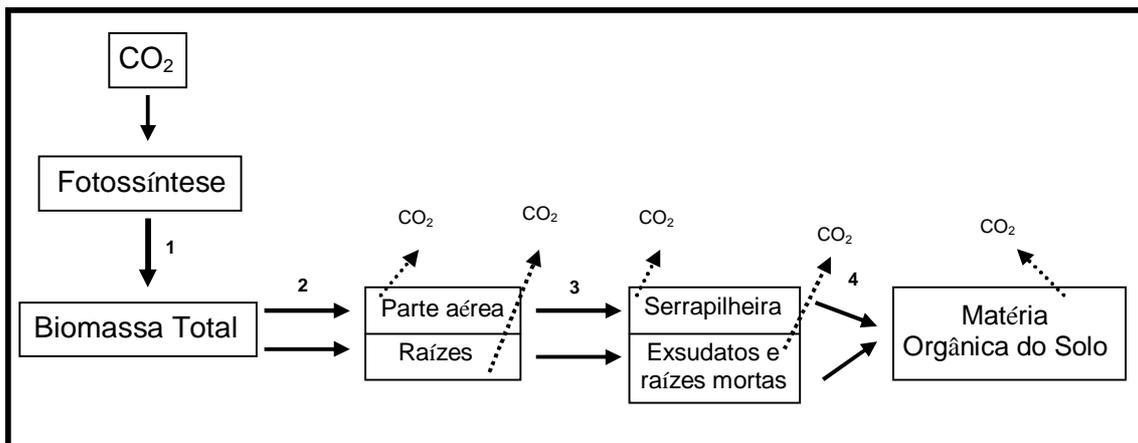


Figura 1. Representação esquemática dos fluxos de entrada e saída de carbono no sistema florestal: (1) produtividade primária bruta; (2) partição de fotoassimilados; (3) fluxo dos resíduos vegetais; (4) decomposição. Setas pontilhadas representam o efluxo de CO_2 através do processo de respiração e decomposição. Adaptado de Russel et al. (2010).

Os processos de incorporação e estabilização da matéria orgânica no solo são influenciados pela composição química dos resíduos vegetais em decomposição (Kögel-Knabner 2002; Crow et al. 2009). A decomposição dos resíduos vegetais envolve processos químicos, físicos e biológicos atuando sobre uma grande variedade de substratos orgânicos. Após a liberação pela planta, a composição química da serrapilheira é alterada, com alguns componentes sendo liberados rapidamente, principalmente açúcares, fenóis e alguns nutrientes através da lixiviação. Moléculas maiores, incluindo celulose, hemicelulose e lignina são degradados mais lentamente, sendo caracterizadas como compostos recalcitrantes (Berg & McLaugherty 2009).

A estabilização da matéria orgânica no solo é caracterizada através de 3 principais mecanismos. A estabilização química, resultado da interação entre a matéria orgânica e os minerais do solo (partículas de silte e argila); a proteção física que

envolve a formação de agregados protegendo a matéria orgânica do ataque de microorganismos e suas enzimas e a estabilização bioquímica, dependente da composição química do material vegetal e de reações de complexação no solo (Christensen 1996; Six et al. 2002).

A influência do plantio de espécies exóticas na capacidade de estoque de carbono no solo em clima tropical e temperado têm sido bastante investigada (Marquere et al. 2008; Stape 2002; Guo & Gifford 2002; Ross et al. 2002). Todavia, sob condições de clima subtropical, característico da região Sul do Brasil, com temperaturas mais amenas e chuvas bem distribuídas ao longo do ano, os estudos são mais escassos, sobretudo em árvores do gênero *Eucalyptus*. Nesse sentido, no capítulo 1 quantificou-se os diferentes reservatórios de carbono (biomassa da parte aérea e raízes, solo e serrapilheira), e através de testes não paramétricos e análises de regressão foram selecionadas um conjunto de características do sistema florestal indicadoras do estoque de carbono no solo e nas frações da biomassa vegetal.

A partir das variáveis selecionadas no capítulo 1, a relação entre um conjunto de variáveis do solo sobre o estoque de carbono em diferentes frações do solo foi explorada no capítulo 2. Adicionalmente, investigou-se a relação entre as características químicas de folhas e raízes sobre o estoque de carbono em frações do solo; e o processo de decomposição da serrapilheira, com especial atenção para a degradação da lignina e sua possível influência no estoque de carbono no solo.

Tendo em vista a alta proporção de carbono fixado pela fotossíntese que é liberado diariamente pela respiração, no capítulo 3, investigou-se a magnitude da taxa de respiração das folhas e do caule em árvores jovens e adultas de *E. globulus* em duas estações contrastantes sob clima do Mediterrâneo.

Neste contexto, as seguintes hipóteses foram testadas:

1. Em sistemas florestais manejados, o acúmulo de carbono no solo é diretamente relacionado com a produção de serrapilheira e não é influenciada por fatores abióticos, tais como a disponibilidade de água no solo. Por outro lado, o acúmulo de carbono no caule está diretamente associado aos padrões de alocação de biomassa e com a disponibilidade de água no solo.

2. As características da planta, principalmente a composição química da serrapilheira, são as principais responsáveis pelas variações no estoque de carbono no solo, sendo a concentração de lignina um eficiente indicador do estoque de carbono no solo.

3. A variação ontogenética e a sua relação às variações sazonais, é o principal fator influenciando o balanço de carbono da planta. A medida que as árvores tornam-se maiores e mais velhas, a capacidade de sequestro de carbono é reduzida devido ao aumento das emissões respiratórias de CO₂ no caule e nas folhas.

OBJETIVOS

O objetivo principal deste estudo foi caracterizar os mecanismos ecofisiológicos envolvidos na dinâmica do ciclo do carbono em espécies de *Eucalyptus*, suas respostas às variações ambientais e ontogenéticas, bem como verificar a eficiência de um sistema florestal manejado no sequestro de carbono. De forma mais específica, este trabalho tem como objetivos:

- i) quantificar o estoque de carbono no solo, serrapilheira e biomassa vegetal em um plantio manejado com eucalipto sob clima subtropical;

- ii) selecionar características do solo indicadoras de variação no estoque de carbono no solo e na biomassa;
- iii) verificar a relação entre as características químicas e físicas do solo e o processo de acumulação de carbono em diferentes frações do solo;
- iv) verificar a influência da composição química da serrapilheira e das raízes sobre o acúmulo de carbono em diferentes frações do solo;
- v) investigar a influência de fatores ambientais e ontogenéticos sobre a taxa de emissão de CO₂ respiratório do caule e folhas em árvores jovens e adultas de *E. globulus* durante o verão e o outono, estudo realizado em Portugal sob clima Mediterrâneo.

Referências bibliográficas

BERG, B. & MCCLAUGHERTY, C.A. 2008. Plant Litter: Decomposition, Humus Formation, Carbon Sequestration, 2nd edn. Springer Verlag Heidelberg, Berlin.

BERTHRONG, S.T.; JOBBÁGY, E.G.; JACKSON, R.B. 2009. A global meta-analysis of soil exchangeable cations, pH, carbon and nitrogen with afforestation. *Ecological Applications* 19: 2228-2241.

CELULOSE RIOGRANDENSE. 2011. Disponível em: <http://www.cmpcrs.com.br> Acesso em 20 de janeiro de 2011.

CHRISTENSEN, B.T. 1996. Carbon in primary and secondary organo-mineral complexes. In: Carter, M.R.; Stewart, B.A. (Eds) **Advances in Soil Science – Structure and Organic Matter Storage in Agricultural Soils**. Boca Raton: CRC Lewis Publishers, pp. 97-165.

CROW, S.E.; LAJTHA, K.; FILLEY, T.R.; SWANSTON, C.W.; BOWDENS, R.D.; CALDWELL, B. A. 2009. Sources of plant-derived carbon and stability of organic matter in soil: implications for global change. *Global Change Biology* 15: 1003-2019.

EAMUS, D., MACINNINS-NG, C., HOSE, G.C., ZEPPEL, M.J., TAYLOR, D.T., AND MURRAY, B. 2005. In the service of ecosystem services. *Australian Journal of Botany* 53: 1-19.

EVANS J. 1992. Plantation Forestry in the Tropics, 2edn. Oxford University Press, New York, NY.

FEYERA, S.; BECK, E.; LÜTTGE, U. 2002. Exotic trees as nurse-trees for the regeneration of natural tropical forests. *Trees* 16:245–249

GUO, L.B. & GIFFORD, R.M. 2002. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Global Change Biology* 8:345-360.

HARDWICK, K.; HEALEY, J.; ELLIOTT, S.; GARWOOD, N.; ANUSARNSUNTHORN, V. 1997. Understanding and assisting natural regeneration processes in degraded seasonal evergreen forests in northern Thailand. *Forest Ecology and Management* 99:203–214.

HATTON, T.; REECE, P.; TAYLOR, P.; MCEWAN, K. 1998. Does leaf water efficiency vary among eucalyptus in water-limited environments? *Tree Physiology* 18:529-536.

IPCC. 2003. Climate change 2003: IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme UNEP. Disponível em: www.ipcc.ch Acesso em: 15 nov. 2007.

IPCC (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. CONTRIBUTION of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. UNEP, New York.

JACKSON, R.B. et al. 2005. Trading water for carbon with biological carbon sequestration. *Science* 310: 1944 - 1947.

KEENAN, R.; LAMB, D.; WOLDRING, O.; IRVINE, T.; JENSEN, R. 1997. Restoration of plant biodiversity beneath tropical tree plantations in Northern Australia. *Forest Ecology and Management* 99:117-131.

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

LAGANIÈRE, J.; ANGERS, D.A.; PARÉ, D. 2010. Carbon accumulation in agricultural soils after afforestation: a meta analysis. *Global Change Biology* 16: 439-453.

LORENZ, K & LAL, R. 2010. The Natural Dynamic of Carbon in Forest Ecosystems. In: Lorenz, K & Lal, R (Eds) **Carbon sequestration in Forest Ecosystems**. Springer. Dordrecht, pp. 23-102.

LÜTTGE, U.; BERG, A.; FETENE, M.; NAUKE, P.; PETER, D.; BECK, E. 2003. Comparative characterization of photosynthetic performance and water relations of native trees and exotic plantation trees in an Ethiopian forest. *Trees* 17: 40-50.

MADEIRA, M.; CORTEZ, N.; AZEVEDO, A.; MAGALHÃES, M.C., RIBEIRO, C., FABIÃO, A. 2007. As plantações de eucalipto e o solo. In: Alves, A.M., Pereira, J.S.; SILVA, J.M.N. (Eds) **O Eucaliptal em Portugal: Impactes Ambientais e Investigação Científica**. ISA Press, pp. 137-176,

MARQUERE, V.; CACLAU, J.P.; BERNOUX, M; SAINT-ANDRE, J.; GONÇALVES, J.L.M.; CERRI, C.C.; PICCOLO, M.C.; RANGER, J. (2008). Influence of land use (savanna, pasture, *Eucalyptus* plantations) on soil carbon and nitrogen stocks in Brazil. *European Journal of Soil Science* 59: 863-877.

MEIER, I.C. & LEUSCHNER, C. 2010. Variation of soil and biomass carbon pools in beech forests across a precipitation gradient. *Global Change Biology* 16:1035-1045.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. 2007. Brasil: Campeão do Eucalipto. Disponível em: <http://ftp.mct.gov.br/especial/genolyptus4.htm> Acesso em: 20 janeiro 2011.

ROSS, D.J.; TATE, K.R.; SCOTT, N.A.; WILDE, R.H.; RODDA, N.J.; TOWNSEND, J.A. 2002. Afforestation of pastures with *Pinus radiata* influences soil carbon and nitrogen pools and mineralization and microbial properties. *Australian Journal of Soil Research* 40: 1303-1318.

RUSSEL, A.E.; RAICH, J.W.; ARRIETA, R.B.; BARRANTES, O.V.; GONZÁLEZ, E. 2010. Impacts of individual tree species on carbon dynamics in a moist tropical forest environment. *Ecological Applications* 20: 1087-1100.

SEIDL, R.; RAMMER, W.; JÄGERA, D.; CURRIE, W.S.; LEXER, M.J. 2007. Assessing trade-offs between carbon sequestration and timber production within a framework of multi-purpose forestry in Austria. *Forest Ecology and Management* 248: 64-79.

SIX, J.; CONANT, R.T.; PAUL, A.; PAUSTIAN, K. 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil* 241:155-176.

SOUZA, A. & DAVIDE, A. 2001. Deposição de serapilheira e nutrientes em uma mata não minerada e em plantações de Bracatinga (*Mimosa scabrella*) e de Eucalipto (*Eucalyptus saligna*) em áreas de mineração de bauxita. *Cerne* 7: 101-113.

STAPE, J.L. **Production Ecology of clonal *Eucalyptus* plantations in Northeastern Brazil**. 2002. 237p. Doutorado (Doutorado em Filosofia). Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 2002.

WRIGHT, J.A.; DINICOLA, A.; GAITAN, A. 2002. Latin American Forest plantations – Opportunities for carbon sequestration, economic, development and financial returns. *Journal of Forestry* 98: 20-23.

POOLS DE CARBONO EM UM SISTEMA FLORESTAL MANEJADO COM Eucalyptus saligna (Labill.) SOB CLIMA SUBTROPICAL NA REGIÃO SUL DO BRASIL

Introdução

O contínuo aumento na concentração de dióxido de carbono na atmosfera, resultado da combustão de combustíveis fósseis, de mudanças no uso do solo e do desmatamento para a expansão da agricultura, é um assunto de grande importância devido a suas implicações no aquecimento global e nas mudanças climáticas. No Brasil, as emissões de CO₂ geradas através de atividades industriais são incipientes comparadas aos países desenvolvidos. Entretanto, as emissões relacionadas com o uso da terra são substanciais, com o desmatamento para a expansão de áreas agrícolas e as práticas de preparo do solo sendo os principais contribuintes para o aumento nas emissões de CO₂.

Segundo o IPCC (2007), o florestamento é uma importante alternativa para frear o aumento na concentração de CO₂ atmosférico devido à habilidade do sistema florestal em fixar carbono na biomassa e no solo. A maior potencialidade de retenção de carbono em sistemas florestais está relacionada com o estabelecimento de uma maior biomassa vegetal e um período de rotação mais longo comparado com culturas anuais (Zinn et al. 2002, Zinn et al. 2005). No Brasil, o florestamento com árvores de eucalipto é uma atividade em expansão, devido a sua importância econômica e, principalmente, pelo

rápido crescimento das árvores, apresentando ciclo entre 6 e 7 anos. Atualmente, o país possui a maior área plantada com espécies de *Eucalyptus* do mundo, sendo o maior produtor mundial de celulose (Ministério da Ciência e Tecnologia, 2007).

Apesar dos sistemas florestais apresentarem um grande potencial de sequestro de carbono, principalmente pela capacidade de acúmulo na biomassa (Madeira et al. 2002), resultados contraditórios são observados sobre a capacidade de sequestro de carbono no solo. Estudos sobre a eficiência de acumulação de carbono em áreas com eucalipto no Brasil são conflitantes. Marquere et al. (2008), observaram um aumento no estoque de carbono no solo, enquanto que um decréscimo na camada de 0 – 5 cm foi observado por Zinn et al. (2002) ou ainda, não tiveram efeito sobre o estoque de carbono no solo (Zinn et al. 2005). Entretanto, estes estudos foram realizados em regiões de clima tropical, onde as altas temperaturas acompanhadas pela alta umidade do ar facilitam a assimilação de carbono, mas aceleram o processo de decomposição da matéria orgânica (Paul et al. 2002). Assim, uma maior proporção de CO₂ pode retornar para atmosfera, refletindo uma redução na eficiência de acúmulo de carbono no solo comparada a áreas sob climas com temperaturas mais amenas.

Na região sul do Brasil, caracterizada por um clima subtropical com temperaturas amenas, chuvas regulares ao longo do ano e quatro estações bem definidas, os estudos sobre a eficiência no sequestro de carbono estão restritos ao impacto da agricultura, sobretudo culturas anuais e a influência de técnicas de manejo e preparo do solo (Dieckow et al. 2009; Boddey et al. 2010), bem como aos efeitos do plantio de espécies de *Pinus sp.* (Wiesmeier et al. 2009; Balbinot et al. 2003). Tendo em vista, a expansão de florestas plantadas com eucalipto na região Sul do Brasil e a necessidade de inferir sobre a eficiência e sustentabilidade dessas florestas no sequestro

de carbono, é fundamental quantificar o estoque de carbono dos diferentes componentes do sistema florestal.

Este trabalho teve como objetivo quantificar o estoque de carbono presente no solo, na serapilheira e na biomassa da parte aérea e das raízes e selecionar características de solo capazes de indicar variações no acúmulo de carbono nos diferentes componentes de um sistema florestal com árvores de eucalipto sob clima subtropical na região Sul do Brasil.

Material e Métodos

Local de estudo

O estudo foi desenvolvido em um plantio comercial da empresa Celulose Riograndense (CMPC-RS) localizado no município de Eldorado do Sul, na região fisiográfica da Depressão Central do Estado do Rio Grande do Sul durante o período de Maio de 2009 a Junho de 2010 (figura 1). O solo da área de estudo é classificado como Argissolo Vermelho distrófico típico (Embrapa, 1999), com composição média de 50% de areia, 10% de silte e 40 % de argila. As propriedades físicas do solo das áreas de estudo na profundidade de 0 – 25 e 25 - 50 cm são apresentadas na tabela 1.

O clima na região onde o estudo foi conduzido é tipicamente subtropical do tipo Cfa úmido, segundo classificação climática de Köppen, com quatro estações razoavelmente bem definidas, chuvas bem distribuídas ao longo do ano e temperatura anual média do ar de 24,6 °C. As condições climáticas durante o período experimental na área de estudo foram monitoradas através de uma microestação meteorológica instalada na área de estudo.

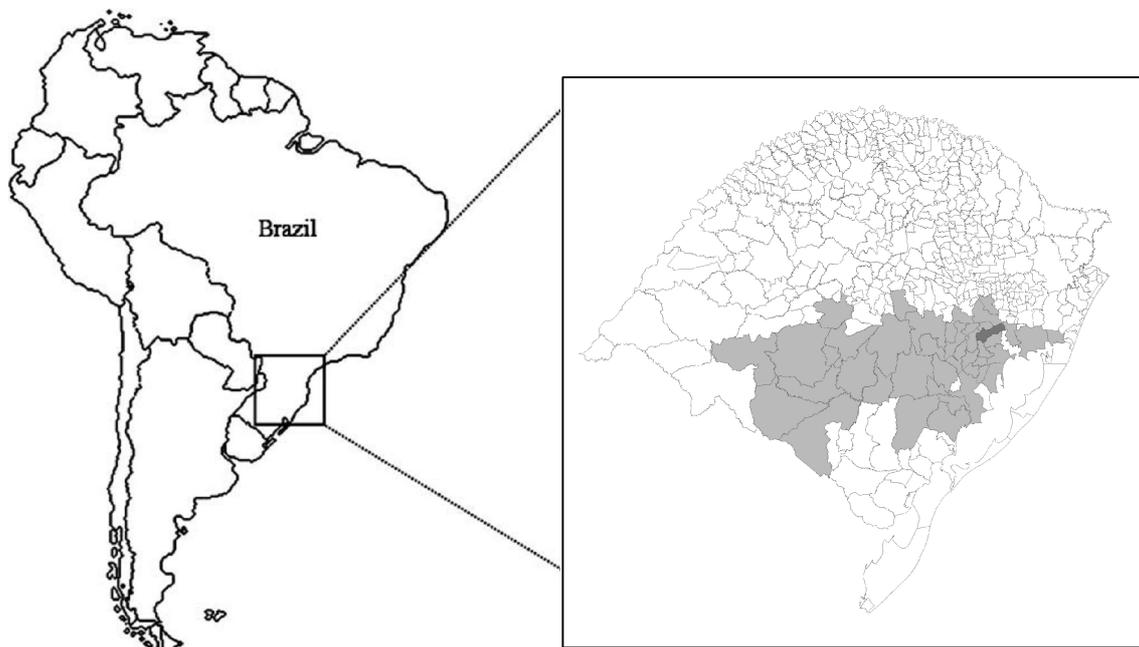


Figura 1. Mapa da América do Sul com a região Sul do Brasil em destaque. Em cinza, observa-se a localização das áreas com plantio de eucalipto na região fisiográfica da Depressão Central do Estado do Rio Grande do Sul. Destacado em cinza escuro, o município de Eldorado do Sul onde está localizada a área experimental de “Terra Dura”.

Tabela 1. Granulometria e densidade do solo nas áreas de estudo. Valores apresentados são médias seguidas pelo erro padrão da média ($n= 3$).

Áreas de estudo	Argila (%)	Areia (%)	Silte (%)	Densidade (g cm ⁻³)
A				
0 - 25 cm	39,3 ± 2,4 (*)	47,7 ± 2,3 (ns)	13,0 ± 0,6 (ns)	0,84 ± 0,09 (ns)
25 - 50 cm	49,7 ± 4,3	38,0 ± 5,2	12,3 ± 0,9	0,84 ± 0,16
B				
0 - 25 cm	45,3 ± 0,7 (*)	40,0 ± 1,2 (*)	14,7 ± 0,7 (*)	0,93 ± 0,05 (ns)
25 - 50 cm	56,3 ± 0,3	31,7 ± 0,3	12,0 ± 0,6	0,88 ± 0,06
C				
0 - 25 cm	48,7 ± 2,7 (*)	38,3 ± 2,2 (ns)	13,0 ± 0,6 (ns)	0,88 ± 0,09 (ns)
25 - 50 cm	52,0 ± 1,0	33,0 ± 0,6	15,0 ± 0,6	0,88 ± 0,02
D				
0 - 25 cm	44,7 ± 0,7 (*)	40,3 ± 1,2 (*)	15,0 ± 0,6 (ns)	0,72 ± 0,15 (ns)
25 - 50 cm	53,0 ± 1,0	34,0 ± 0,6	13,0 ± 1,5	0,87 ± 0,02
E				
0 - 25 cm	42,7 ± 0,7 (*)	43,3 ± 0,3 (*)	14,0 ± 0,6 (ns)	0,97 ± 0,03 (ns)
25 - 50 cm	46,7 ± 1,3	40,7 ± 0,3	12,7 ± 1,2	0,87 ± 0,002
F				
0 - 25 cm	32,0 ± 1,2 (*)	52,7 ± 0,7 (*)	15,3 ± 1,3 (ns)	1,03 ± 0,04 (ns)
25 - 50 cm	38,7 ± 0,7	47,0 ± 0,6	14,3 ± 0,3	0,85 ± 0,06

Asteriscos indicam diferença significativa entre as profundidades para cada área de estudo pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$). ns = não significativo

A área “Terra Dura” (51° 35′ 38, 43” W; 30° 10′ 51, 04” S) onde o estudo foi conduzido compreende um sistema de plantio de eucalipto em mosaicos, caracterizado por diferentes materiais genéticos, em diferentes idades, tipos de solo e períodos de rotação, intercalado com áreas nativas (figura 2). O estudo foi conduzido em uma área com uma população clonal de *Eucalyptus saligna* Labill. (clone 4039) com três anos de idade, na metade do ciclo, em segunda rotação, com 1666 árvores por hectare com espaçamento entre árvores de 4 metros *versus* 1,5 metros. Essas plantações de eucalipto foram estabelecidas em solos tradicionalmente ocupados por campo nativo (*Campos*).

O preparo da área e o plantio das árvores foi realizado no ano de 2006. Inicialmente, o solo foi subsolado na profundidade de 50 cm seguido por aplicação de fosfato nos sulcos (400 Kg/ha). Posteriormente, ocorreu o plantio das mudas seguido de aplicação de herbicida aos 18 e 120 dias após o plantio para evitar a competição com plantas invasoras. Após 120 dias do plantio das mudas, foi realizada uma aplicação de adubação de cobertura com NPK (15: 0,7: 30; 200g/planta). Após o primeiro ano de estabelecimento e crescimento das árvores, não foram realizadas práticas de manejo e adubação na área de estudo.

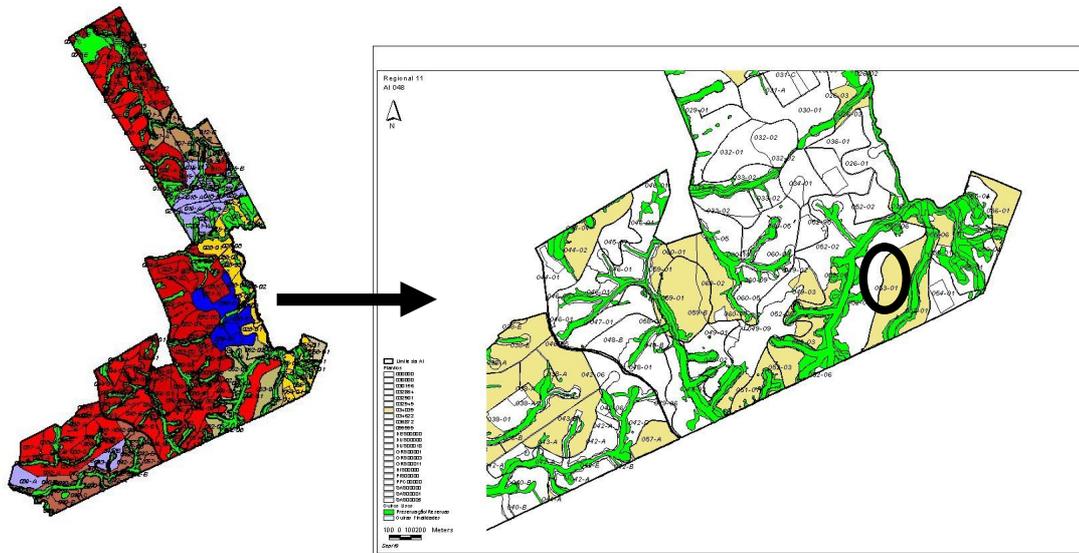


Figura 2. Mapa da área onde o estudo foi conduzido (Terra Dura, Eldorado do Sul, RS), mostrando o mosaico das plantações de eucalipto intercalado com as áreas de preservação de mata nativa (em verde). Destacado em preto, o local onde o estudo foi conduzido.

Estratégia experimental

Dos diversos plantios florestais com eucalipto na região fisiográfica da Depressão Central no Estado do Rio Grande do Sul, a área “Terra Dura” com uma monocultura de *Eucalyptus saligna* (clone 4039) com três anos de idade foi escolhida para estudo devido a representatividade das características do solo e clima desta região em relação a área de cultivo de eucalipto no Estado do RS, pela alta produtividade do material genético e pela idade das árvores, visto que a partir dos três anos de idade ocorre o fechamento da copa das árvores, caracterizando um maior investimento no crescimento do caule (Stape, 2002). Na área de estudo, seis parcelas experimentais com tamanho de 10 x 10 metros foram distribuídas aleatoriamente, com uma distância de 10 metros entre as parcelas e de aproximadamente 10 metros de borda (figura 3), totalizando uma área experimental de 1500 m².

Embora o delineamento experimental tenha sido em blocos casualizados, a análise das características químicas e físicas do solo demonstrou que as parcelas experimentais não foram uniformes quanto às características do solo. A análise da capacidade discriminante das características do solo demonstrou que um determinado conjunto de variáveis é capaz de discriminar as áreas de estudo de acordo com as características químicas e físicas do solo e, portanto, essas áreas não podem ser consideradas unicamente como repetições para a análise do conjunto de parâmetros avaliados neste estudo. Assim, cada parcela experimental foi considerada como uma área de estudo e os diferentes parâmetros avaliados neste estudo foram comparados quanto às diferenças significativas entre as áreas de estudo. Em cada uma das áreas de estudo foram realizadas coletas de solo, de serapilheira e biomassa para caracterização do estoque de carbono orgânico nos diferentes componentes do sistema florestal. Os métodos e a periodicidade das avaliações realizadas estão descritos na tabela 2.

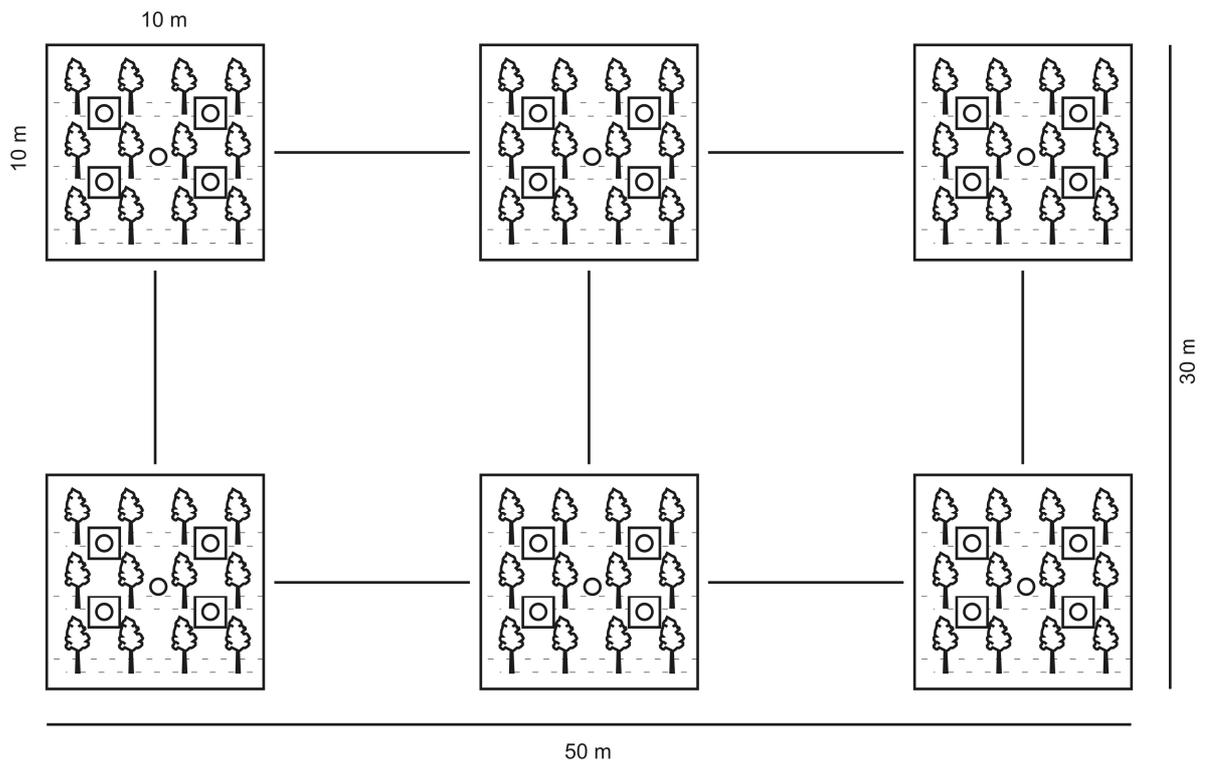


Figura 3. Representação esquemática do delineamento experimental adotado para a coleta de dados e medições de crescimento nas árvores. Quadrados dentro de cada área de estudo representam os coletores de serapilheira e os círculos representam os locais de coleta de solo.

Tabela 2. Métodos e periodicidade das análises para as medições de crescimento e quantificação da concentração de carbono.

Componente	Método	Periodicidade	Conteúdo de Carbono	Amostras/Replicatas
Produção de serrapilheira	Quadrantes (coletores)	Mensal	Fração foliar (sazonal)	4 amostras/área de estudo
Taxa de decomposição foliar	Litterbags	Anual	% de carbono após 12 meses de decomposição	3 subamostras/ área de estudo
Características do solo	Coletas de solo – trado	Anual	-	3 subamostras/ área de estudo
Concentração de carbono no solo	Amostra peneirada (2 mm)	Anual	Carbono Orgânico Total (COT)	3 subamostras/ área de estudo
Crescimento (Altura e DBH)	Medições com fitas métricas	Anual	-	3 - 10 árvores/área de estudo
Biomassa	Corte e pesagem das árvores	Anual	Frações - folha, caule (lenho) e raiz	3 amostras/ área de estudo – P. aérea 1 amostra/área de estudo - Raiz

Levantamento de Dados

Solo

Características do solo

Dentro de cada área de estudo foram realizadas coletas de solo nas profundidades de 0-25 e 25-50 cm, ao final do período experimental, em maio de 2010. As amostras individuais de solo foram coletadas em cinco pontos dentro de cada área de estudo usando um trado graduado e foram homogeneizadas em um amostra composta para cada uma das profundidades. A partir da amostra composta foi realizada análise química e física em triplicata para cada área de estudo. As análises foram realizadas no Laboratório de Solos da Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul de acordo com metodologia proposta por Tedesco *et al.* (1995).

Estoque de carbono orgânico no solo

A análise do conteúdo de carbono orgânico total no solo (COT) foi realizada nas mesmas amostras encaminhadas para a análise química e física do solo. As subamostras coletadas foram inicialmente secas em estufa a 50 °C e peneiradas em peneiras de malha 2 mm. O material resultante da separação em peneira foi moído em almofariz e encaminhado para determinação do conteúdo de carbono orgânico total (COT) em analisador de Carbono Orgânico Total (Shimadzu, modelo TOC-V). O estoque de carbono no solo foi calculado utilizando a equação:

$$\text{Estoque} = \text{Corgânico} * D_s * E * 10 \quad (\text{Equação 1})$$

Onde,

Estoque = estoque de C orgânico (Mg ha⁻¹)

Corgânico = concentração de C orgânico (g kg⁻¹ solo)

Ds = densidade do solo (g cm⁻³)

E = espessura da camada (m)

A avaliação da densidade do solo (Ds) foi realizada segundo Pauletto (1997), utilizando anéis volumétricos metálicos que foram introduzidos no solo com o auxílio de um macaco hidráulico. A densidade do solo na camada 0 – 25 cm foi obtida coletando-se anéis na camada de 5 – 10 cm e 15 – 20 cm. Para as avaliações da densidade na camada de 25 – 50 cm, foram realizadas avaliações na camada de 30 – 35 cm e 40 - 45 cm. A densidade nas profundidades de 0 - 25 cm e 25 - 50 cm foi determinada através dos valores médios de densidade nas profundidades intermediárias apresentadas na tabela 1. A densidade do solo nas diferentes profundidades foi avaliada em cada área de estudo, e as coletas foram realizadas na região central da parcela. Após as coletas de solo com os anéis volumétricos, o solo foi seco a 105 °C e posteriormente pesado. Adicionalmente, o conteúdo gravimétrico de água no solo foi determinado nas mesmas amostras utilizadas para avaliação da densidade do solo, determinando-se a massa do solo após a coleta (massa úmida) e após a secagem em estufa (massa seca).

Serapilheira

Produção de serapilheira

A serapilheira produzida mensalmente foi coletada em coletores de madeira com 0,25 m² de área (0,50 x 0,50 m), 15 cm de profundidade e fundo de tela de nylon de malha fina. Foram distribuídos quatro coletores em cada uma das áreas de estudo,

abaixo das árvores, em maio de 2009. As coletas foram realizadas mensalmente durante o período de junho de 2009 até maio de 2010, totalizando 12 meses de coleta. Depois de retirado o conteúdo de serapilheira, os coletores foram colocados na mesma posição abaixo das árvores. Mensalmente, o material interceptado pelos coletores foi recolhido, e após secagem prévia em estufa a 50 °C por 24h, foi manualmente separado em três frações: folhas, galhos e casca. Após a triagem, cada fração foi novamente seca em estufa a 60 °C até massa constante, e, posteriormente, pesada. Calcularam-se, então, as médias mensais da produção total de serapilheira e de suas frações, em Kg ha⁻¹, para cada área de estudo. A produção anual de serapilheira foi estimada pela soma das médias mensais e expressa em ton ha⁻¹ ano⁻¹.

Concentração de carbono na serapilheira

O estoque de carbono presente na serapilheira foi estimado a partir da média da concentração de carbono presente na fração foliar de serapilheira na primavera e outono e expresso em Mg ha⁻¹ano⁻¹. A concentração sazonal de carbono foi verificada em amostras da fração foliar de serapilheira, previamente maceradas e cerca de dois gramas foram encaminhados para quantificação em analisador de Carbono Orgânico Total (Shimadzu, modelo TOC-V).

Crescimento e Biomassa

O crescimento das árvores foi avaliado em cada área de estudo através de medições do diâmetro na altura do peito e de medições da altura das árvores. As medições do diâmetro na altura do peito foram realizadas em dez árvores em cada área de estudo durante o período final do estudo (maio de 2010). As medições da altura das árvores foram realizadas concomitantemente com as avaliações de biomassa, após a

derrubada das árvores. Para as avaliações de biomassa foram selecionadas aleatoriamente três árvores em cada uma das áreas de estudo para a determinação da altura e biomassa da parte aérea. Devido a questões operacionais, apenas uma árvore em cada área de estudo foi selecionada para a determinação da biomassa de raízes. As avaliações de biomassa foram realizadas através do corte, derrubada e escavação do solo até a profundidade de 150 cm em uma área de 3,14 m² determinada para cada árvore em cada uma das áreas de estudo. Posteriormente, as árvores foram separadas nas frações folha, ramos, lenho, casca, raízes na profundidade de 0-25, 25-50 e 50-150 cm para determinação do peso fresco. Após a pesagem dos componentes, amostras representativas (de 500 a 1500 gramas) de cada um dos componentes foram separadas para avaliação da umidade (secagem em estufa a 60 °C) para determinação do peso seco dos componentes. A partir dos valores de peso seco foram calculados os seguintes índices: razão entre biomassa da parte aérea (caule+ramos+folhas) alocada para a copa (folhas + ramos: parte aérea), proporção de biomassa da parte aérea alocada para o lenho (lenho: parte aérea) e razão entre massa de raízes e massa de folhas (raiz:copa).

Concentração de carbono na biomassa

A concentração de carbono presente na biomassa foi verificada nas frações folha, caule (lenho) e nas raízes na profundidade de 0 - 50 cm, similar a profundidade das análises de solo, em amostras destas frações previamente secas em estufa, pesadas e maceradas. As amostras foram encaminhadas para quantificação do carbono orgânico total presente na frações do material vegetal em analisador de Carbono Orgânico Total (Shimadzu, modelo TOC-V) totalizando três repetições para as frações folha e caule e uma repetição para a fração de raízes, para cada área de estudo.

Concentração de Carbono no Sistema Florestal

O estoque total de carbono no sistema florestal foi estimado pelo somatório dos conteúdos de carbono dos três principais componentes do sistema florestal: solo, serrapilheira e biomassa vegetal, conforme a equação proposta por Ordóñez & Maserá (2001).

Análise dos dados

a) Características das áreas de estudo

Inicialmente, os dados referentes as características químicas e físicas do solo foram submetidos à análise de variância e comparação de médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade utilizando o programa estatístico SigmaPlot 11.0 (Software Inc., Richmond, CA USA), para comparar as variáveis do solo entre as profundidades. Posteriormente, uma análise multivariada foi aplicada para delimitar um conjunto de características do solo que podem ser utilizadas para verificar a heterogeneidade espacial nas características do solo em floresta de eucalipto.

a.1) Análise individual da capacidade discriminante de cada elemento

Inicialmente, foi realizado o teste não-paramétrico de *Kruskall-Wallis* (Levin, 1999) para verificar, individualmente, a capacidade discriminante dos parâmetros da análise química (pH, CTC, fósforo, potássio, alumínio, cálcio trocável, magnésio trocável, enxofre, zinco, boro, cobre, mangânes e nitrogênio) e os parâmetros relacionadas com a textura do solo (teor de argila, silte e areia grossa) determinados a partir das análises de solo realizadas em cada uma das áreas de estudo. Para este procedimento foi utilizado o programa estatístico *Statistica* (Lewick et al. 2007).

Determinação do melhor conjunto de elementos discriminantes

Nesta segunda etapa foi aplicada uma análise discriminante multivariada com o objetivo de avaliar a capacidade discriminante de um conjunto de variáveis para distinguir as seis áreas de estudo. O método utiliza os elementos da análise de solo selecionados pelo teste de *Kruskall-Wallis* da etapa anterior e aplica uma função multivariada discriminante, que avalia a capacidade do conjunto de elementos para detectar a heterogeneidade entre as áreas de estudo. Essa análise permite maximizar a discriminação entre as áreas e minimizar o número de variáveis necessárias. A otimização de um conjunto de variáveis apresenta a vantagem de reduzir a dimensionalidade do problema.

O método é baseado na minimização do índice *Wilks' Lambda* (λ^*), o qual é um componente da análise de variância multivariada (Johnson & Wichern, 1998). Não existe capacidade discriminante (as áreas são consideradas iguais) do conjunto de variáveis selecionadas quando *Wilks' Lambda* é próximo de 1. Valores próximos de zero ocorrem quando a variabilidade dentro do grupo é pequena comparada a variabilidade total, isto é, quando a maior parte da variabilidade total pode ser atribuída à diferença entre os grupos. A significância do valor *Wilks' Lambda* final pode ser estimada considerando a distribuição da lei de *Fischer – Snedecor* (Teste F).

No final dessa etapa tem-se os seguintes resultados: (i) o conjunto de variáveis que fornece a capacidade discriminante para as seis áreas, (ii) o valor parcial λ^* associado a cada variável, que significa o valor total de λ^* caso a variável em questão seja excluída do conjunto e, (iii) o valor gradual de λ^* acumulado que representa o decréscimo gradativo desse valor com a adição de cada variável.

b) Concentração de carbono orgânico e produtividade nas áreas de estudo

Os dados de estoque de carbono orgânico em diferentes profundidades do solo, na serrapilheira, na biomassa e o estoque total de carbono no sistema florestal (solo+serrapilheira+biomassa vegetal) foram submetidos à análise de variância e comparação de médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade utilizando o programa estatístico SigmaPlot 11.0 (Systat Software Inc., Richmond, CA USA), para comparação entre as áreas de estudo. Além disso, os dados de produtividade (produção anual total e das frações de serrapilheira e produção das frações de biomassa) também foram analisados quanto as possíveis variações entre as áreas de estudo.

c) Relação entre o estoque de carbono e o status hídrico do solo

A relação entre o estoque de carbono na biomassa do caule, das folhas e do solo e o conteúdo gravimétrico de água no solo foi verificada através de análises de regressão linear. A significância foi determinada quando $P \leq 0,05$. As análises foram realizadas utilizando SigmaPlot 11.0 (Systat Software Inc., Richmond, CA USA).

Resultados

Condições ambientais durante o estudo

Durante o período de estudo, caracterizado pela influência do fenômeno climático El Niño (NOAA, 2010), os maiores volumes de precipitação foram observados durante a transição do inverno para primavera, merecendo destaque o grande volume de chuvas observado no mês de agosto e durante a primavera, principalmente nos meses de setembro e novembro (Figura 4). Durante o verão, um grande volume de chuvas foi observado no mês de dezembro. A temperatura média anual durante o período de estudo foi de 18,3 °C. No mês de fevereiro de 2010, a temperatura mensal média foi consideravelmente mais elevada (26,1 °C) comparada aos meses de janeiro e março de 2010.

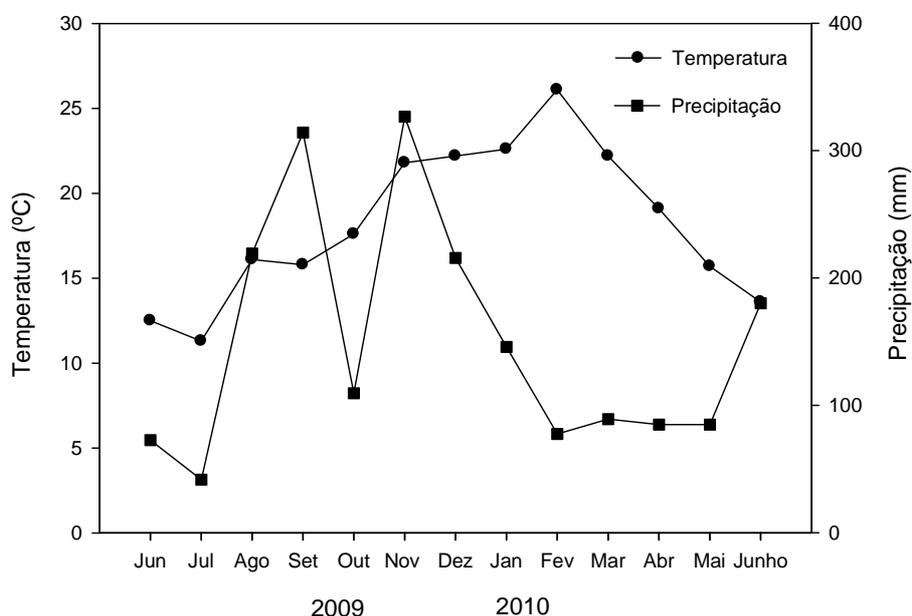


Figura 4. Precipitação mensal (mm) e temperatura média do ar (°C) na área de estudo durante o período de junho de 2009 a junho de 2010.

Heterogeneidade espacial nas características do solo

Dentre as características químicas e físicas do solo avaliadas, a proporção de argila foi a única variável que apresentou diferença significativa entre as profundidades avaliadas em todas as áreas de estudo (tabela 1, 3 e 4). A concentração de cobre, boro, nitrogênio, fósforo, magnésio trocável, razão cálcio: magnésio, CTC e a proporção de silte foram as variáveis que apresentaram menor variação no perfil vertical de solo nas seis áreas de estudo avaliadas. Além de variações no perfil vertical do solo, observou-se através do teste não-paramétrico de *Kruskall-Wallis* que um conjunto de variáveis químicas e físicas do solo apresentam capacidade discriminante, isto é, são capazes de detectar a heterogeneidade espacial entre as áreas de estudo para cada uma das profundidades analisadas.

O conjunto de variáveis selecionadas para a caracterização da heterogeneidade das áreas de estudo, na profundidade de 0 – 25 cm, foram as concentrações de potássio, cálcio trocável, fósforo, magnésio trocável, razão Ca/Mg, cobre, zinco e a percentagem de argila (Tabela 5). Para a profundidade de 25 – 50 cm, o conjunto de variáveis selecionadas foram as concentrações de potássio, magnésio trocável, razão Ca/Mg, enxofre, alumínio, percentagem de argila e pH (Tabela 6).

O teste de *Wilk's Lambda* revelou que mais de 99% da variabilidade entre as áreas de estudo pode ser explicada pelas variáveis selecionadas pelo teste de *Kruskall-Wallis* ($P < 0,01$). Nas tabelas 5 e 6 são mostrados os valores de *Wilk's Lambda* parcial para cada variável. Quanto maior o valor de *Wilk's Lambda* maior é a contribuição da variável para a discriminação das áreas de estudo. Os maiores valores foram observados nas variáveis Cu, Zn e Ca/Mg na profundidade de 0 – 25 cm. Para a profundidade de 25 – 50 cm, os maiores valores foram observados para a concentração de alumínio e a

Tabela 3. Principais características químicas do solo para cada uma das áreas de estudo em duas diferentes profundidades.

Áreas de estudo	pH	CTC	P (mg/dm ³)	K (mg/dm ³)	Al (cmol/dm ³)	Ca _{troc} (cmol/dm ³)	Mg _{troc} (cmolc/dm ³)
A							
0 - 25 cm	4,8 ± 0,18(*)	12,7 ± 0,6(<i>ns</i>)	4,8 ± 0,06(<i>ns</i>)	84,3 ± 0,3(*)	1,6 ± 0,2(*)	2,7 ± 0,2(*)	1,0 ± 0,03 (<i>ns</i>)
25 - 50 cm	4,6 ± 0,0	15,4 ± 1,0	2,2 ± 0,4	71,7 ± 1,3	3,0 ± 0,03	1,2 ± 0,03	0,7 ± 0,03
B							
0 - 25 cm	4,6 ± 0,0(<i>ns</i>)	11,8 ± 0,7(<i>ns</i>)	2,1 ± 0,07(<i>ns</i>)	71,7 ± 2,4(*)	2,7 ± 0,2(*)	1,2 ± 0,1 (<i>ns</i>)	0,7 ± 0,0 (<i>ns</i>)
25 - 50 cm	4,6 ± 0,06	11,3 ± 1,6	1,7 ± 0,2	60,3 ± 2,2	3,5 ± 0,1	1,0 ± 0,03	0,6 ± 0,06
C							
0 - 25 cm	4,8 ± 0,06(*)	11,0 ± 0,3(*)	1,8 ± 0,2(<i>ns</i>)	65,3 ± 2,7(*)	1,5 ± 0,1(*)	2,5 ± 0,03(*)	1,1 ± 0,03(*)
25 - 50 cm	4,6 ± 0,0	13,1 ± 0,6	1,5 ± 0,03	83 ± 1,5	3,4 ± 0,2	1,0 ± 0,1	0,5 ± 0,06
D							
0 - 25 cm	4,7 ± 0,06(<i>ns</i>)	11,2 ± 0,7(<i>ns</i>)	5,1 ± 0,7(<i>ns</i>)	53 ± 2,6(<i>ns</i>)	2,3 ± 0,4(<i>ns</i>)	1,3 ± 0,4 (<i>ns</i>)	0,8 ± 0,2 (<i>ns</i>)
25 - 50 cm	4,7 ± 0,0	11,1 ± 0,7	4,1 ± 0,2	61 ± 5,8	3,0 ± 0,09	0,6 ± 0,07	0,6 ± 0,03
E							
0 - 25 cm	4,6 ± 0,06(*)	9,9 ± 0,4(<i>ns</i>)	3,2 ± 0,4(*)	43 ± 0,6(*)	2,1 ± 0,06(*)	1,3 ± 0,07(*)	0,7 ± 0,03(*)
25 - 50 cm	4,4 ± 0,0	11,2 ± 0,5	1,6 ± 0,06	38 ± 1,2	3,0 ± 0,3	0,6 ± 0,1	0,4 ± 0,03
F							
0 - 25 cm	4,7 ± 0,06(*)	8,2 ± 0,09(*)	9,8 ± 1,2(*)	25,3 ± 0,9(*)	1,3 ± 0,06(*)	1,7 ± 0,09(*)	0,3 ± 0,0 (<i>ns</i>)
25 - 50 cm	4,6 ± 0,06	9,5 ± 0,4	4,2 ± 1,0	23,7 ± 0,9	2,3 ± 0,09	1,0 ± 0,2	0,4 ± 0,06

Tabela 4. continuação.

Áreas de estudo	Ca/Mg	N (%)	S (mg/dm ³)	Zn (mg/dm ³)	Cu (mg/dm ³)	B (mg/dm ³)	Mn (mg/dm ³)
A							
0 - 25 cm	2,57 ± 0,15(*)	0,09 ± 0,01(<i>ns</i>)	12,7 ± 0,7(*)	0,8 ± 0,03(*)	0,9 ± 0,03(<i>ns</i>)	0,7 ± 0,03(<i>ns</i>)	11,7 ± 0,9(*)
25 - 50 cm	1,7 ± 0,12	0,08 ± 0,01	18,3 ± 1,2	0,5 ± 0,03	0,7 ± 0,03	0,7 ± 0,03	2,7 ± 1,2
B							
0 - 25 cm	1,57 ± 0,17(<i>ns</i>)	0,09 ± 0,0(<i>ns</i>)	7,7 ± 0,2(*)	0,5 ± 0,03(*)	0,6 ± 0,0(<i>ns</i>)	0,6 ± 0,03(<i>ns</i>)	3,0 ± 1,0(<i>ns</i>)
25 - 50 cm	1,6 ± 0,1	0,09 ± 0,0	11,3 ± 0,7	0,3 ± 0,03	0,6 ± 0,09	0,6 ± 0,03	2,7 ± 0,7
C							
0 - 25 cm	2,27 ± 0,09(<i>ns</i>)	0,10 ± 0,0(<i>ns</i>)	14,0 ± 0,6(<i>ns</i>)	0,6 ± 0,09(*)	0,7 ± 0,1(<i>ns</i>)	0,7 ± 0,03(<i>ns</i>)	5,0 ± 1,1(*)
25 - 50 cm	2,1 ± 0,18	0,08 ± 0,0	14,3 ± 0,7	0,3 ± 0,03	0,5 ± 0,07	0,6 ± 0,03	1,7 ± 0,3
D							
0 - 25 cm	1,6 ± 0,23(<i>ns</i>)	0,09 ± 0,01(<i>ns</i>)	12,0 ± 0,0(*)	0,5 ± 0,03(<i>ns</i>)	0,4 ± 0,03(<i>ns</i>)	0,6 ± 0,06(<i>ns</i>)	6,0 ± 1,7(<i>ns</i>)
25 - 50 cm	1,1 ± 0,07	0,09 ± 0,0	13,3 ± 0,3	0,4 ± 0,07	0,5 ± 0,07	0,6 ± 0,2	3,3 ± 0,3
E							
0 - 25 cm	1,7 ± 0,03(<i>ns</i>)	0,09 ± 0,0(*)	13,7 ± 1,2(*)	0,5 ± 0,03(<i>ns</i>)	0,5 ± 0,03(<i>ns</i>)	0,5 ± 0,1(<i>ns</i>)	8,3 ± 0,7(*)
25 - 50 cm	1,5 ± 0,23	0,08 ± 0,0	23 ± 1,0	0,3 ± 0,03	0,4 ± 0,0	0,8 ± 0,07	3,3 ± 0,3
F							
0 - 25 cm	5,7 ± 0,33(*)	0,06 ± 0,0(<i>ns</i>)	14,3 ± 1,3(<i>ns</i>)	0,3 ± 0,03(<i>ns</i>)	0,5 ± 0,0(<i>ns</i>)	0,6 ± 0,03(<i>ns</i>)	7,0 ± 0,0(*)
25 - 50 cm	2,5 ± 0,09	0,06 ± 0,0	16 ± 0,6	0,2 ± 0,03	0,5 ± 0,03	0,4 ± 0,1	2,3 ± 0,3

Asteriscos indicam diferença significativa entre as duas profundidades ($P < 0,05$). Valores são médias ± erro padrão da média ($n=3$).

percentagem de argila. A percentagem de argila apresentou valores semelhantes de *Wilk's Lambda* nas duas profundidades avaliadas.

Tabela 5. Valor parcial de *Wilk's Lambda* (Λ^*) associado a cada variável para a profundidade de 0 – 25 cm.

	K	Ca/Mg	Catroc	Mgtroc	P	Argila	Cu	Zn
<i>Wilk'S</i>	0,014	0,342	0,145	0,169	0,142	0,168	0,443	0,322

Lambda

Valor total minimizado de *Wilk's Lambda* para o conjunto de variáveis = 0,010.

Tabela 6. Valor parcial de *Wilk's Lambda* (Λ^*) associado a cada variável para a profundidade de 25 – 50 cm.

	K	Ca/Mg	Mgtroc	Argila	pH	Al	S
<i>Wilk'S</i>	0,06	0,09	0,08	0,15	0,05	0,25	0,02

Lambda

Valor total minimizado de *Wilk's Lambda* para o conjunto de variáveis = 0,010.

Concentração de carbono orgânico no solo

A concentração de carbono orgânico total no solo (COT) apresentou um marcado efeito vertical com os maiores valores sendo observados na profundidade de 0 – 25 cm (Figura 5). Entretanto, apenas nas áreas de estudo C, D e F essa diferença foi significativa em relação ao conteúdo de carbono na profundidade de 25 – 50 cm ($P \leq 0,05$). Os valores de COT variaram de 10,1 e 17,5 g Kg⁻¹ para a profundidade de 0 – 25 cm, e na camada de 25 – 50 cm estiveram entre 8,8 e 13,5 g Kg⁻¹.

O estoque de carbono no solo na floresta de eucalipto foi analisado com relação às possíveis variações entre as áreas de estudo (tabela 9). O estoque total (0 – 50 cm) não apresentou diferença entre seis as áreas de estudo ($P = 0,129$). Entretanto, quando o

estoque foi comparado em cada uma das profundidades analisadas, as diferenças entre as áreas de estudo tornam-se mais evidentes. Na profundidade de 0 – 25 cm, as diferenças entre as áreas de estudo foram mais marcadas ($P < 0,001$). Nessa profundidade, a área de estudo C apresentou ao maior estoque de carbono no solo ($38,6 \text{ Mg ha}^{-1}$), enquanto que as áreas de estudo A e F apresentaram os menores valores de estoque de carbono ($26,07$ e $26,05 \text{ Mg ha}^{-1}$, respectivamente). Na profundidade de 25 – 50 cm também foram observadas diferenças significativas entre as áreas de estudo ($P = 0,003$); porém foram menos acentuadas em relação a profundidade de 0 – 25 cm. O estoque de carbono na profundidade de 25 – 50 cm foi semelhante nas áreas de estudo B, C, D e E, enquanto que nas áreas de estudo A e F foi significativamente menor ($19,9$ e $17,3 \text{ Mg ha}^{-1}$, respectivamente).

Os menores valores de estoque de carbono (A e F) foram associados aos menores teores de argila, nas duas profundidades de solo (tabela 1 e 9). Além disso, os menores valores de estoque de carbono foram associados com os maiores valores de Ca/Mg e aos menores valores de zinco, potássio e magnésio, sobretudo na área F. Na profundidade de 25 - 50 cm, o menor estoque de carbono na área F foi associado com a menor concentração de alumínio (tabela 2, 3 e 9).

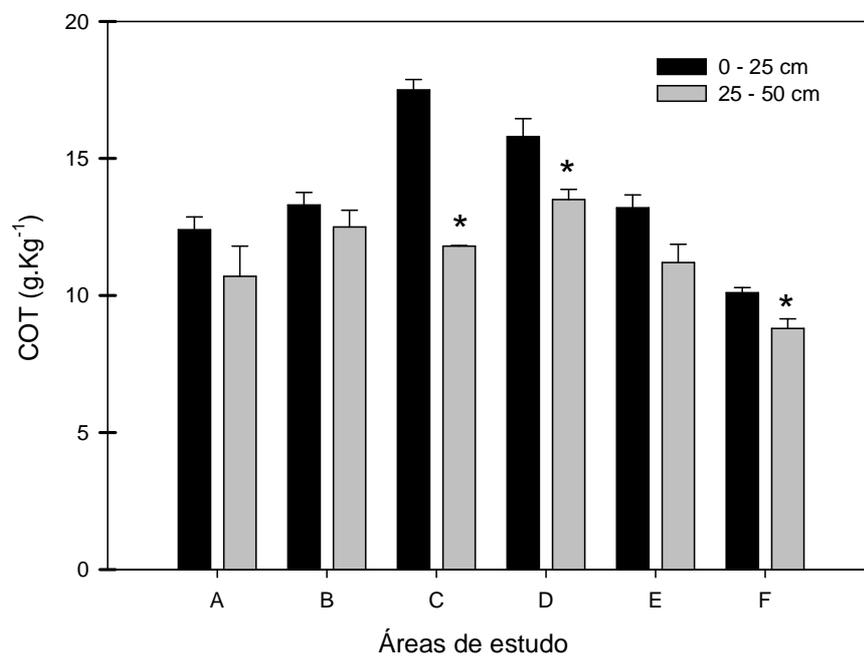


Figura 5. Concentração de carbono orgânico total no solo nas profundidades de 0 – 25 cm e 25 – 50 cm em cada uma das áreas de estudo. Valores são médias \pm erro padrão ($n = 3$). *Asteriscos* indicam diferença significativa entre as duas profundidades pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância ($P \leq 0,05$).

Tabela 9. Estoque de carbono no solo (Mg ha^{-1}) em mata de eucalipto nas seis áreas de estudo em cada uma das profundidades avaliadas e o estoque total de carbono no solo (0-50 cm).

Áreas de estudo	Profundidade		COT (0 – 50 cm)
	0 – 25 cm	25 – 50 cm	
A			
Média	26,1 ± 1,0 (c)	22,5 ± 2,3 (b)	48,5 ± 1,3 (a)
Faixa	24,1 – 27,3	19,9 – 27,1	47,2 – 51,2
B			
Média	32 ± 1,1 (b)	27,5 ± 1,4 (a)	58,5 ± 2,4 (a)
Faixa	29,1 – 32,7	25,4 – 30,1	54,5 – 62,8
C			
Média	38,5 ± 0,8 (a)	25,8 ± 0,1 (a)	57,3 ± 7,7 (a)
Faixa	36,9 – 39,8	25,8 – 25,9	41,8 – 65,7
D			
Média	28,4 ± 1,2 (bc)	29,4 ± 0,8 (a)	57,8 ± 1,5 (a)
Faixa	26,1 – 19,6	28,1 – 30,9	55,2 – 60,5
E			
Média	31,9 ± 1,2 (b)	24,4 ± 1,5 (ab)	56,4 ± 1,3 (a)
Faixa	30,5 – 34,2	22,5 – 27,3	53,9 – 58,5
F			
Média	26,1 ± 0,5 (c)	18,8 ± 0,8 (b)	44,8 ± 1,3 (a)
Faixa	25,1 – 26,5	17,3 – 19,6	42,3 – 46,1

Valores são médias ± erro padrão da média em parênteses. ($n = 3$).

Letras nos parênteses indicam diferença estatística entre as áreas de estudo ($P \leq 0,05$).

Produção de serrapilheira

A produção de serrapilheira foi contínua durante todo o período experimental; porém, as quantidades produzidas foram variáveis conforme a época do ano (Figura 6). Os picos de maior produção foram verificados nos meses de agosto e novembro em todas as áreas amostradas. Apesar da grande variação mensal observada na queda de folhas, estas sempre representaram a maior parte do material coletado, o que indica o papel preponderante desta fração na determinação da produtividade em floresta de eucalipto (Figura 7a). A fração ramos foi a segunda que mais contribuiu para a produção total de serrapilheira. As áreas de estudo apresentaram diferenças substanciais na produção anual da fração foliar de serrapilheira ($P= 0,015$); entretanto a produção total e as frações ramos e casca não diferiram entre as áreas de estudo (Figura 7b). Os valores de produção da fração foliar de serrapilheira, variaram entre 7,17 e 8,36 $\text{ton ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$. A maior produção foliar de serrapilheira foi observada na área A em relação as outras áreas de estudo.

A produção de serrapilheira não apresentou uma relação significativa com os parâmetros climáticos de precipitação e temperatura. Entretanto, os resultados indicam uma maior produção de serrapilheira nos meses de agosto e novembro, período do ano em que foram observados os maiores volumes de precipitação.

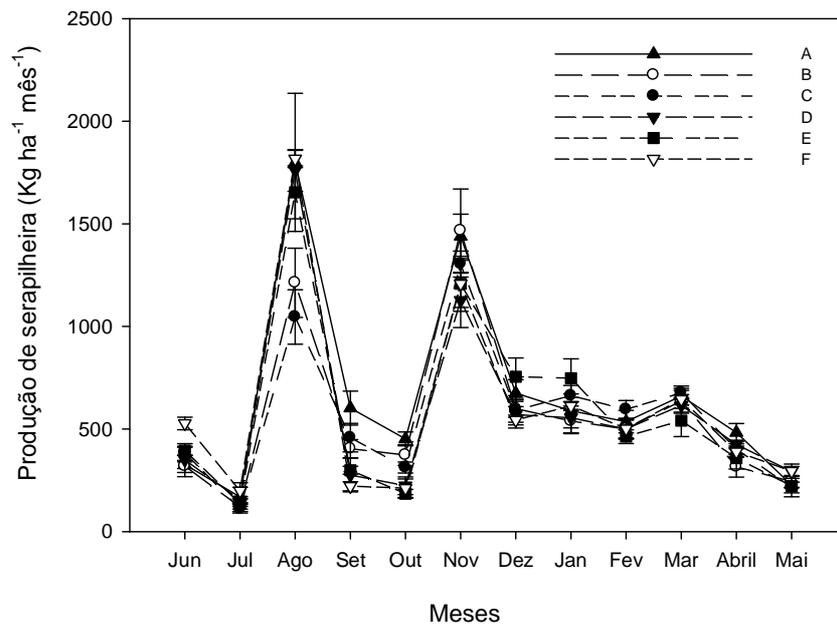


Figura 6. Produção mensal de serapilheira (fração foliar) ao longo de um ano de avaliação nas diferentes áreas de estudo. Valores são médias mensais \pm erro padrão da média (n= 4) para cada uma das seis áreas de estudo.

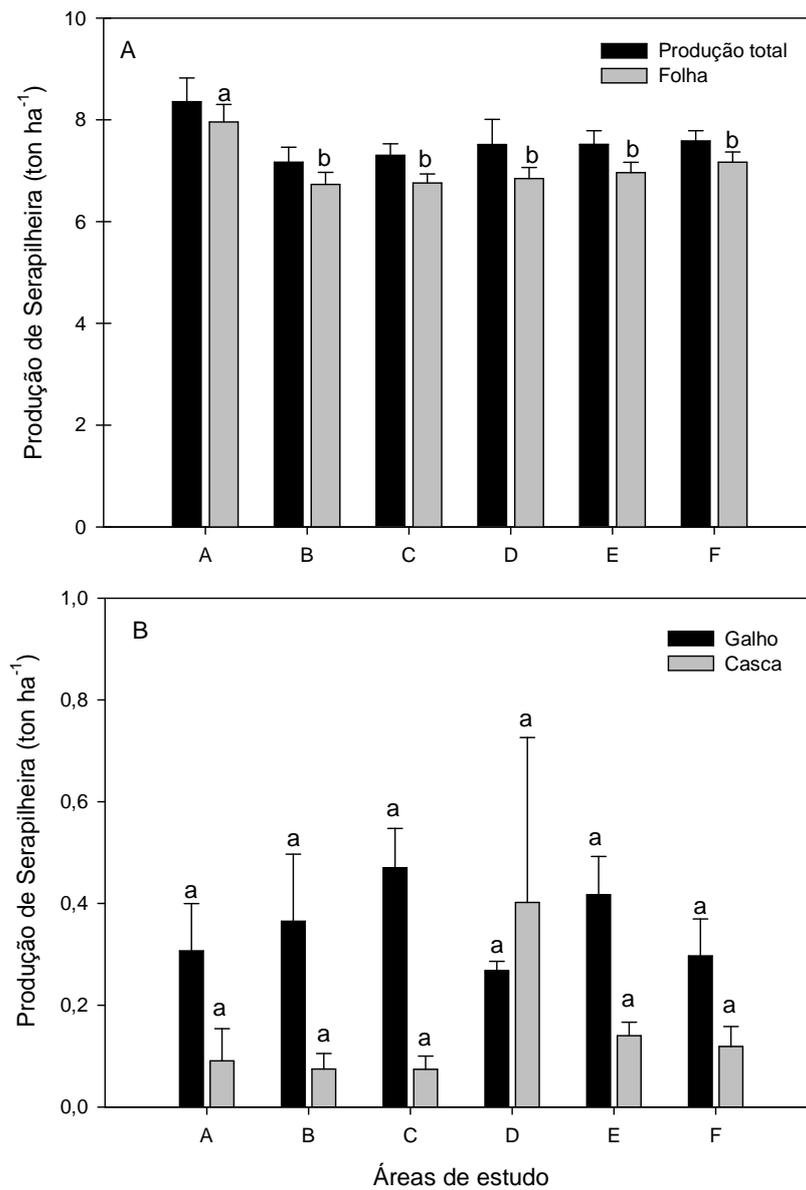


Figura 7. Produção anual de serrapilheira nas áreas de estudo. (A) Produção total e produção da fração foliar de serrapilheira. (B) Produção da fração ramos da fração casca. Valores são médias \pm erro padrão da média ($n=4$). Letras distintas indicam diferença significativa entre as áreas de estudo para a produção total e da fração foliar de serrapilheira ($P \leq 0,05$).

Concentração de carbono orgânico na serrapilheira

A concentração de carbono (%) presente na fração foliar de serrapilheira foi em média de 49,6 % e não apresentou diferença significativa entre as áreas de estudo ($P=0,649$) (figura 8). Todavia, o estoque de carbono na serrapilheira foi significativamente diferente entre as áreas de estudo ($P=0,012$) (figura 9). O estoque de carbono orgânico na serrapilheira foi significativamente maior na área A em relação às outras áreas de estudo (figura 8). O maior estoque de carbono na fração foliar de serrapilheira, observado na área A, foi associado com uma maior produção de serrapilheira. Nas outras áreas de estudo, a produção e o estoque de carbono na serrapilheira foram semelhantes (figuras 7a e 9).

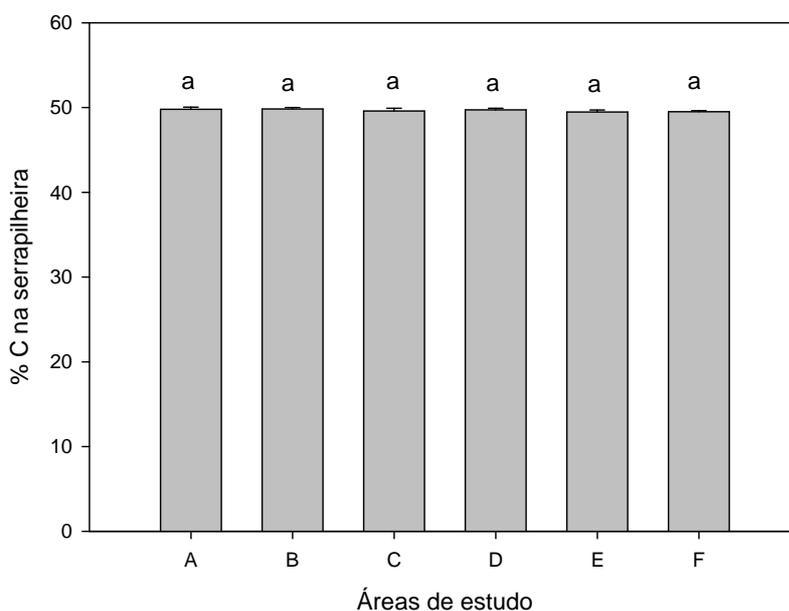


Figura 8. Concentração de carbono orgânico (%) na fração foliar da serrapilheira nas seis áreas de estudo. Valores são médias \pm erro padrão da média ($n=4$). Letras idênticas indicam a ausência de diferença significativa entre as áreas de estudo ($P \leq 0,05$).

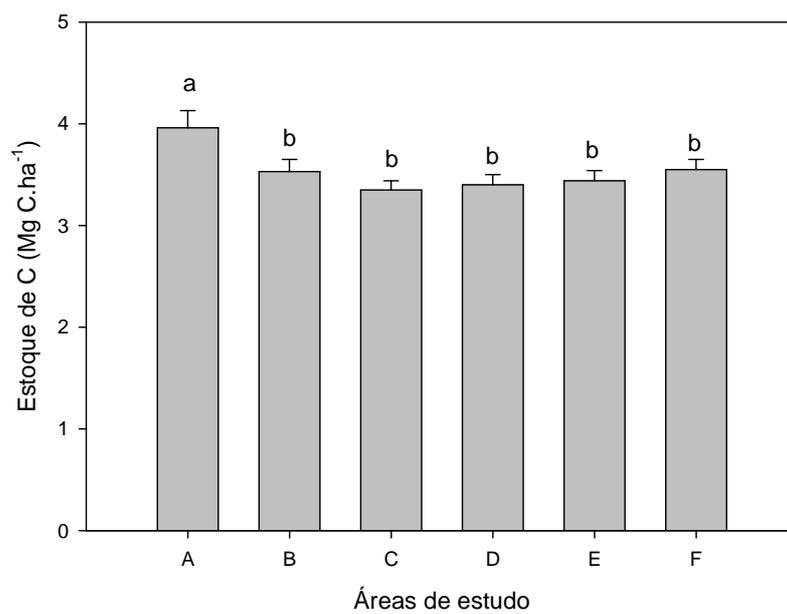


Figura 9. Estoque de carbono na fração foliar de serrapilheira nas seis áreas de estudo. Valores são médias \pm erro padrão da média ($n= 4$). Letras distintas indicam diferença significativa entre as áreas de estudo ($P \leq 0,05$).

Crescimento e Biomassa

Os parâmetros de crescimento e biomassa não apresentaram diferença significativa entre as áreas de estudo ($P > 0,10$). Na população clonal de eucalipto com 4 anos de idade, não foram observadas diferenças significativas em relação à produção total de biomassa e suas frações, padrões de alocação de biomassa, altura das árvores e DBH (Tabela 11).

Entretanto, algumas características associadas com árvores de rápido crescimento e sistemas silviculturais de curta rotação foram observadas. O caule apresentou o maior acúmulo de biomassa comparada às frações casca, folhas e raízes (Figura 10). Além disso, observou-se um menor acúmulo de biomassa nas folhas e nas raízes, o que vai de acordo com a característica de monoculturas de árvores, com um fechamento da copa até os 3 anos de idade e uma maior investimento em altura. Os padrões de alocação de biomassa acompanharam essas características, com a maior alocação de biomassa total da parte aérea para o lenho comparada com a biomassa alocada para a copa (80% e ~ 10%, respectivamente) (Tabela 11).

Tabela 11. Parâmetros de crescimento e padrões de alocação de biomassa em árvores de eucalipto com quatro anos de idade.

Áreas de estudo	Altura (m)	DBH (cm)	Raiz: Copa	Lenho: P.A	Copa: P.A
A	19,4 ± 1,3	15,9 ± 0,6	0,4	0,8 ± 0,0	0,1 ± 0,0
B	21,6 ± 0,3	17,4 ± 0,4	0,1	0,8 ± 0,0	0,1 ± 0,0
C	20,4 ± 0,7	16,0 ± 0,8	0,5	0,9 ± 0,0	0,1 ± 0,0
D	20,8 ± 0,8	14,3 ± 1,3	0,3	0,8 ± 0,0	0,1 ± 0,0
E	20,9 ± 0,8	15,9 ± 0,6	0,3	0,8 ± 0,0	0,1 ± 0,0
F	20,5 ± 0,7	15,4 ± 0,6	0,3	0,8 ± 0,0	0,1 ± 0,0

Valores são médias ± erro padrão da média em parênteses. ($n = 3$; altura e padrões de alocação; $n = 1$; Raiz:Copa; $n = 10$; DBH). P.A= parte aérea (caule+ramos+folhas).

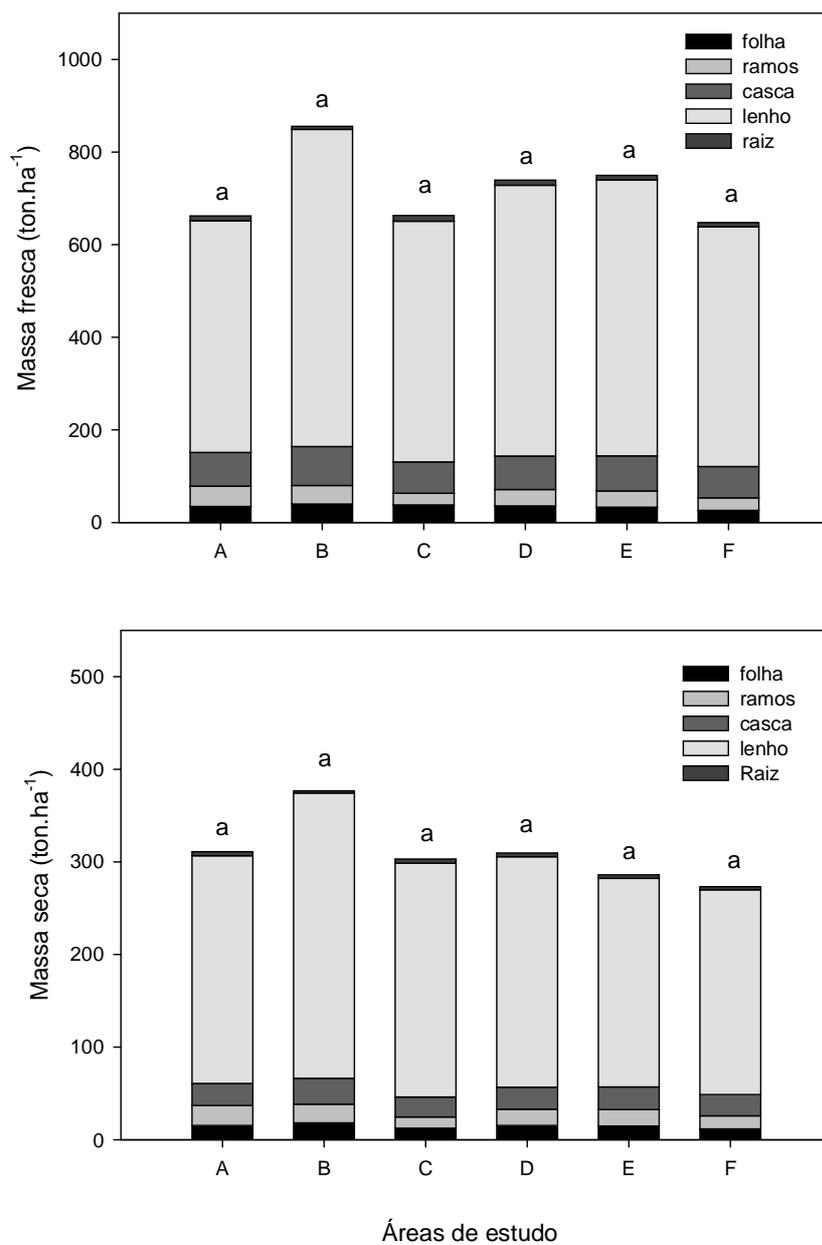


Figura 10. Massa úmida (A) e seca (B) dos diferentes componentes da biomassa nas áreas de estudo. Valores são médias \pm erro padrão da média (n= 3;1). Letras idênticas indicam a ausência de diferença significativa entre as áreas de estudo ($P \leq 0,05$).

Carbono orgânico na biomassa

O estoque de carbono orgânico nas diferentes frações da biomassa não foi significativamente diferente entre as áreas de estudo. Todavia, acompanhando o padrão de alocação de biomassa, o maior estoque de carbono foi observado no lenho, seguido pelas folhas. As raízes na profundidade de 0 – 50 cm apresentaram o menor estoque de carbono entre as frações analisadas (Tabela 12).

Tabela 12. Estoque de carbono (Mg ha^{-1}) nos componentes da biomassa nas diferentes áreas de estudo.

Áreas de estudo	Folha	Lenho	Raízes (0 – 50 cm)	Total
A	$7,6 \pm 2,6$	$109,6 \pm 29,0$	1,36	$118,5 \pm 31,6$
B	$8,9 \pm 0,5$	$140,6 \pm 9,5$	0,94	$150,5 \pm 10,0$
C	$6,0 \pm 2,1$	$115,2 \pm 20,5$	1,78	$123,1 \pm 22,4$
D	$7,5 \pm 1,5$	$114,2 \pm 18,2$	1,65	$123,9 \pm 19,7$
E	$7,3 \pm 1,8$	$103,0 \pm 16,9$	1,40	$111,7 \pm 17,6$
F	$5,7 \pm 1,5$	$100,8 \pm 19,3$	1,23	$107,8 \pm 20,8$

Valores são médias \pm erro padrão da média em parênteses. ($n = 1- 3$, raiz; parte aérea).

Carbono orgânico no sistema florestal

O estoque total de carbono no sistema florestal não apresentou diferença significativa entre as áreas de estudo ($P= 0,598$) (Tabela 13). O carbono presente na biomassa foi o principal componente da concentração total de carbono no sistema florestal, sobretudo pela alta concentração de carbono presente no caule das árvores (Tabela 12). O carbono do solo (0 – 50 cm) foi o segundo principal componente do estoque total de carbono do sistema florestal (Tabela 13). A serrapilheira representou a

menor proporção no sistema florestal. A ausência de diferença significativa no estoque total de carbono no sistema florestal apesar das diferenças observadas na concentração de carbono no perfil vertical do solo e na serrapilheira, deve-se principalmente à maior contribuição do estoque de carbono presente na biomassa das árvores sobre o carbono total do sistema florestal (65 e 71%).

Tabela 13. Estoque total de carbono nos diferentes componentes do sistema florestal nas diferentes áreas de estudo.

Áreas de estudo	Biomassa vegetal (Mg C ha ⁻¹)	Serapilheira (Mg C ha ⁻¹)	Solo 0 – 50 cm (Mg C ha ⁻¹)	Estoque total (Mg C ha ⁻¹)
A	118,5 ± 31,6 <i>(69,4%)</i>	3,9 ± 0,2 <i>(2,3%)</i>	48,5 ± 1,3 <i>(28,3%)</i>	171,1 ± 32,0
B	150,5 ± 10,0 <i>(70,9%)</i>	3,5 ± 0,1 <i>(1,6%)</i>	58,5 ± 2,4 <i>(27,6%)</i>	212,2 ± 11,7
C	123,1 ± 22,4 <i>(66,9%)</i>	3,4 ± 0,1 <i>(1,8%)</i>	57,3 ± 7,7 <i>(31,2%)</i>	183,8 ± 22,6
D	123,9 ± 19,7 <i>(67,2%)</i>	3,4 ± 0,1 <i>(1,8%)</i>	57,8 ± 1,5 <i>(31,3)</i>	184,5 ± 20,9
E	111,7 ± 17,6 <i>(65,1%)</i>	3,4 ± 0,1 <i>(2,0%)</i>	56,4 ± 1,3 <i>(32,9%)</i>	171,6 ± 18,2
F	107,8 ± 20,8 <i>(69%)</i>	3,6 ± 0,1 <i>(2,3%)</i>	44,8 ± 1,3 <i>(28,7%)</i>	156,3 ± 19,8
<i>teste T</i> (valor de P)	0,773	0,012	0,129	0,598

Valores correspondem ao estoque médio de carbono por parâmetro avaliado ± erro padrão da média. Destacado em *itálico* a percentagem correspondente de cada componente em relação ao estoque total de carbono.

Influência das condições hídricas no estoque de carbono

Na análise de regressão linear, o conteúdo de carbono orgânico no solo não apresentou uma correlação significativa com o conteúdo de água no solo ($P= 0,226$) (Figura 11A). Em contraste, o estoque de carbono na biomassa das folhas foi fortemente influenciado pelo conteúdo de água no solo, com o estoque de carbono nas folhas aumentado significativamente com a maior disponibilidade de água no solo ($P\leq 0,05$) (figura 11B). O estoque de carbono na biomassa do caule tende a aumentar com o maior conteúdo de água no solo ($P= 0,07$) (figura 11C).

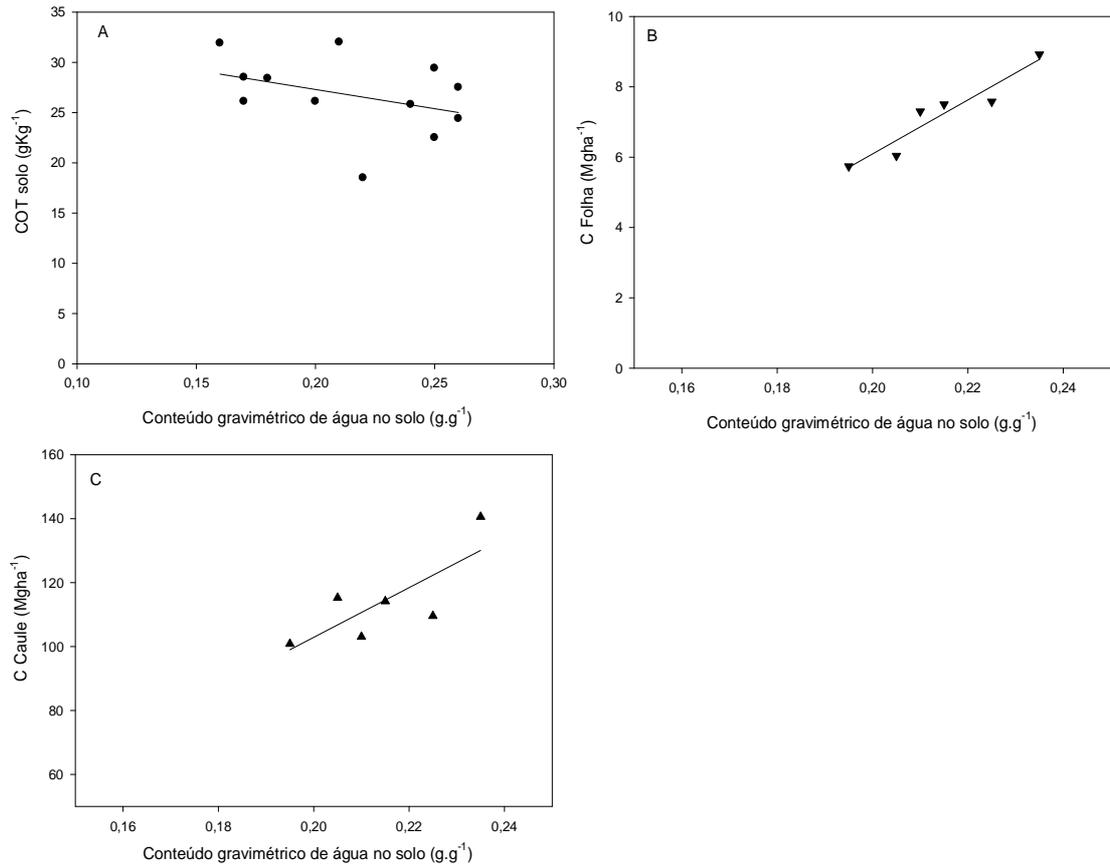


Figura 11. (A) Relação entre o conteúdo gravimétrico de água no solo e a concentração de carbono no solo ($R^2 = 0,14$; $P = 0,226$). (B) Relação entre o estoque de carbono na biomassa das folhas e o conteúdo gravimétrico de água no solo ($R^2 = 0,90$; $P \leq 0,05$). (C) Relação entre o estoque de carbono na biomassa do caule e o conteúdo gravimétrico de água no solo ($R^2 = 0,60$; $P = 0,07$). Valores de conteúdo gravimétrico de água no solo são a média das duas profundidades avaliadas. Valores de carbono no solo e na biomassa são a média para cada área de estudo. ($n = 3/\text{área de estudo}$).

Discussão

Nossos resultados indicaram que, no sistema florestal com árvores jovens (três para quatro anos de idade) de *E. saligna*, a maior acumulação de carbono ocorreu na biomassa, sobretudo na fração do caule, seguido pelo acúmulo de carbono no solo. A fração foliar da biomassa, a serrapilheira e a fração de raízes da biomassa, respectivamente, representaram uma menor proporção do estoque total de carbono no sistema florestal. Resultados semelhantes foram observados por Madeira et al. (2002) em plantações de *Eucalyptus globulus* em Portugal, por Ordóñez et al. (2008) em florestas de *Pinus sp.* e de carvalho no México, por Usuga et al. (2010) em florestas tropicais na Colômbia e por Meier & Leuschner (2010) em florestas de *Fagus sylvatica* na Europa.

Convencionalmente, os componentes do sistema florestal são classificados em diferentes *pools* de carbono orgânico. O carbono presente na biomassa do caule e no solo representa um *pool* de carbono mais estável enquanto que o carbono presente na serrapilheira, na biomassa das frações folha e raízes representam uma fração de carbono mais lábil (Norby et al. 2002). Neste estudo, o *pool* de carbono mais estável foi a principal fração no sistema florestal, representando cerca de 98% do carbono total. O estoque de carbono na biomassa do caule representou em média 68% do carbono total, enquanto que o carbono presente no solo representou em média 30% do carbono total no sistema florestal. Outros 2% foram alocados para os *pools* mais lábeis.

As condições microclimáticas foram iguais entre as áreas de estudo, e dessa forma, os efeitos de variações climáticas no acúmulo de carbono não foram consideradas como possíveis variáveis para o estoque de carbono nos diferentes componentes em floresta de eucalipto.

O estoque de carbono nas diferentes frações da biomassa, tanto em *pools* mais estáveis como lábeis, não foi significativamente diferente entre as áreas de estudo. A ausência de diferença significativa entre as áreas de estudo no estoque de carbono nas frações da biomassa já era esperada, visto que o local de estudo compreende uma população clonal de eucalipto e as diferenças entre as áreas de estudo, detectadas pelo conjunto de variáveis selecionadas pelo teste de *Kruskall-Wallis*, estão restritas à variações espaciais nas características do solo. Todavia, o conteúdo de água no solo exerceu um efeito positivo no acúmulo de carbono na biomassa, sobretudo na fração foliar e dessa forma, pode ser considerado como um eficiente indicador do estoque de carbono na biomassa das árvores. A variação na disponibilidade de água no solo pode também ser associada as variações no teor de argila, selecionada como uma das variáveis de solo indicadora das diferenças entre as áreas de estudo.

Estudos recentes que investigaram o efeito da irrigação e fertilização sobre a produção e alocação de biomassa em plantações de eucalipto apontaram um efeito positivo da irrigação na produção de madeira e estoque de carbono no caule (Stape et al. 2008; Madeira et al. 2002), e esse efeito foi associado com uma maior alocação de carboidratos para o caule (Ryan et al. 2010). Entretanto, a produção e alocação de biomassa para o caule e o estoque de carbono no caule não foram afetadas pela fertilização (Stape et al. 2008; Madeira et al. 2002).

Neste estudo, o estoque de carbono nas folhas e no caule apresentaram uma forte tendência de aumento com o maior conteúdo de água no solo, apesar da ausência de uma relação significativa entre o carbono do caule e o conteúdo de água no solo. A alta correlação observada entre o estoque de carbono nas folhas e o conteúdo de água no solo corrobora os resultados observados Ryan et al. (2010), indicando que a maior

disponibilidade de água no solo parece aumentar o estoque de carbono do caule devido a maior alocação de carboidratos das folhas para este componente.

Os resultados observados neste estudo aliados aos resultados observados por Madeira et al. (2002), Stape et al. (2008) e Ryan et al. (2010), indicam que a produção e acúmulo de carbono na biomassa de eucalipto, sobretudo no caule, parecem ser mais influenciadas por variações nas condições ambientais, sobretudo a disponibilidade de água no solo e/ou tratamentos de irrigação, do que por variações na disponibilidade de nutrientes.

A ausência de um efeito significativo das variações espaciais das características do solo sobre o estoque de carbono na biomassa observada neste estudo, associada com a ausência de um efeito significativo da fertilização observada por Madeira et al. (2002) e Stape et al. (2008), podem estar relacionadas ao efeito das técnicas de preparo do solo durante o plantio das árvores e pela eficiente ciclagem de nutrientes na mata de eucalipto sobre a produtividade das árvores.

O maior acúmulo de carbono no caule foi diretamente associado com a maior alocação de biomassa da parte aérea para esse componente, confirmando a nossa hipótese inicial. As frações folhas e raízes da biomassa, caracterizadas como *pools* de carbono mais lábeis (Norby et al. 2002), representaram uma pequena fração do estoque total de carbono na biomassa e no sistema florestal, e essa resposta foi acompanhada pela menor alocação de biomassa para estes componentes. Entretanto, é importante salientar que apesar da pequena contribuição para o estoque total da biomassa, as folhas e raízes desempenham uma importante função no processo de acumulação de carbono através da fotossíntese e pela liberação de carbono via exsudatos das raízes e pela transferência de carbono via associações micorrízicas (Godbold et al. 2006).

Litton et al. (2007) rejeitam a hipótese que os padrões de alocação de biomassa podem ser utilizados como indicadores do padrão de acúmulo de carbono, principalmente para árvores. Entretanto, os resultados observados neste estudo aliados ao padrão de crescimento de sistemas florestais manejados com árvores de eucalipto permite inferir que a partir da metade do ciclo (3-4 anos), quando a copa e o sistema radicular já alcançaram o desenvolvimento completo (Stape, 2002), os padrões de alocação de biomassa, principalmente a razão entre a biomassa do caule e da parte aérea, podem representar uma importante estimativa da capacidade de acúmulo de carbono na biomassa das árvores.

O estoque de carbono no solo representou uma importante fração do estoque total de carbono no sistema florestal (média de 30% do estoque total) e, ao contrário do observado para as frações da biomassa, o acúmulo de carbono no perfil vertical do solo foi significativamente diferente entre as áreas de estudo, indicando que as variáveis com capacidade discriminante selecionadas pelo teste de *Kruskall-Wallis* parecem influenciar o estoque de carbono no solo. Entretanto, a disponibilidade de água no solo não apresentou uma relação positiva com a concentração de COT no solo e, neste estudo, não parece representar um eficiente indicador do estoque de carbono no solo.

A ausência de uma relação positiva entre o estoque de carbono no solo e o conteúdo gravimétrico de água no solo confirma em parte a hipótese testada neste estudo, de que o acúmulo de carbono no solo não é influenciado pela disponibilidade de água no solo. Todavia, destaca-se que a ausência de uma relação positiva entre o estoque de carbono no solo e a disponibilidade de água no solo pode estar relacionada com a avaliação pontual do conteúdo gravimétrico de água no solo realizada nesse estudo. Adicionalmente, não se pode excluir a influência de fatores abióticos no estoque de carbono no solo, visto que a disponibilidade de água no solo tem influência

direta nos processos decomposição dos resíduos vegetais e o teor de argila é fortemente associado com a interação e estabilização da matéria orgânica no solo.

Nossos resultados indicaram que a concentração de potássio, cálcio trocável, fósforo, magnésio trocável, zinco, cobre, enxofre, alumínio, a razão entre cálcio e magnésio, o pH e a percentagem de argila foram capazes de detectar a heterogeneidade e diferenciar as áreas de estudo. Das variáveis selecionadas, a concentração de argila, de magnésio trocável, de zinco, potássio, alumínio e a razão entre cálcio e magnésio, também foram associadas com o menor estoque de carbono nas áreas A e F, e, dessa forma, podem ser consideradas como indicadores eficientes da concentração de carbono no solo em florestas manejadas de eucalipto.

O teor de argila é apontada por diversos estudos como o principal indicador de variações no acúmulo de carbono no solo (Post & Kwon, 2000; Zinn et al. 2002; Dieckow et al. 2009; Langanieri et al. 2010). Em sistemas florestais com eucalipto, além da concentração de argila, as outras variáveis selecionadas neste estudo pelo teste de *Kruskall-Wallis* também podem ser capazes de indicar variações espaciais e verticais na capacidade de estoque de carbono no solo. Todavia, futuros estudos são necessários para elucidar a relação entre as variáveis selecionadas e o acúmulo de carbono no solo.

Adicionalmente, o estoque de carbono no solo não foi associado com a produção de serrapilheira e com o aporte de carbono desta fração, o que rejeita a nossa hipótese inicial. A área de estudo com a maior produção de serrapilheira apresentou um maior estoque de carbono neste componente. Todavia, nessa área de estudo foram observados os menores valores de estoque de carbono no solo em cada uma das profundidades avaliadas (área A).

Sob condições climáticas semelhantes a este estudo, Wiesmeier et al. (2009) observaram um menor acúmulo de carbono no solo em mata de *Pinus sp.*, apesar de

uma alta deposição de serrapilheira na superfície do solo. O menor acúmulo de carbono orgânico no solo na mata de *Pinus sp.* foi associada a uma lenta taxa de decomposição; devido à composição química das acículas. Os resultados observados neste estudo associados com os resultados observados por Wiesmeier et al. (2009), corroboram a idéia de que, embora a serrapilheira seja depositada em grandes quantidades no solo na mata de eucalipto, a relação entre o *input* de carbono no solo e o conteúdo de carbono no solo não é necessariamente positiva (Campbell et al. 1991; Fontaine et al. 2004).

O acúmulo de carbono no solo parece ser influenciados pela relação entre a composição do material orgânico vegetal e o processo de decomposição, seguido pelos processos de estabilização do carbono no solo, e estes processos são dependentes das espécies utilizadas, das características intrínsecas do solo, bem como do sistema de uso e manejo utilizado (Paul et al. 2002; Lal, 2005).

Os resultados deste estudo apontam que, no sistema florestal com árvores jovens de eucalipto em Argissolos e sob clima subtropical, o estoque de carbono no solo apresenta uma variação de 44,8 e 58,5 Mg Cha⁻¹ entre as áreas de estudo e a variação no estoque de carbono no solo nas duas profundidades avaliadas foi associado, principalmente, com a variação no teor de argila entre as áreas de estudo.

Zinn et al. (2002), em um estudo conduzido na região do Cerrado Brasileiro observaram valores muito semelhantes aos observados neste estudo. Sob o clima tropical do Cerrado, as plantações de eucalipto apresentaram valores de estoque de carbono no solo de 41,64 e 59,84 Mg Cha⁻¹. Lima et al. (2006), em um estudo com eucalipto em duas áreas na região Sudeste do Brasil, observaram que a área com condições climáticas mais semelhantes ao clima subtropical, característico da região Sul do Brasil, apresentou maior acúmulo de carbono no solo em relação a área com clima

tropical, e a diferença no estoque de carbono no solo entre as duas áreas de estudo foi relacionada com a influência da temperatura no processo de decomposição foliar.

Conclusões

Este estudo foi capaz de quantificar os diferentes *pools* de carbono e minimizar o número de variáveis que podem ser utilizadas como indicadoras do estoque de carbono nos diferentes componentes do sistema florestal com árvores de eucalipto na região Sul do Brasil. Os resultados deste estudo indicaram que a biomassa do caule seguido pelo solo representam os principais componentes do estoque de carbono em um sistema florestal manejado com árvores de *Eucalyptus saligna* com três para quatro anos de idade em um Argissolo sob clima subtropical.

O teor de argila parece ser o principal determinante de variações no estoque de carbono no solo e o conteúdo de água no solo pode ser utilizado como indicador do estoque de carbono na biomassa das folhas e do caule. Futuros estudos devem ser conduzidos para esclarecer a relação entre as características do solo e sua microbiota sobre o acúmulo de carbono no solo.

Referências Bibliográficas

- BALBINOT, R.; SCHUMACHER, M.V.; WATZLAWICK, L.F.; SANQUETTA, C.R. 2003. Inventário do Carbono Orgânico em um plantio de *Pinus taeda* aos 5 anos de idade no Rio Grande do Sul. *Revista de Ciências Exatas e Naturais* 5: 59-68.
- BODDEY, R.M.; JANTALIA, C.P.; CONCEIÇÃO, P.C.; ZANATTA, J.A.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; DIECKOW, J.; SANTOS, H.P.; DENARDIN, J.E.; AITA, C.; GIACOMINI, S.J.; ALVES, B.J.R.; URQUIAGA, S. 2010. Carbon accumulation at depth in Ferrasols under zero-till subtropical agriculture. *Global Change Biology* 16: 784-795.
- CAMPBELL, C.A.; LAFOND, G.P.; ZENTNER, R.P; BIEDERBECK, V.O. 1991. Influence of fertilizer and straw baling on soil organic matter in a thick black chernozem in western Canada. *Soil Biology and Biochemistry* 23: 443-446.
- DIECKOW, J.; BAYER, C.; CONCEIÇÃO, P.C.; ZANATTA, J.A.; MARTIN-NETO, L.; MILORI, D.B.M.; SALTON, J.C., MACEDO, M.M.; MIELNICZUK, J.; HERNÂNI, L.C. 2009. Land use, tillage, texture and organic matter stock and composition in tropical and subtropical Brazilian soils. *European Journal of Soil Science* 60:240-249.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro, Centro Nacional de pesquisa de Solos, 1999. 412p.
- FONTAINE, S.; BARDOUX, G.; ABBADIE, L.; MARIOTTI, A. 2004. Carbon input to soil may decrease soilcarbon content. *Ecology Letters* 7:314-320.
- GODBOLD, D.L.; HOOSBEEK, M.R.; LUKAC, M. *et al.* (2006). Mycorrhizal hyphal turnover as a dominant process for carbon input into soil organic matter. *Plant and Soil* 281: 15-24.
- IPCC (2001). *Climate change 2001: the scientific basis. contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Disponível em: www.ipcc.ch
- IPCC (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. CONTRIBUTION of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. UNEP, New York.
- LAL, R. 2002. Forest soils and carbon sequestration. *Forest Ecology and Management* 220: 242-258.
- LAGANIÈRE, J.; ANGERS, D.A.; PARÉ, D. 2010. Carbon accumulation in agricultural soils after afforestation: a meta analysis. *Global Change Biology* 16: 439-453.

- LEVIN, I.P. (1999). **Relating statistics and experiments design**. Thousand Oaks: Sage. 90p.
- LEWICK, P. & HILL, T. (2007). **STATISTICS: Methods and Applications**. Tulsa: Statsoft Inc. (<http://www.statsoft.com>)
- LIMA, A.M.N.; SILVA, I.R.; NEVES, J.C.L.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; MENDONÇA, E.S.; SMYTH, T.J.; MOREIRA, M.S.; LEITE, F.P. 2006. Soil organic carbon dynamics following afforestation of degraded pastures with eucalyptus in southeastern Brazil. *Forest Ecology and Management* 235: 219-231.
- LITTON, C.M.; RAICH, J.W.; RYAN, M.G. 2007. Carbon allocation in forest ecosystems. *Global Change Biology* 13: 2089-2109.
- MADEIRA, M.V., FABIÃO, A.J.; PEREIRA, S.; ARAÚJO, M.C.; RIBEIRO, C. 2002. Changes in carbon stocks in *Eucalyptus globulus* Labill. Plantations induced by different water and nutrient availability. *Forest Ecology and Management* 171: 75-85.
- MARQUERE, V.; CACLAU, J.P.; BERNOUX, M; SAINT-ANDRE, J.; GONÇALVES, J.L.M.; CERRI, C.C.; PICCOLO, M.C.; RANGER, J. (2008). Influence of land use (savanna, pasture, *Eucalyptus* plantations) on soil carbon and nitrogen stocks in Brazil. *European Journal of Soil Science* 59: 863-877.
- MEIER, I.C. & LEUSCHNER, C. 2010. Variation of soil and biomass carbon pools in beech forests across a precipitation gradient. *Global Change Biology* 16:1035-1045.
- MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. 2007. **Brasil: Campeão do Eucalipto**. Disponível em: <http://ftp.mct.gov.br/especial/genolyptus4.htm> Acesso em: 10 julho 2010.
- NATIONAL WEATHER SERVICE/CLIMATE PREDICTION CENTER - NOAA (2010). Disponível em: <http://www.noaa.gov> Acesso em 20 de setembro de 2010.
- NORBY, R.J.; HANSON, P.J.; O'NEILL, E.B. *et al.* (2002) Net primary productivity of a CO₂-enriched deciduous forest and the implications for carbon storage. *Ecological Applications* 12: 1261-1266.
- ORDÓÑEZ, A & MASERA, O. 2001. La captura de carbono ante el cambio climático. *Madera Y Bosques* 7: 3-12.
- ORDÓÑEZ, J.A.B.; DE JONG, B.H.J.; GARCÍA-OLIVA, F.; AVIÑA, F.L.; PÉREZ, J.V.; GUERRERO, G; MARTÍNEZ, R.; MASERA, O. 2008. Carbon content in vegetation, litter, and soil under 10 different land-use and land-cover classes in the Central Highlands of Michoacan, Mexico. *Forest Ecology and Management* 255:2074-2084.
- PAUL, K.I; POLGLASE P.J.; NYAKUENGAMA, J.G; KAANA, P.K. 2002. Change in soil carbon following afforestation. *Forest Ecology and Management* 168: 241-257.

PAULETTO, E. A. **Manual de Laboratório: determinação de atributos físicos do solo**. Pelotas, 1997, 59p.

POST, W.M. & KWON, K.C. 2000. Soil carbon sequestration and land-use change: process and potential. *Global Change Biology* 6: 317-327.

RYAN, M.G.; STAPE, J.L.; BINKLEY, D. *et al.* (2010). Factors controlling *Eucalyptus* productivity: How Water availability and stand structure alter production and carbon allocation. *Forest Ecology and Management* 259:1695-1703.

SMITH, P.; POWLSON, D.S.; GLENDINING, M.J.; SMITH, J.U. 1997. Potential for carbon sequestration in European soils: preliminary estimates for five scenarios using results from long-term experiments. *Global Change Biology* 3: 67–79.

STAPE, J.L. **Production Ecology of clonal *Eucalyptus* plantations in Northeastern Brazil**. 2002. 237p. Doutorado (Doutorado em Filosofia). Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 2002.

STAPE, J.L.; BINKLEY, D.; RYAN, M.G. (2008). Production and carbon allocation in a clonal *Eucalyptus* plantation with water and nutrient manipulations. *Forest Ecology and Management* 255: 920-930.

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S.J. (1995). **Análises do solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre: Departamento de Solos da UFRGS. 2. ed. Revisada e Ampliada. 174 p.

USUGA, J.C.L.; TORO, J.A.R.; RAMIREZ, M.V.; TAPIAS, A.J.L. (2010). Estimation of biomass and carbon stocks in plants, soil and forest floor in different tropical forests. *Forest Ecology and Management* 260:1906-1913.

WIESMEIER, M.; DICK, D.P.; RUMPEL, C.; DALMOLIN, R.S.D.; HILSCHER, A.; KNICKER, H. 2009. Depletion of soil carbon and nitrogen under *Pinus taeda* plantation in Southern Brazilian grasslands (*Campos*). *European Journal of Soil Science* 60:347-359.

ZINN, Y.L.; LAL, R.; RESCK, D.V.S. (2005). Changes in soil organic carbon stocks under agriculture in Brazil. *Soil & Tillage Research* 84:28-40.

ZINN, Y.L.; RESCK, D.V.S.; SILVA, J.E. 2002. Soil organic as affected by afforestation with *Eucalyptus* and *Pinus* in the *Cerrado* region of Brazil. *Forest Ecology and Management* 166: 285-294.

ESTOQUE DE CARBONO NO SOLO EM UMA FLORESTA MANEJADA DE EUCALIPTO: INFLUÊNCIA DE CARACTERÍSTICAS DO SOLO OU DA PLANTA?

Introdução

A principal fonte da matéria orgânica do solo é o CO₂ fixado através da fotossíntese e que pode ser incorporado ao solo através do processo de decomposição de folhas, caules e raízes. A composição dos tecidos vegetais é um dos principais fatores influenciando o processo de decomposição e incorporação de carbono no solo (Kögel-Knaber 2002; Kleber et al. 2007). O carbono orgânico pode residir no solo em frações mais lábeis ou estáveis da matéria orgânica de acordo com a composição química e a recalcitrância dos resíduos vegetais depositados no solo (Berg & McLaugherty 2008). Compostos orgânicos com uma rápida taxa de decomposição, principalmente carboidratos solúveis, representam *pools* mais lábeis da matéria orgânica, enquanto que lípidios, ceras e lignina têm uma taxa de decomposição mais lenta e são considerados compostos mais estáveis e/ou recalcitrantes.

A diferenciação do carbono orgânico total no solo em carbono lábil (definido pelo seu tempo de residência de meses a anos) e carbono recalcitrante (tempo de residência de décadas a centenas de anos) pode fornecer mais informações na compreensão dos mecanismos associados com a estabilidade do carbono no solo. O

fracionamento granulométrico é uma metodologia que pode ser utilizada para diferenciar e quantificar *pools* lábeis e recalcitrantes da matéria orgânica do solo (MOS), de acordo com o tamanho das partículas (Cambardella & Elliot 1992; Bayer et al. 2004). A fração particulada (lábil) possui uma composição comparável a de materiais vegetais em fase inicial de decomposição, apresentando geralmente baixas concentrações de lignina. A fração associada a minerais compreende as moléculas orgânicas que apresentam forte interação com os minerais presentes nas frações silte e argila, em um estágio mais avançado de decomposição (Christensen 2001; Six et al. 2001).

Além da influência da composição química dos resíduos vegetais sobre o processo de decomposição e incorporação da matéria orgânica no solo, Morris et al. (2007) mostraram que as características do solo exercem uma forte influência sobre a dinâmica de acumulação de carbono. A disponibilidade de cálcio e nitrogênio foram fortemente associadas ao maior estoque de carbono no solo. Estudos têm apoiado a idéia que a concentração de cátions seria importante para a estabilização da matéria orgânica no solo, principalmente em solos de regiões temperadas que apresentam altos teores desses íons (Clough & Skjemstad 2000). Entretanto, em solos mais intemperizados, característicos da região Sul do Brasil, a estabilização da matéria orgânica no solo ocorre através da interação com superfícies minerais e com íons metálicos via troca de ligantes ou pelo estabelecimento de interações fracas, tais como pontes de Van der Waals ou pontes de H (Lützow et al. 2006). Por outro lado, a disponibilidade de nitrogênio estaria relacionada com o aumento e/ou redução nas taxas de decomposição da matéria orgânica (Fog 1988; Hobbie 2000).

A relação entre a composição química da planta, as características do solo e o acúmulo de carbono no solo em áreas florestais com eucalipto não tem sido relatada. A

compreensão dos mecanismos associados com o acúmulo de carbono no solo é fundamental para a sustentabilidade do plantio de espécies arbóreas exóticas em sistemas florestais manejados.

Os objetivos deste estudo foram (i) investigar a relação entre as características do solo e o acúmulo de carbono nas frações da MOS, (ii) verificar a influência das características químicas da fração foliar de serrapilheira e de raízes superficiais sobre o acúmulo de carbono nas frações da MOS e (iii) analisar o processo de decomposição de folhas de *Eucalyptus saligna*, principalmente a relação entre a concentração de lignina e o estoque de carbono no solo.

Material e Métodos

Local de estudo e delineamento experimental

O estudo foi desenvolvido em um plantio comercial com árvores de eucalipto da empresa Celulose Riograndense, na área “Terra Dura” (51° 35′ 38, 43” W; 30° 10′ 51, 04” S) localizado no município de Eldorado do Sul, Rio Grande do Sul. O clima na região onde este estudo foi conduzido é classificado como subtropical úmido do tipo Cfa de acordo com classificação climática de Köppen. A precipitação média anual durante o período experimental foi de 1891 mm (DP = 93,5) e temperatura média anual de 18,2 °C (DP = 4,5). O solo na região é do tipo Argissolo Vermelho Distrófico típico, com composição média de 50% de areia, 10% de silte e 40 % de argila. O pH apresentou uma faixa de valores entre 4,6 e 4,8 na profundidade de 0 – 25 cm e 4,4 e 4,7 na profundidade de 25 – 50 cm. Para maiores detalhes sobre as características do local de estudo, consultar o capítulo 1.

O estudo foi conduzido em uma área com uma monocultura de árvores de *Eucalyptus saligna* Labill. (clone 4039) com três anos de idade, na metade do ciclo, em segunda rotação, com 1666 árvores por hectare com espaçamento entre árvores de 4 x 1,5 metros. Na área de estudo, um transecto de 1500 m² foi delimitado e seis parcelas experimentais de 10 x 10 m foram distribuídas ao longo do transecto, separadas por uma distância de 10 metros. Durante o ano de estabelecimento das árvores, o solo da área foi preparado com adubação de cobertura com NPK (15; 0,7; 30; 200g/planta). A análise das características químicas e físicas do solo demonstrou que as parcelas experimentais não foram uniformes quanto as características do solo (Capítulo 1). Assim, cada parcela experimental foi considerada como uma área de estudo. Dessa forma, os parâmetros avaliados neste estudo foram comparados entre as áreas de estudo.

A coleta dos dados foi realizada durante o período de maio de 2009 a junho de 2010. Em cada área de estudo, foram realizadas coletas de solo para a quantificação do carbono orgânico nas frações do solo em diferentes profundidades, coletas sazonais de serrapilheira para quantificação e caracterização da composição química da fração foliar da serrapilheira e a avaliação do processo de decomposição foliar através da quantificação da redução na massa, da variação na concentração de carbono e de lignina.

Quantificação do carbono orgânico total e das frações do solo

Dentro de cada área de estudo foram realizadas coletas de solo em duas diferentes profundidades, 0-25 cm e 25-50 cm, ao final do período experimental, em maio de 2010. As amostras individuais de solo foram coletadas em cinco diferentes pontos dentro de cada área de estudo usando um trado graduado e foram homogeneizadas em um amostra composta para cada uma das profundidades. A partir da amostra composta

foram retiradas três subamostras para análise do conteúdo de carbono orgânico total (COT) e das frações de carbono orgânico particulado (COP) e carbono orgânico mineral (CAM). O COT foi determinado em analisador de Carbono Orgânico Total (Shimadzu, modelo TOC-V) e as frações foram obtidas pelo método de fracionamento granulométrico proposto por Cambardella & Elliot (1992) conforme descrito por Bayer et al. (2004) que consiste na separação da matéria orgânico do solo (MOS) de acordo com o tamanho das partículas.

As subamostras foram inicialmente secas em estufa a 50 °C e peneiradas à 2 mm. Do material resultante desta 1ª etapa, uma fração da amostra foi separada para a quantificação do carbono orgânico total (COT), e 20 gramas de solo foram separadas para a quantificação do carbono orgânico particulado (COP). As 20 gramas de solo de cada subamostra foram adicionadas a 60 mL de hexametáfosfato de sódio (5 g L^{-1}), agitados durante 15 horas em frascos tipo *snap-cap* de 100 mL. A suspensão obtida foi passada em peneira de malha de 53 μm com auxílio de um jato de água. O material retido na peneira foi considerado como sendo a fração de carbono particulado do solo (COP). Este material foi seco em estufa a 50 °C. Após secagem foi determinada a massa de cada amostra, e estas foram moídas em almofariz para posterior determinação do conteúdo de carbono orgânico em analisador de Carbono Orgânico Total (Shimadzu, modelo TOC-V). O conteúdo de carbono orgânico associado a minerais (CAM) foi obtido pela diferença entre o COP e COT.

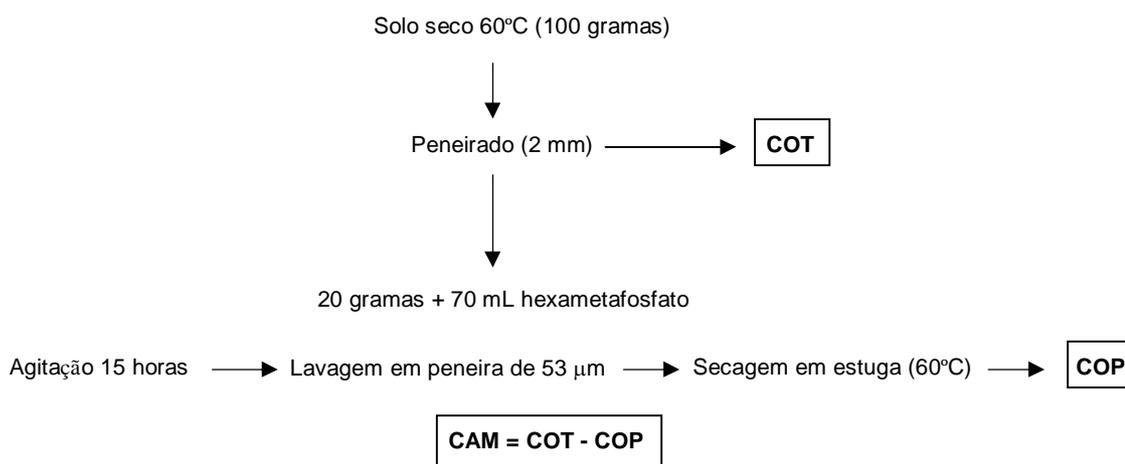


Figura 1: Representação esquemática das etapas do fracionamento granulométrico.

Estoque de carbono orgânico total e das frações do solo

O estoque de carbono orgânico total e das frações foi calculado utilizando a equação:

$$\text{Estoque} = \text{Corgânico} * D_s * E * 10 \quad (\text{Equação 1})$$

Onde,

Estoque = estoque de C orgânico (Mg ha^{-1})

Corgânico = concentração de C orgânico (g kg^{-1} solo)

D_s = densidade do solo (g cm^{-3})

E = espessura da camada (m)

A densidade do solo foi determinada segundo Pauletto (1997), utilizando anéis volumétricos metálicos (descrição no Capítulo 1).

Produção Sazonal de Serrapilheira

A serrapilheira produzida mensalmente foi coletada em coletores de madeira com 0,25 m² de área (0,50 m x 0,50 m), 15 cm de profundidade e fundo de tela de nylon de malha fina. Foram distribuídos quatro coletores em cada uma das áreas de estudo, abaixo das árvores, em maio de 2009. As coletas foram realizadas mensalmente durante o período de junho de 2009 até maio de 2010, totalizando 12 meses de coleta. Depois de retirado o conteúdo de serrapilheira, os coletores foram colocados na mesma posição abaixo das árvores. Mensalmente, o material interceptado pelos coletores foi recolhido, e após secagem prévia em estufa a 50 °C por 24h, foi manualmente separado em três frações: folhas, galhos e casca. Após a triagem, cada fração foi novamente seca em estufa a 60 °C até massa constante, e, posteriormente, pesada. A fração foliar da serrapilheira produzida durante o inverno, primavera, verão e outono foram calculadas através do somatório dos pesos mensais (junho, julho e agosto; setembro, outubro e novembro; dezembro, janeiro e fevereiro; março, abril e maio). As médias sazonais da produção da fração foliar de serrapilheira foram expressas em ton ha⁻¹, para cada área de estudo.

Concentração de Nutrientes e Carbono na Serrapilheira

A concentração sazonal de carbono e de macro e micronutrientes foi analisada na fração foliar da serrapilheira na primavera e no outono, que mostraram-se contrastantes quanto a produção de serrapilheira e pela influência destas estações na fenologia foliar. As amostras da fração foliar de serrapilheira foram previamente secas em estufa a 60 °C, maceradas e cerca de dois gramas foram encaminhados para quantificação da concentração de carbono em analisador de Carbono Orgânico Total (Shimadzu, modelo TOC-V) e expressa em Mg ha⁻¹. Para a análise da concentração de

macro e micronutrientes, cinco gramas de cada amostra foram encaminhados para o Laboratório de Solos da Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. A concentração de macro e micronutrientes na fração foliar da serrapilheira foi avaliada de acordo com metodologia proposta por Tedesco *et al.* (1995) e expressas em g Kg⁻¹ e/ou mg Kg⁻¹.

Concentração de nutrientes nas raízes

Após as avaliações de biomassa das árvores (para maiores detalhes consultar o capítulo 1), amostras de raízes coletadas na profundidade de 0 – 50 cm foram retiradas e armazenadas para a avaliação da composição química. Amostras de raízes superficiais de uma árvore por área de estudo foram encaminhadas para a análise da concentração de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) no Laboratório de Solos da Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul de acordo com metodologia proposta por Tedesco *et al.* (1995) e expressas em g Kg⁻¹.

Taxa de Decomposição Foliar

A taxa de decomposição foliar foi determinada através do método de *litterbags* (Berg *et al.* 1993). Folhas senescentes recentemente caídas no solo foram coletadas na área de estudo durante o mês de maio de 2009, secas em estufa a 60 °C, pesadas e colocadas em sacos de nylon com dimensão de 25 x 25 cm. Cada *litterbag* contendo cinco gramas de folhas senescentes secas foram colocados no solo, próximo aos coletores de serrapilheira distribuídos em cada área de estudo. Os *litterbags* foram coletados e pesados aos 0, 1, 2, 4, 6 e 12 meses. Em cada área de estudo foram distribuídos dois *litterbags* por tempo de decomposição, totalizando 72 *litterbags* distribuídos nas seis áreas de estudo. A taxa de decomposição foliar foi expressa com

base na porcentagem de massa que permaneceu nos litterbags em relação a massa inicial das folhas recém caídas. A constante de decomposição foi determinada usando os dados do experimento de decomposição dos *litterbags* pela fórmula: $M_t = M_0 e^{-kt}$ (Olson, 1963).

Para analisar a variação na concentração de carbono orgânico presente nos litterbags ao longo dos períodos de decomposição, as amostras de cada área de estudo foram agrupadas formando uma amostra composta. De cada amostra composta foram retiradas três subamostras com cerca de dois gramas que foram encaminhadas para determinação do conteúdo de carbono orgânico em analisador de Carbono Orgânico Total (Shimadzu, TOC-V). A concentração de carbono foi verificada no tempo zero e após 12 meses de decomposição.

Quantificação do conteúdo de lignina

A concentração de lignina foi verificada na fração foliar da serrapilheira produzida durante a primavera e o outono e no material presente nos litterbags no tempo zero e após 12 meses de incubação no experimento de decomposição foliar. Amostras da fração foliar de serrapilheira e dos litterbags (0,05 g) foram homogeneizadas em tampão fosfato de potássio 50 mM (1,2 mL, pH 7.0) com gral e pistilo e transferidas para um tubo eppendorf (Ferrarese et al. 2002). O *pellet* foi centrifugado (1,400x g; 4 min) e lavado em sucessivas agitações e centrifugações como segue: duas vezes com tampão fosfato pH 7.0 (1,2 mL); três vezes com Triton(R) X-100 1 % (v/v) em tampão pH 7,0 (1,2 mL); duas vezes com NaCl 1 M em tampão pH 7,0 (1,2 mL); duas vezes com água destilada (1,2 mL); e duas vezes com acetona (800 µL). O *pellet* foi seco em estufa (60° C, 24 hr) e congelado em um dessecador a vácuo. A matéria seca foi definida como uma fração da parede celular livre de proteína. Além disso, uma mistura

de reação (200 µl de ácido tioglicólico + 1 mL de HCl 2M) foi adicionada ao tubo de eppendorf e aquecido (95°C, 4 hr). Após congelamento a temperatura ambiente, a amostra foi centrifugada (1.400×g, 5 min) e o sobrenadante foi descartado. O *pellet* compreende o complexo lignina-ácido tioglicólico (LTGA). O *pellet* foi lavado três vezes com água destilada (1,2 mL) e o LTGA extraído por agitação (30°C, 18 hr, 160 oscilações por minuto) em 0,5 M NaOH (1 ml). Após a centrifugação (1.400 ×g, 5 min), o sobrenadante foi armazenado. O *pellet* foi lavado novamente com NaOH 0,5 M (500 µl) e misturado com o sobrenadante obtido anteriormente. Os extratos alcalil combinado foram acidificados com HCl concentrado (300 µl). Após precipitação (0°C, 4 hr), LTGA foi recuperado por centrifugação (1.400 ×g, 10 min) e lavado duas vezes com água destilada (7 mL). O *pellet* foi seco a 60° C, dissolvido em NaOH 0,5 M e diluído para produzir uma apropriada absorbância para determinação espectrométrica a 280 nm. A concentração de lignina foi expressa em miligrama LTGA por grama de peso seco.

Análise dos Dados

a) Relação entre as características do solo e a concentração de C no solo

No capítulo 1, o teste não paramétrico de *Kruskall-Wallis* selecionou um conjunto de características químicas e físicas do solo na tentativa de reduzir o número de variáveis utilizadas para a caracterização das áreas de estudo e na detecção das possíveis diferenças entre as áreas de estudo. As variáveis selecionadas foram: argila, pH, concentração de potássio, fósforo, alumínio, cálcio, magnésio, razão Ca:Mg, enxofre, zinco e cobre .

A partir das 11 variáveis selecionadas no capítulo 1, foram realizadas análises de regressão linear múltipla em relação às duas variáveis dependentes (carbono nas frações

COP e CAM) na tentativa de estabelecer a contribuição de cada variável independente na explicação da variabilidade da concentração de carbono no solo, utilizando o programa estatístico SPSS (SPSS Inc., Chicago, IL, USA) e consideradas significativas quando $P \leq 0,1$.

b) Relação entre as características da planta e a concentração de C no solo

A relação entre a concentração de macro e micronutrientes, a concentração de lignina e as razões C:N e Lignina:N na fração foliar da serrapilheira (variáveis independentes) e a concentração de carbono orgânico nas frações do solo (variáveis dependentes) foram verificadas através de análises de regressão linear múltipla. A possível influência da composição química das raízes sobre a concentração de carbono orgânico nas frações do solo (COP e CAM) também foi analisada. Devido ao limitado número de amostras de raízes (apenas 6 repetições), as análises de regressão linear múltipla foram realizadas apenas em um grupo de variáveis químicas (N, P, K, Ca e Mg).

A influência do conjunto de diferentes variáveis químicas da planta (folhas e raiz) sobre a concentração de carbono orgânico nas frações do solo foram verificadas através do programa estatístico SPSS (SPSS Inc., Chicago, IL, USA) e consideradas significativas quando $P \leq 0,1$.

c) Carbono na serrapilheira e no solo

A concentração de carbono orgânico nas frações do solo, na serrapilheira e nas fases de decomposição foram submetidos à análise de variância e comparação de médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade utilizando o programa estatístico

SPSS (SPSS Inc., Chicago, IL, USA), para comparação das possíveis variações entre as áreas de estudo.

Resultados

Solo

O estoque de carbono orgânico no solo apresentou uma maior proporção de carbono associado a minerais (entre 80 e 92% do COT) em relação à fração particulada (entre 8 e 20% do COT) (tabela 1). Não houve diferença significativa no estoque de carbono orgânico total no solo (COT) entre as áreas de estudo nas duas profundidades amostradas. O estoque de carbono na fração COP na profundidade de 0 – 25 cm foi significativamente menor nas áreas A e F comparado as outras áreas de estudo ($P < 0,001$). Entretanto, não houve diferença significativa na profundidade de 25 – 50 cm, entre as áreas de estudo ($P = 0,071$).

Na fração CAM, similar ao observado na fração COP, o estoque de carbono foi significativamente menor nas áreas de estudo A e F comparado as outras áreas de estudo, na profundidade de 0 - 25 e 25 – 50 cm ($P= 0,03$; $P= 0,002$, respectivamente). Na fração CAM, na profundidade de 0 – 25 cm foram observadas as maiores variações entre as áreas de estudo; as áreas A, D e F apresentaram os menores estoques de carbono no solo, enquanto que nas áreas C e E foram observados os maiores valores.

Tabela 1. Estoque de carbono orgânico nas diferentes frações da MOS (COP, CAM e COT) expressa em Mg ha⁻¹ para as profundidade de 0 - 25 cm e 25 - 50 cm em cada uma das áreas de estudo.

Áreas de estudo	COP	CAM	COT
A			
0 - 25 cm	2,17 (0,17) b	23,50 (1,16) b	26,1 (1,0) a
25 - 50 cm	1,70 (0,55) a	20,76 (1,79) b	22,5 (2,3) a
B			
0 - 25 cm	5,76 (0,52) a	25,23 (1,1) ab	32,0 (1,1) a
25 - 50 cm	1,66 (0,06) a	25,86 (1,36) a	27,5 (1,4) a
C			
0 - 25 cm	6,31 (0,44) a	32,17 (0,91) a	38,5 (0,8) a
25 - 50 cm	4,60 (2,29) a	23,53 (0,24) a	25,8 (0,1) a
D			
0 - 25 cm	5,56 (0,21) a	22,84 (1,24) b	28,4 (1,2) a
25 - 50 cm	2,43 (0,17) a	26,98 (0,76) a	29,4 (0,8) a
E			
0 - 25 cm	4,76 (0,5) a	27,21 (0,95) a	31,9 (1,2) a
25 - 50 cm	1,81 (0,12) a	22,64 (1,38) a	24,4 ± 1,5 a
F			
0 - 25 cm	2,72 (0,11) b	23,33 (0,61) b	26,1 (0,5) a
25 - 50 cm	1,22 (0,25) a	17,55 (0,63) b	18,8 (0,8) a

Valores são médias seguidas pelo erro padrão entre parênteses (n= 3/área de estudo). Letras indicam diferença significativa entre as áreas de estudo para as frações de carbono orgânico particulado (COP) e associado a minerais (CAM) para cada uma das profundidades avaliadas.

Serrapilheira

As áreas de estudo mostraram-se significativamente diferentes quanto à produção de serrapilheira durante o inverno ($P= 0,005$) e a primavera ($P= 0,002$) (Tabela 2). No verão e no outono não foram observadas diferenças significativas na produção de serrapilheira ($P= 0,12$ e $P= 0,33$, respectivamente). Adicionalmente, a produção de serrapilheira foi similar entre o inverno, primavera e verão (entre 1,5 e 2,6 ton ha^{-1}); entretanto no outono foi significativamente menor em relação às outras épocas do ano (média de 1,2 ton ha^{-1}).

O estoque de carbono e a concentração de nutrientes presentes na fração foliar de serrapilheira foram comparados apenas entre a primavera e o outono, visto que essas estações mostraram-se contrastantes na produção de serrapilheira. O estoque de carbono na serrapilheira foi significativamente diferente entre a primavera e o outono com base no estoque de carbono presente na serrapilheira produzida (média de 0,96 e 0,65 Mg ha^{-1} , respectivamente; $P < 0,001$) (Tabela 3). A porcentagem de carbono nas folhas derrubadas foi em média de 49,2% na primavera e 50,2% no outono, sendo essa diferença significativa ($P < 0,001$) (Figura 1).

A composição química da serrapilheira produzida na primavera e no outono apresentou diferenças significativas em relação a concentração de lignina ($P= 0,05$), fósforo ($P < 0,001$), potássio ($P < 0,001$), cálcio ($P < 0,001$), ferro ($P= 0,043$), mangânes ($P < 0,001$) e boro ($P < 0,001$). Os demais macro e micronutrientes não apresentaram diferenças significativas entre as estações do ano (Figuras 1 e 2). Adicionalmente, observou-se diferenças significativas entre as áreas de estudo na concentração de fósforo, magnésio, enxofre, ferro e boro presente na serrapilheira durante a primavera. No outono não foram observadas diferenças significativas, entre as áreas de estudo, na concentração de nutrientes, carbono e lignina.

A concentração de macronutrientes nas raízes é apresentada na tabela 4.

Tabela 2. Produção sazonal da fração foliar de serrapilheira expressa em ton ha⁻¹ em cada uma das áreas de estudo.

Áreas de estudo	Inverno	Primavera	Verão	Outono
A	2,30 (0,32) a	2,49 (0,22) a	1,8 (0,14) a	1,37 (0,06) a
B	1,65 (0,15) b	2,24 (0,15) a	1,64 (0,1) a	1,20 (0,11) a
C	1,54 (0,18) b	2,07 (0,14) a	1,85 (0,11) a	1,29 (0,03) a
D	2,26 (0,14) a	1,63 (0,1) b	1,62 (0,04) a	1,33 (0,05) a
E	2,18 (0,13) a	1,69 (0,11) b	2,0 (0,07) a	1,12 (0,15) a
F	2,54 (0,04) a	1,64 (0,14) b	1,66 (0,09) a	1,33 (0,07) a

Valores são médias seguidas pelo erro padrão em parênteses (n= 4/área de estudo). Letras indicam diferença significativa entre as áreas de estudo para cada uma das estações.

Tabela 3. Estoque de carbono na fração foliar da serrapilheira durante a primavera e o outono expressa em Mg ha⁻¹ em cada uma das áreas de estudo.

Áreas de estudo	Primavera	Outono
A	1,23 (0,11) a	0,69 (0,03) a
B	1,11 (0,08) a	0,60 (0,05) a
C	1,02 (0,08) a	0,65 (0,01) a
D	0,80 (0,05) b	0,67 (0,03) a
E	0,83 (0,06) b	0,56 (0,07) a
F	0,81 (0,07) b	0,66 (0,03) a

Valores são médias seguidas pelo erro padrão em parênteses (n= 4/área de estudo). Letras indicam diferença significativa entre as áreas de estudo para cada uma das estações.

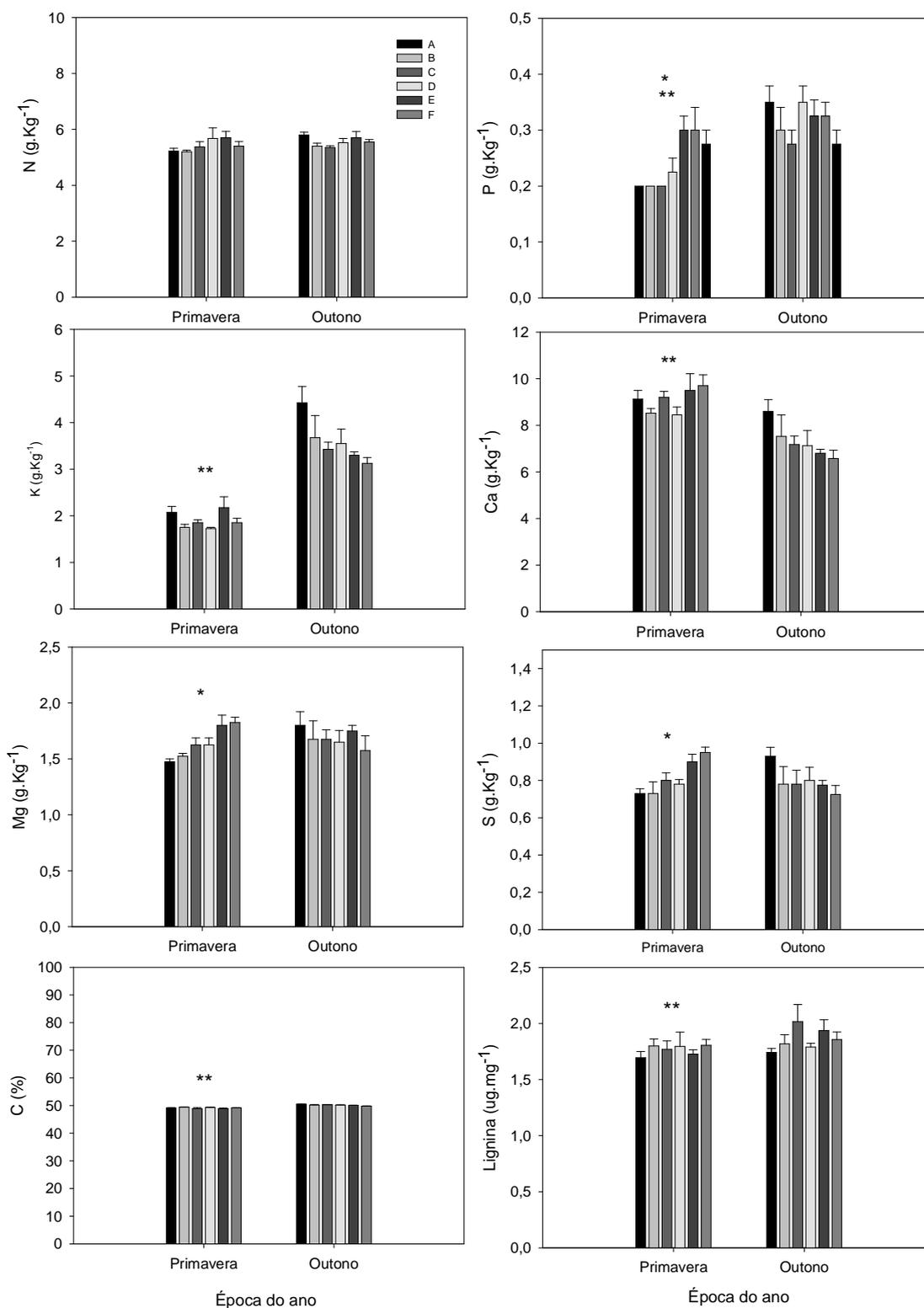


Figura 1. Variação sazonal da concentração de macronutrientes, carbono e lignina na fração foliar de serrapilheira nas diferentes áreas de estudo durante a primavera e o outono. * Indicam diferença significativa entre as áreas de estudo na primavera e no outono. ** Indicam diferença significativa entre a primavera e o outono ($P \leq 0,05$). Os eixos apresentam variações na escala.

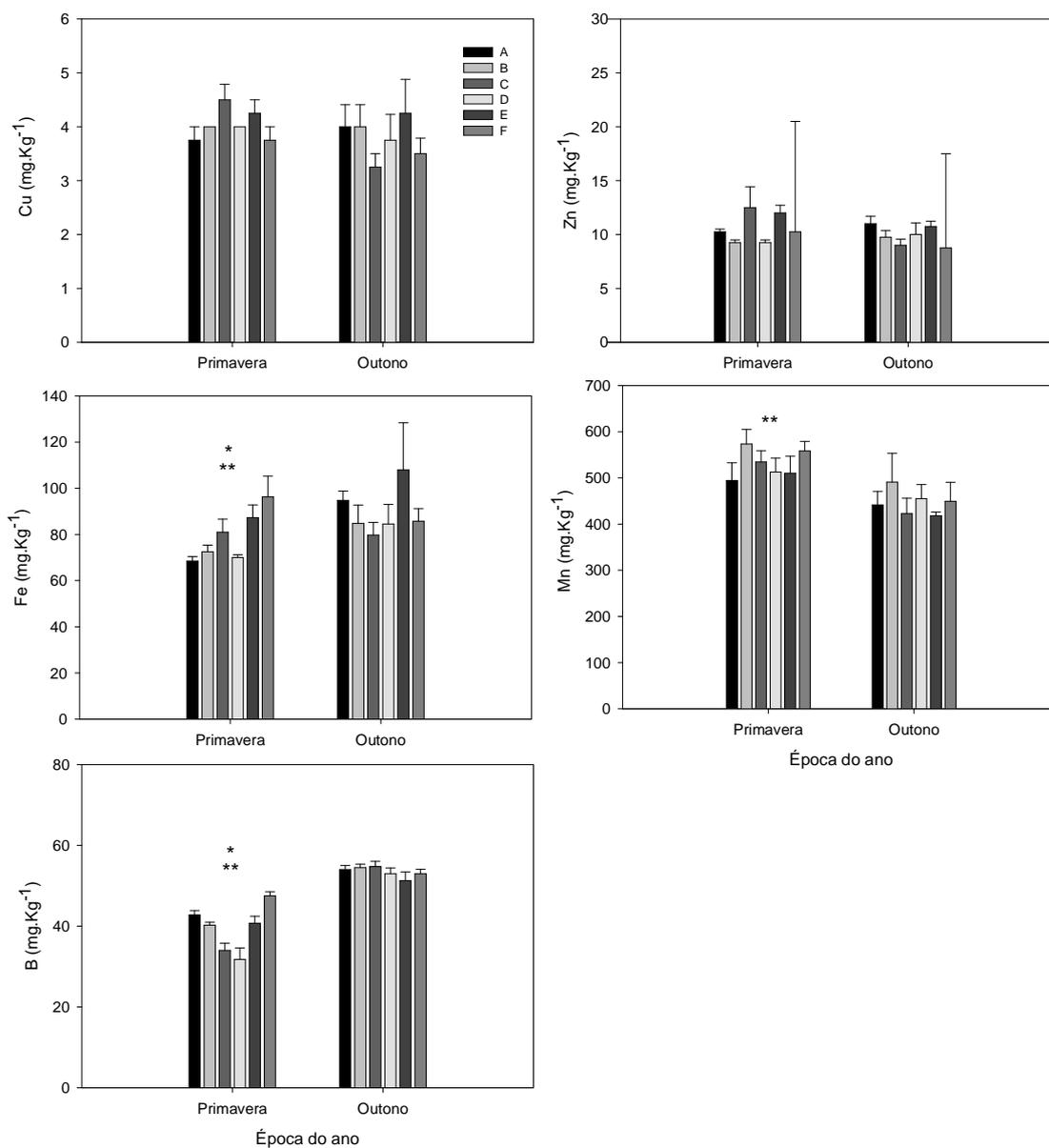


Figura 2. Variação sazonal da concentração de micronutrientes na fração foliar de serrapilheira nas diferentes áreas de estudo. * Indicam diferença significativa entre as áreas de estudo na primavera e no outono. ** Indicam diferença significativa entre a primavera e o outono ($P \leq 0,05$). Os eixos apresentam variações na escala.

Tabela 4. Concentração de macronutrientes (g Kg⁻¹) nas raízes na profundidade de 0 – 50 cm.

Área de estudo	Nitrogênio	Fósforo	Potássio	Cálcio	Magnésio
A	4,76	0,4	5,4	12,41	2,01
B	4,08	0,33	6,3	9,02	1,59
C	5,03	0,35	5,3	6,85	1,44
D	3,64	0,26	5,5	5,1	1,43
E	4,32	0,41	6,7	11,93	1,7
F	5,39	0,26	4,9	8,83	1,96

Valores para uma repetição por área de estudo.

Decomposição foliar

A taxa de decomposição foliar após 12 meses de avaliação apresentou uma redução média de 31,8 % em relação a massa inicial das folhas. Em todas as áreas de estudo foram observadas reduções significativas na percentagem de massa presente nos *litterbags* após 4, 6 e 12 meses de decomposição em relação ao tempo zero (figura 3). As áreas de estudo mostraram-se semelhantes na redução de massa ao longo dos diferentes meses de avaliação da decomposição foliar. A constante de decomposição (k) foi em média de 0,49 e não foram observadas diferenças significativas entre as áreas de estudo.

A maior redução de massa nos *litterbags* foi observada nos primeiros 30 dias de avaliação (0,017 g dia⁻¹), apesar da ausência de uma diferença significativa entre a massa presente nos *litterbags* no tempo zero em relação ao tempo 1. Após 180 e 365 dias de decomposição (6 e 12 meses), a redução de massa foi de 0,0058 g dia⁻¹ e 0,0053 g dia⁻¹.

A concentração de carbono presente nos *litterbags* após doze meses de incubação nas áreas de estudo, foi significativamente reduzida em média de 5% em relação a concentração de carbono nas folhas senescentes (tempo zero) (Figura 4). A

concentração de lignina presente nos litterbags após 12 meses de decomposição apresentou uma redução média de $0,94 \mu\text{g mg}^{-1}$.

No tempo zero (folhas senescentes), a relação entre a concentração de lignina e de carbono foi significativa ($R^2 = 0,34$; $P = 0,013$), com a maior concentração de lignina sendo observada nas maiores concentrações de carbono (figura 4). Ao final do período de decomposição (tempo 12), não se observa uma relação significativa entre a concentração de lignina e de carbono ($R^2 = 0,17$; $P = 0,069$). Entretanto, observa-se que com a redução na concentração de carbono através do processo de decomposição, ocorre um discreto aumento na concentração de lignina.

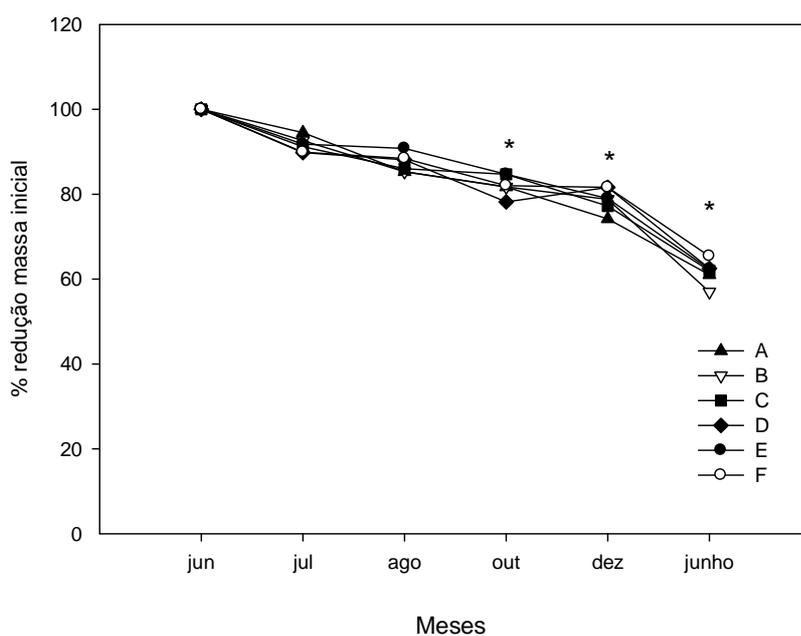


Figura 3. Taxa de decomposição foliar expressa pela redução na porcentagem de massa ao longo de um ano. Valores representam médias para cada uma das áreas de estudo. * Indicam diferença significativa em relação a massa no tempo zero ($P \leq 0,05$).

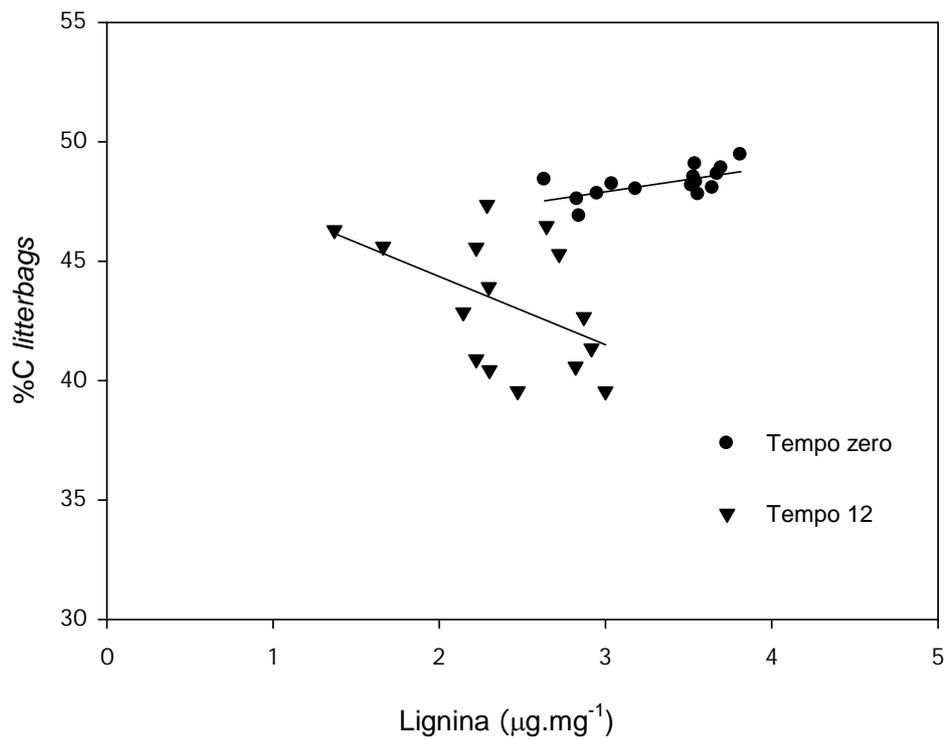


Figura 4. Relação entre a concentração de carbono orgânico e de lignina presente nos *litterbags* no tempo zero (folhas senescentes) e após 12 meses de decomposição. Dados representam todos os valores da concentração de carbono e lignina nas seis áreas de estudo (n= 2-3/área de estudo) para cada tempo de avaliação.

Acúmulo de C no solo

O conjunto de variáveis selecionadas no capítulo 1 pelo teste de *Kruskall-Wallis* foi capaz de explicar as variações observadas entre as áreas de estudo na concentração de carbono orgânico particulado ($P= 0,001$) e associado a minerais ($P< 0,001$). Do conjunto de variáveis testadas, a concentração de fósforo, enxofre, zinco e cobre exerceram maior influência sobre a concentração de carbono orgânico particulado na profundidade de 0 – 50 cm. Na fração CAM, do conjunto de variáveis testadas, a percentagem de argila, o pH e a concentração de cobre foram as variáveis que melhor explicaram a variação observada entre as áreas de estudo (tabela 5).

Quando as análises de regressão linear múltipla foram realizadas separadamente para cada uma das profundidades analisadas, não foi observado um efeito significativo do conjunto de variáveis testadas na profundidade de 25 – 50 cm para a fração COP e CAM. Na profundidade de 0 – 25 cm, a percentagem de argila foi a única variável responsável pela variação observada entre as áreas de estudo ($P= 0,03$) para o estoque de carbono nas frações COP e CAM.

Tabela 5. Resultado da análise de regressão linear múltipla entre as características do solo e o estoque de carbono orgânico nas frações particulado (COP) e associado a minerais (CAM) na profundidade de 0 – 50 cm nas seis áreas de estudo.

	COP	CAM
	P	P
	<i>0,001</i>	<i><0,001</i>
Argila (%)	0,181	0,000
pH	0,411	0,05
P (mg/dm ³)	0,037	0,419
K (mg/dm ³)	0,295	0,169
Al (cmol _c /dm ³)	0,463	0,797
Catroc (cmol _c /dm ³)	0,403	0,294
Mgtroc (cmol _c /dm ³)	0,397	0,721
Ca/Mg	0,193	0,532
S (mg/dm ³)	0,009	0,463
Zn (mg/dm ³)	0,024	0,117
Cu (mg/dm ³)	0,002	0,021

As correlações significativas ($P \leq 0,1$) estão destacadas em negrito.

O conjunto de características químicas da fração foliar de serrapilheira não foi associado com as variações observadas no estoque de carbono na fração COP ($P=0,189$) e na fração CAM ($P=0,872$) na profundidade de 0 -50 cm (Tabela 6). A razão lignina : N foi excluída da análise. Para investigar se o efeito das características químicas da serrapilheira poderia estar associado com o estoque de carbono em uma profundidade mais superficial, nós repetimos as análises de regressão linear para os valores de COP e CAM na profundidade de 0 - 25 cm. Entretanto, a relação entre o conjunto de variáveis testadas e o estoque de carbono nas frações do solo não foi significativa ($P > 0,1$).

Tabela 6. Análise de regressão linear múltipla entre as características químicas da fração foliar de serrapilheira e a concentração de carbono orgânico nas frações do solo (COP e CAM) na profundidade de 0 – 50 cm nas seis áreas de estudo.

	COP	CAM
	P	P
	<i>0,189</i>	<i>0,872</i>
Nitrogênio	0,845	0,426
Fósforo	0,743	0,332
Potássio	0,623	0,371
Cálcio	0,182	0,424
Magnésio	0,289	0,202
Enxofre	0,62	0,751
Cobre	0,535	0,302
Zinco	0,503	0,637
Ferro	0,72	0,264
Mangânes	0,615	0,375
Boro	0,137	0,71
Lignina	0,896	0,55
C:N	0,947	0,529

As correlações significativas ($P \leq 0,1$) estão destacadas em negrito.

Por outro lado, o conjunto de características químicas das raízes (N, P, K, Ca e Mg) foi associado com as variações observadas no estoque de carbono da fração COP ($P= 0,05$) e CAM ($P= 0,07$) (Tabela 7). Nas duas frações, a concentração de cálcio foi excluída da análise.

Do conjunto de variáveis testadas, a concentração de magnésio exerceu a maior influência sobre o estoque de carbono orgânico particulado. Na fração CAM, do conjunto de variáveis testadas, a percentagem de fósforo, potássio e magnésio foram as variáveis associadas com a variação observada entre as áreas de estudo (tabela 7).

Tabela 7. Análise de regressão linear múltipla entre a composição química das raízes e a concentração de carbono orgânico nas frações do solo (COP e CAM) na profundidade de 0 – 50 cm nas seis áreas de estudo.

	COP	CAM
	P	P
	0,05	0,07
Nitrogênio	0,248	0,238
Fósforo	0,695	0,048
Potássio	0,414	0,058
Magnésio	0,031	0,036

As correlações significativas ($P \leq 0,1$) estão destacadas em negrito.

Discussão

A matéria orgânica do solo não é homogênea, sendo caracterizada por diferentes frações que refletem diferentes estágios de decomposição dos resíduos orgânicos. O fracionamento físico do solo permite investigar os mecanismos de proteção e estabilização do carbono no solo e propõe níveis hierárquicos de organização das interações entre o carbono e os minerais do solo (Roscoe & Machado 2002; Mello 2006). Neste estudo, nós escolhemos o método do fracionamento granulométrico que separa os *pools* de carbono em uma fração que está complexada junto a matriz do solo, associada a minerais (CAM) e uma fração particulada (COP).

Nossos resultados apontaram uma maior proporção de carbono na fração CAM (cerca de 90% do COT), indicando que o carbono com maior tempo de residência no solo é o principal componente do estoque total. Por outro lado, o estoque de carbono na fração COP, caracterizado pela labilidade e pela composição semelhante à de resíduos vegetais em fase inicial de decomposição, compreende uma menor fração do estoque de COT (cerca de 10%).

A capacidade de sequestro de carbono pelo solo não foi diretamente proporcional à deposição de material orgânico, conforme observado no capítulo 1. Six et al. (2002) sugerem que as características físico-químicas do solo definem a capacidade de proteção aos *pools* de carbono no solo, limitando a capacidade máxima de sequestro de carbono no solo mesmo com o aumento no *input* de resíduos orgânicos. O acúmulo de matéria orgânica (MO) do solo é influenciado pela natureza química dos compostos orgânicos, pelo processo de estabilização da MO através de reações químicas com superfícies minerais e pela proteção dos resíduos orgânicos através da formação de barreiras físicas (Christensen 1996; Six et al. 2002).

Nossos resultados indicaram a influência de um conjunto de variáveis químicas e físicas do solo sobre o estoque de carbono nas frações do solo. Do conjunto de variáveis analisadas, a concentração de argila, de cobre e o pH foram significativamente associadas com a variação na fração CAM, enquanto que a concentração de fósforo, enxofre, cobre e zinco foram responsáveis pela variação na fração COP.

A estabilização da matéria orgânica do solo envolve a associação dos resíduos orgânicos com as partículas de argila e de silte, representada pelo estoque de carbono na fração CAM. Nós observamos uma relação positiva entre a concentração de argila e a fração CAM, corroborando a característica desta fração de representar um *pool* de carbono estável, fortemente adsorvido às partículas minerais do solo. A relação observada entre a concentração de cobre e a fração CAM pode ser associada com a função de cátions metálicos no processo de estabilização da matéria orgânica no solo (Alloway 1990), enquanto que o pH do solo parece influenciar a capacidade de troca de cátions entre a solução de solo e a matéria orgânica (Canellas et al. 2008). Estudos sugerem que os mecanismos de agregação entre a matéria orgânica e as partículas minerais formando os complexos organo-minerais estão associados com as propriedades

físicas do solo e com os processos que afetam a atividade microbiana (Schjonning et al. 1999; Thomsen et al. 1999), tais como a textura do solo e o pH, confirmando que as relações observadas neste estudo, principalmente a positiva relação entre o teor de argila e o estoque de carbono na fração CAM, estão relacionadas com os mecanismos de retenção de carbono no solo.

A matéria orgânica particulada é considerada um *pool* de carbono lábil, caracterizado pela transição entre o carbono da serrapilheira e a matéria orgânica associada a minerais (Christensen 2001). A relação observada entre a concentração de fósforo e enxofre e a fração COP pode estar associada com a liberação destes nutrientes via lixiviação durante a fase inicial de decomposição da serrapilheira. A liberação de fósforo da serrapilheira de *E. globulus* é relacionada com a redução de massa durante a decomposição (Madeira et al. 2007), enquanto que a lixiviação de sulfatos solúveis contribui significativamente para a liberação de enxofre da serrapilheira (Homann et al. 1991). Adicionalmente, a relação entre P e S na fração particulada pode estar associada com a liberação de aminoácidos durante o processo de decomposição (Poirier et al. 2005). É importante salientar que não foi caracterizada a composição química ao longo do processo de decomposição da serrapilheira e dessa forma, não é possível inferir que a positiva relação observada entre a concentração de P e S e o estoque de C na fração COP pode estar relacionada com a liberação destes nutrientes através da decomposição da serrapilheira. Adicionalmente, a positiva relação observada entre os nutrientes fósforo, enxofre, cobre e zinco pode estar associada com a importante função destes nutrientes na produtividade vegetal.

Six et al. (2001) e Poirier et al. (2005) verificaram que a composição química das diferentes frações do solo foi derivada, predominantemente, de material com origem vegetal, diferindo apenas na natureza dos compostos orgânicos de acordo com a fração

de solo analisada. Interessantemente, neste estudo, o conjunto de características químicas da fração foliar de serrapilheira não apresentou uma relação significativa com as frações COP e CAM. Nós acreditávamos que a concentração de lignina na serrapilheira estaria associada com o estoque de carbono, sobretudo na fração CAM, devido à sua recalcitrância. Todavia, a concentração de lignina e a razão lignina:N não foram associadas com a variação no estoque de carbono nas frações do solo.

A serrapilheira em plantações de *Eucalyptus* usualmente se decompõe mais lentamente e se acumula no solo em maior proporção comparada à florestas tropicais nativas (O'Connell & Sankaran 1997). Aerts & Chapin (2000) postulam que dentro de determinada região climática, os parâmetros relacionados com a composição química da serrapilheira exercem o maior controle sobre o processo de decomposição, sendo a razão lignina:N o melhor indicador da decomposibilidade. A concentração de lignina e a razão lignina:N podem ser utilizadas como indicadores do processo de decomposição dos resíduos orgânicos em mata de eucalipto, mas não de variações no acúmulo de carbono no solo. A constante k de decomposição observada para a plantação de *E. saligna* sob clima subtropical foi semelhante aos valores observados para plantações de *E. grandis* na Argentina (Goya et al. 2008), para *E. globulus* em Portugal (Madeira et al. 2007) e para *E. dives* e *E. rubida* na Austrália (Crockford & Richardson 2002).

Neste estudo nós observamos que após 12 meses de incubação na mata de eucalipto, a concentração de lignina nos *litterbags* apresentou uma discreta redução em relação à concentração das folhas senescentes (tempo zero). Durante o período de estudo, a redução observada na massa dos *litterbags* envolveu provavelmente, a liberação de nutrientes móveis, no caso de eucalipto, especialmente, potássio, magnésio e fósforo (Crockford & Richardson 2002; Goya et al. 2008; Madeira et al. 2007) e açúcares solúveis. A decomposição de compostos recalcitrantes, tais como a lignina,

compreende uma fase posterior do processo de decomposição, onde geralmente se observa um aumento na concentração de lignina e nitrogênio em relação à concentração inicial nas folhas senescentes, e a concentração de nitrogênio controla o processo de degradação da lignina (Berg & Meentemeyer 2002; Virzo De Santo et al. 2009). Nós observamos, que aos 12 meses de avaliação, a concentração de lignina apresentou uma relação negativa com o teor de carbono nos *litterbags*, indicando que o processo de degradação da lignina ocorre de maneira mais acentuada após o 1º ano de decomposição. Assim, a avaliação ao longo de um ano realizada neste estudo foi de curto prazo e, provavelmente, não foi capaz de detectar a relação entre os resíduos recalcitrantes da fração foliar da serrapilheira e o acúmulo carbono orgânico no solo.

Entretanto, a composição química das raízes superficiais, sobretudo a concentração dos macronutrientes, foram significativamente associadas com as variações no estoque de carbono na fração COP e CAM. A fração COP foi associada com a variação na concentração de potássio, enquanto que na fração CAM, além do potássio, a concentração de magnésio e fósforo foram associadas com o estoque de carbono nesta fração. A relação observada entre estes nutrientes e as frações de carbono no solo parece estar diretamente associada com o padrão de liberação destes nutrientes durante o processo inicial de decomposição. De fato, Madeira et al. (2007), estudando a decomposição de raízes de *E. globulus* observaram que a liberação de potássio, magnésio e fósforo é diretamente relacionada com a perda de peso, indicando a liberação destes nutrientes via lixiviação. Infelizmente, nós não avaliamos a concentração de lignina e açúcares solúveis nas raízes, mas a relação observada entre a concentração de nutrientes e as variações nas frações COP e CAM indicam que o processo de decomposição das raízes interfere fortemente na dinâmica de nutrientes no solo.

Russel et al. (2007) e Crow et al. (2009) mostraram que o acúmulo de matéria orgânica no solo foi fortemente associada com o processo de decomposição das raízes, diferindo apenas na relação entre a concentração de lignina e o estoque de carbono no solo. Adicionalmente, Russel et al. (2004) observaram que as características químicas das raízes foram mais importantes para o acúmulo de carbono no solo do que as características químicas das folhas senescentes, semelhante aos resultados observados neste estudo. Rasse et al. (2005) pontuam que a maior contribuição dos resíduos das raízes no estoque de carbono no solo envolve, além da maior recalcitrância química dos resíduos, a rápida estabilização da matéria orgânica através da maior interação com as partículas de argila e íons metálicos.

Conclusões

A composição química das raízes e as características do solo, sobretudo o teor de argila, foram os principais fatores associados com a variação no estoque de carbono na fração de carbono associado a minerais em uma floresta manejada com eucalipto. Adicionalmente, nossos resultados indicaram que a composição química dos tecidos vegetais, sobretudo das raízes, foram relativamente mais importantes para o acúmulo de carbono no solo do que a quantidade de resíduos orgânicos adicionados ao solo (produção de serrapilheira), corroborando os resultados observados no capítulo 1.

Referências Bibliográficas

- AERTS, R & CHAPIN, F.S. III. 2000. The Mineral Nutrition of Wild Plants Revisited: a re-evaluation of process and patterns. *Advances in Ecological Research* 30:1-67.
- ALLOWAY, B.J. The origins of heavy metals in soils. In: Alloway, B.J. (Ed.) **Heavy metals in soils**. New York: John Wiley, 1990. p.29-39.
- BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A. 2004. Armazenamento de carbono em frações lábeis da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 39:677-683.
- BERG, B. & MCCLAUGHERTY, C.A. 2008. Plant Litter: Decomposition, Humus Formation, Carbon Sequestration, 2nd edn. Springer Verlag Heidelberg, Berlin.
- BERG, B. & MEENTEMEYER, V. 2002. Litter quality in a north European transect versus carbon storage potential. *Plant and Soil* 242:83-92.
- CAMBARDELA, C.A & ELLIOT, E.T. 1992. Particulate soil organic matter change across a grassland cultivation sequence. *Soil Science Society of America Journal* 56: 777-783.
- CANELLAS, L.P et al. Reações da Matéria orgânica. In: SANTOS, G. A.; SILVA., L.; CANELLAS, L. P. ; CAMARGO, F. A. O. (Eds.) **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2.ed. rev., atual. e amp. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p. 7-16
- CHRISTENSEN, B.T. 1996. Carbon in primary and secondary organo-mineral complexes. In: Carter, M.R.; Stewart, B.A. (Eds) **Advances in Soil Science – Structure and Organic Matter Storage in Agricultural Soils**. Boca Raton: CRC Lewis Publishers, pp. 97-165.
- CHRISTENSEN, B.T. 2001. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover. *European Journal of Soil Science* 52:345-353.
- CLOUGH A; SKJEMSTAD, J.O. 2000. Physical and chemical protection of soil organic carbon in three agricultural soils with different contents of calcium carbonate. *Australian Journal of Soil Research* 38: 1005–1016.
- CROCKFORD, R.H. & RICHARDSON, D.P. 2002. Decomposition of litter in a dry sclerophyll eucalypt forest and a *Pinus radiata* plantation in southeastern Australia. *Hydrological Process* 16: 3317-3327.
- CROW, S.E.; LAJTHA, K.; FILLEY, T.R.; SWANSTON, C.W.; BOWDENS, R.D.; CALDWELL, B. A. 2009. Sources of plant-derived carbon and stability of organic matter in soil: implications for global change. *Global Change Biology* 15: 1003-2019.

- FOG K. 1988. The effect of added nitrogen on the rate of decomposition of organic matter. *Biology Reviews* 63: 433–462.
- GOYA, J.F., FRANGI, J.L.; PÉREZ, C., TEA, F.D. 2008. Decomposition and nutrient release from leaf litter in *Eucalyptus grandis* plantations on three different soils in Entre Ríos, Argentina. *Bosque* 29: 217-226.
- HOBBIE, S.E. 2000. Interactions between Litter Lignin and Soil Nitrogen Availability during Leaf Litter Decomposition in a Hawaiian Montane Forest. *Ecosystems* 3:484-494.
- HOMANN, P.S.; COLE, D.W. 1990. Sulfur dynamics in decomposing forest litter: Relationship to initial concentration, ambient sulfate and nitrogen. *Soil Biology and Biochemistry* 22: 621-628.
- KLEBER, M.; SOLLINS, P.; SUTTON, R. 2007. A conceptual model of organo-mineral interactions in soils: self-assembly of organic molecular fragments into zonal structures on mineral surfaces. *Biogeochemistry* 85:9-24.
- KÖGEL-KNABNER, I. 2002. The macromolecular organic composition of plant and microbial residues as inputs to soil organic matter. *Soil Biology and Biochemistry* 34: 139-162.
- LÜTZOW, M.V.; KÖGEL-KNABER, I.; EKSCHMITT, K.; MATZNER, E.; GUGGENBERGER, B.; MARSCHNER, B.; FLESSA, H. 2006. Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions – a review. *European Journal of Soil Science* 57: 426-445.
- Madeira, M.; Cortez, N.; Azevedo, A.; Magalhães, M.C., Ribeiro, C., Fabião, A. 2007. As plantações de eucalipto e o solo. In: Alves, A.M., Pereira, J.S.; Silva, J.M.N. (Eds) **O Eucalipto em Portugal: Impactes Ambientais e Investigação Científica**. ISA Press, pp.
- MELLO, N.A. 248 p. 2006. Tese (Doutorado) – **Efeito do Sistema de Manejo nos Atributos do solo, Movimentação de Sedimentos e Exportação de Carbono Orgânico numa Microbacia Rural sob Cultura do Fumo**. Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.
- MORRIS, S.J., BOHM, S., HALE-MARIAM, S., PAUL, E.A. 2007. Evaluation of carbon accrual in afforested agricultural soils. *Global Change Biology* 13: 1145-1156.
- O'CONNELL, A.M.; & SANKARAN, K.V. 1997. Organic Matter Accretion, Decomposition and Mineralization. In: Nambiar, E.K.S. & Brown, A.G. (Eds) **Management of Soil, Nutrients and Water in Tropical Plantation Forests**. Australian Centre for International Agricultural Research, pp. 443-480.
- POIRIER, N., SOHI, S.P., GAUNT, J.L.; MAHIEU, N.; RANDALL, E.W.; POWLSON, D.S.; EVERSHED, R.P. 2005. The chemical composition of measurable soil organic matter pools. *Organic Geochemistry* 36: 1174-1189.

- RASSE, D.P.; RUMPEL, C.; DIGNAC, M-F. 2005. Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilization. *Plant and Soil* 269: 341-356.
- ROSCOE, R & MACHADO, P. L. O. A. 2002. Fracionamento físico do solo em estudos da matéria orgânica. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste. 86 p.
- RUSSEL, A.E.; CAMBARDELLA, C.A.; EWEL, J.J, PARKIN, T.B. 2004. Species, Rotation and Life-form diversity effects on soil carbon in experimental tropical ecosystems. *Ecological Applications* 14:47-60.
- RUSSEL, A.E.; RAICH, J.W.; VALVERDE-BARRANTES, O.J.; FISHER, R.F. 2007. Tree Species Effects on Soil Properties in Experimental Plantations in Tropical Moist Forest. *Soil Science Society of America Journal* 71: 1389-1397.
- SCHONNING, P.; THOMSEN, I.K.; MOBERG, J.P.; DE JONGE, H.; KRISTENSEN, K.; CHRISTENSEN, B.T. 1999. Turnover of organic matter in differently textured soils. I. Physical characteristics of structurally disturbed and intact soils. *Geoderma* 89: 177-189.
- SIX, J.; CONANT, R.T.; PAUL, A.; PAUSTIAN, K. 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil* 241:155-176.
- SIX, J.; GUGGENBERGER, G.; PAUSTIAN, K.; HAUMAIER, L. ; ELLIOT, E.T. ; ZECH, W. 2001. Sources and composition of soil organic matter fractions between and within soil aggregates. *European Journal of Soil Science* 52:607-618.
- TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S.J. (1995). **Análises do solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre: Departamento de Solos da UFRGS. 2. ed. Revisada e Ampliada. 174 p.
- THOMSEN, I.K.; SCHONNING, P.; JENSEN, P.; CHRISTENSEN, B.T. 1999. Turnover of organic matter in differently texture soils. II. Microbial activity as influenced by soil water regimes. *Geoderma* 89: 199-218.
- VIRZO DE SANTO, A., DE MARCO, A., FIERRO, A.; BERG, B., RUTIGLIANO, F.A. 2009. Factors regulating litter mass loss and lignin degradation in late decomposition stages. *Plant and Soil* 318: 217-228.

EFFECTS OF TREE AGE ON CO₂ RESPIRATORY EMISSIONS FROM LEAVES AND STEMS OF *Eucalyptus globulus* (Labill.). SEASONAL WATER DEFICIT AND ACCLIMATION TO TEMPERATURE.

Introduction

Respiration represents a major flux of carbon between the biosphere and atmosphere (Cernusak et al. 2006), and is a crucial component in the flow of carbon in European forest ecosystems (Valentini et al. 2000). Increases in respiration rate reduce net primary productivity (NPP), influencing the carbon balance and decreasing the efficiency of the sequestration of atmospheric CO₂ by the trees. It has been considered that 50% of the daily amount of carbon assimilated by photosynthesis is released by respiration, especially in temperate forests (Waring et al. 1998; Litton et al. 2007), while in tropical forests this proportion may reach 70% (Chambers et al. 2004). Although the relationship between photosynthesis and autotrophic plant respiration is assumed to be constant throughout the day, the proportion of carbon used in the process of respiration of different organs (leaves, roots and stems) is variable along the day, influencing the plant's carbon balance (Ryan et al. 1997).

Respiration can be divided into two components, growth respiration, which involves the energy and metabolites used to build new tissues, and maintenance respiration, which refers to energy used for the metabolism of these plant tissues. However, stems and leaves differ in the proportion of energy required. The maintenance processes on the stem, formed largely by dead cells with lignified walls, require less energy per unit dry mass as compared

with the maintenance processes of leaves, which have, in comparison, a greater fraction of membranes and living cells (Gifford, 2003). Furthermore, the rate of maintenance and growth respiration of the stem occurs in different proportions according to the age of trees (Cerasoli et al. 2009; Ryan et al. 2009; Bosc et al. 2003) and season (Damesin et al. 2002; Ceschia et al. 2002; Zha et al. 2004).

Several studies have observed a decrease in the respiration rate of the stems as the trees become older (Bosc et al., 2003; Cerasoli et al. 2009; Ryan et al. 2009), but this reduction is not related to the rate of stem growth (Ryan et al. 2009). The reduction of CO₂ emissions by the stem in older trees may be related to the increase in the amount of anatomical barriers to the diffusion of CO₂ (Steppe et al. 2007) or the increase in the rate of cortical refixation (Teskey et al. 2008). At cellular level, the metabolic activity of living cells in the stem (cambium cells, parenchyma) and the processes of wood formation are influenced by environmental factors (Rossi et al. 2006; Smith, 2000).

Temperature is considered the main environmental factor influencing seasonal variation of leaf respiration, which is expected to increase exponentially with the increase in temperature. However, studies have found that leaf respiration has the ability to acclimate to changes in temperature (Pereira et al. 1986), in the short term, through changes in Q₁₀ as well as in the long term, through changes in respiratory capacity (Atkin and Tjoelker, 2003). Besides the influence of temperature, other environmental factors, such as irradiance and soil water conditions demonstrated to be able to affect leaf respiration rates (Zaragoza-Castells et al., 2008, Wright et al. 2006; Calcerrada-Rodriguez et al., 2010). Saveyn et al. (2008) observed a reduction in CO₂ efflux from stems during the day that seems to be associated with a reduction in cellular water potential during periods of high transpiration (Saveyn et al. 2007). This suggests that the turgor pressure of the stem cells may have an important role in the rate of CO₂ emission.

Eucalyptus tree plantations cover 18% of forest area in Portugal and the pulp and paper sector based on *E. globulus* round wood contributes with 0.7% to the Portuguese GDP and it is a net exporter, representing 4.4% of total exports of goods in 2008. Nevertheless, the sustainability and certification of forest management practices depends on forest carbon balance. A better understanding of the factors that influence the processes of respiration in trees is necessary to correctly estimate the contribution of different tree species to the carbon balance of regional biomes. In this study, we investigated the influence of environmental and ontogenetic factors on leaf and stem respiration rate in *E. globulus* trees of different ages during the summer and autumn of 2008.

Our objectives were: (a) compare the daily and seasonal pattern in respiratory CO₂ emissions from stem in trees of different age, (b) compare the seasonal pattern in leaf dark respiration rate in trees of different age, and (c) assess whether the seasonal variation in respiration of the stem and leaves is influenced by the tree water status.

Material and Methods

Study site and experimental design

The experiment was conducted in central Portugal, in two sites with clonal populations of *Eucalyptus globulus* Labill. (clone VC9), six-year-old (6y) and eleven-years-old (11y), respectively. Measurements were performed during the months in September (summer) and November (autumn) 2008. The distance between the two experimental areas is about 35 km (38° 22'N 8° 19' W and 38° 35'N 8° 36'W). Trees were planted at a North-South direction. Ramets of clones were planted at a spacing of 3.5 x 2 meters in the 6y stand and 3 x 2 meters in the 11y stand. In each of the studied areas, plots of similar size were delimited, and all measurements were performed in 4-6 randomly selected trees in each plot

on sunny days with similar average day temperature. Measurements were made on two dates during the summer and autumn of 2008 on the same trees. In summer, measurements were made on days 11 and 12 of September on the trees of the 11y stand and on 18 and 19 of September on trees with 6y stand. In the autumn, the measurements were performed on 06 and 07 of November on trees of 11 y stand and, on 19 and 20 of November on trees with the 6y stand.

Environmental conditions and water status of trees

The seasonal variation in air temperature, the vapour pressure deficit and total precipitation were obtained from a meteorological station (www.snirh.pt) located next to the two study areas (38 ° 39'N 8° 15'W) considering the similarity in altitude and distance from the coast, it can be considered that the two sites have similar climate. Leaf water potential was determined with a Scholander type pressure chamber (model 3005, Soilmoisture Equipment Co., USA) in completely developed leaves collected from the same branch used for measurements of leaf respiration. Leaf water potential was measured at pre-dawn (between 5 and 6 am).

Soil nutrients

The soil in both sites is sandy. To evaluate the availability of nitrogen and phosphorus in the two sites, eight capsules were buried in the soil at two different depths (15 cm and 30 cm), at each plot, in November and removed in January (68 days). Nutrient extraction and analysis followed the method by Skogley and Doberman (1996). Soil moisture was estimated using a soil profile probe (PR1, Delta-T, Cambridge, UK) at a depth of 100 cm in four to six different assessment points per site.

Gas exchange

CO₂ efflux from the stem - Stem CO₂ efflux (E_s) was measured using a portable gas exchange system (WMA, EG-2, PP systems, Amesbury, MA, USA) in a closed path configuration. For these measurements, a chamber was adapted and fixed on the surface of the stem at a height of 1.3 meters above the ground, always oriented to the North. The stem CO₂ efflux was determined by the rate of increase of CO₂ concentration determined from measurements every 8 seconds for a total period of 120 seconds. The measurements were repeated four times throughout the day (morning, noon, afternoon and evening). The temperature of the stem was determined simultaneously with measurements of E_s through probes inserted in the xylem. The rates of CO₂ efflux (E_s) were expressed per unit surface area of the stem. The radial growth of trees during the experimental period (September-November) was assessed by the increase in diameter at breast height (DBH), measured with dendrometric bands previously installed in the trees.

Leaf dark respiration - The leaf dark respiration (R_{leaf}) was determined using a portable infra-red (Li-6400, Li-Cor, Lincoln, NE, USA) in an open path configuration. Each measurement was performed at ambient temperature using the first fully expanded leaf of branches excised from the lower third of the crown of sampled trees (6 trees per plot). Preliminary measurements indicated that the leaf respiration rates were not affected when the branches are excised. After the measurements, the leaves were stored in coolers for the measurement of leaf area and fresh weight. Dry weight was determined after dried in an oven at 70 °C. Measurements of leaf dark respiration were carried out at predawn (5 - 6 am), simultaneously with the measurements of predawn leaf water potential. The leaf dark respiration rate was expressed per unit leaf area.

Tree Sap flow

The tree sap flux density was evaluated according to the method described by Granier (1987). Two sensors were inserted in the stem, one above the other, separated by a vertical distance of 10 cm. The depth of the sensors was 13 mm for 6y trees and 20 mm for 11y trees. Heat is applied constantly to the top sensor, while both sensors measure the temperature with a copper-constantan thermocouple. The sap flux density was calculated by the temperature difference between the two sensors (Granier 1987). Measurements were recorded every three minutes with a data logger (CR10X, Campbell Scientific, Logan, UT, USA) and the average was recorded every 30 minutes. The sap flow ($l\ h^{-1}$) was calculated as the product of sap flux density by the area of the stem. In the plot with 6y trees, because of problems with sensors, it was not possible to calculate the sap flow.

Relationship between temperature and respiration

The relationship between stem respiration rate and temperature was evaluated using the Q_{10} values (the increase in respiration after an increase of 10 °C of temperature). Q_{10} values were calculated using an exponential model between the stem CO_2 efflux rate and stem temperature (Ryan, 1991):

$$CO_2\ \text{efflux} = CO_2\ \text{efflux}(0) * e^{kT} \quad \text{Eq. (1)}$$

Where T is temperature of stem (C), k ($^{\circ}C^{-1}$) is the temperature coefficient and CO_2 efflux(0) is the CO_2 efflux at 0° C. Q_{10} values were calculated independently for each study area (6y and 11y) and season (summer and autumn), using all measurements taken throughout the day.

Although air temperatures were similar in the two sites during each of the measurement

periods, respiration rates were adjusted to 20° C using the following equation, to allow an easier comparison:

$$R = R(20^{\circ}\text{C}) * Q_{10}^{(T-20)/10} \quad \text{Eq. (2)}$$

To adjust the leaf dark respiration rate at 20° C, we assumed a value of Q_{10} equal to 2, based on previous experience with the same species (Ryan et al. 2009). The measurements throughout the day (morning, noon, afternoon and evening) of stem CO₂ efflux adjusted to 20 ° C were integrated and expressed as the daily average.

Statistics

Statistical differences between 6y and 11y trees were tested for each measurement date by t test and were considered significant if $P < 0.05$ (Sigmaplot 11, SPSS Science).

Results

Environmental and soil characteristics

The environmental conditions in the two sites in the summer and autumn are shown in Table 1. The average air temperature was slightly higher during summer in the 6y stand compared with to the 11y stand (21.6 and 20.9 °C, respectively). During the autumn, the average air temperature was similar between stands (13.5 and 13.6 °C). The soil water content was significantly higher and the atmosphere was more humid in the 11y stand, both in summer and autumn, compared the 6y stand (Table 1). The leaf water potential was lower in the 11y stand than in the 6y one in both seasons. The difference was significant in autumn. Soil nitrogen concentration was significantly higher (5.1%) in the 6y stand as compared to the area with 11y stand (1.6%). The concentration of phosphorus was similar in the two stands (4.6 and 4.8 mg/L for 6y and 11y trees, respectively).

Table 1. Seasonal variation in water status in the study areas with *Eucalyptus globulus* trees of 6-year-old (6y) and 11-year-old (11y). Values are average temperature (° C), vapour pressure deficit (kPa), soil moisture at a depth of 100 cm (vol %) and predawn water potential (MPa) in days of assessment during the summer and autumn 2008.

	Summer		Autumn	
	6y	11y	6y	11y
Temperature (°C)	21.6 (1.1)	20.9 (0.5)	13.6 (0.76)	13.5 (0.5)
VPD (kPa)	2.04 (0.34)	1.14 (0.08)	0.68 (0.06)	0.25 (0.03)
Soil moisture (% vol)	23.6 (4.5)	33.4 (1.7)	23 (4.6)	30.8 (1.9)
Water potential (MPa)	-1.4 (0.07)	-1.5 (0.07)	-0.36 (0.02)	-0.64 (0.05)

Standard errors of the average are shown in brackets (n= 8 for soil moisture and 6 for water potential).

Leaf dark respiration

Leaf dark respiration rate (R_{leaf}) showed different patterns according to season in the two stands (Fig. 1a). During the summer, the differences in R_{leaf} between 6y and 11y trees, expressed on a leaf area basis, were not statistically significant. In the autumn, this pattern changed and R_{leaf} was significantly higher in 11y ($0.77 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$) than on 6y trees ($0.28 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$).

To investigate the effect of tree age, on leaf respiration rate was standardized at 20°C according to equation (2) using a fixed Q_{10} value of 2, according to Ryan et al. (2009). The response of leaf respiration at 20°C ($R_{\text{leaf } 20^{\circ}\text{C}}$) showed no statistically significant difference between 6y and 11y trees in either season (Fig. 1b). Despite the lack of significant differences in $R_{\text{leaf } 20^{\circ}\text{C}}$ between stands in the summer and in the autumn it was observed that, leaf dark respiration rate of 6y and 11y trees increased significantly in autumn compared to the values observed in the summer (Fig. 1b).

The lack of significant difference in $R_{\text{leaf } 20^{\circ}\text{C}}$ between 6y and 11y trees may be associated with the absence of significant differences in specific leaf area (SLA) between trees of different ages (Table 2). Thus, the observed differences in leaf respiration rate at ambient temperature (Fig. 1a) were likely caused by the effect of temperature variation during the evaluation period.

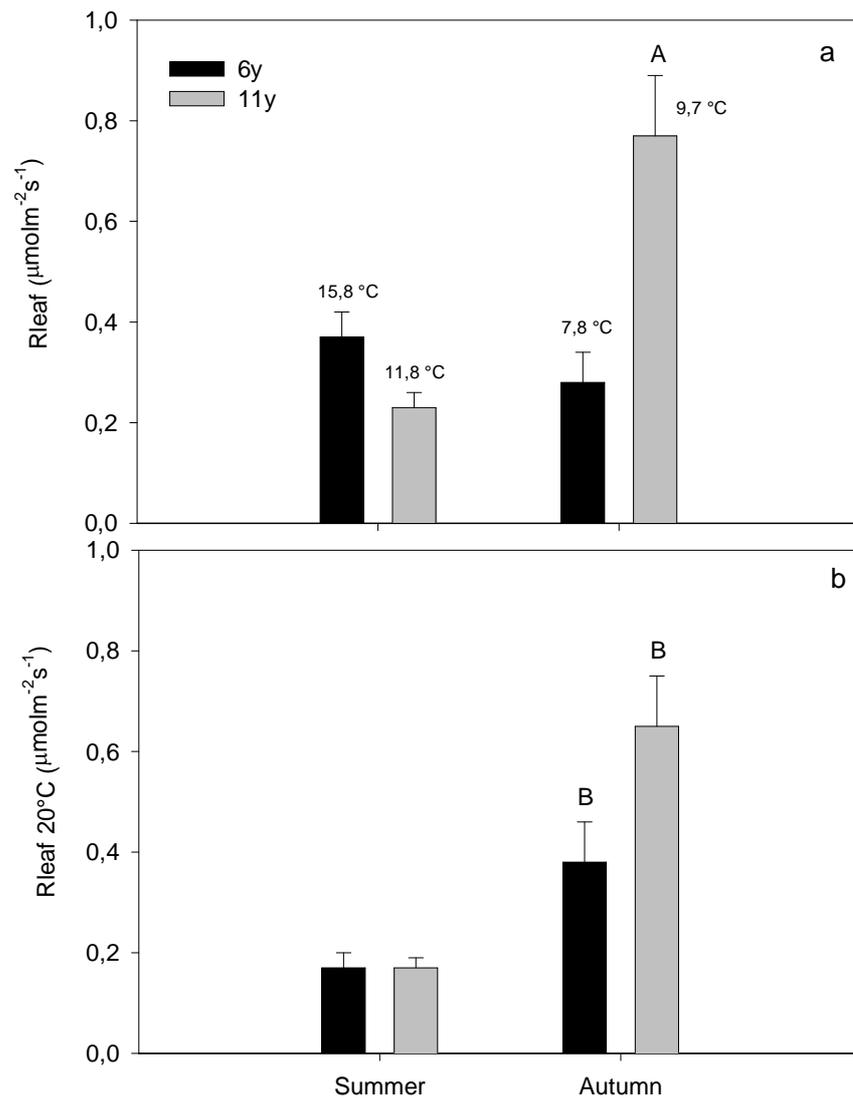


Figure 1. Rate of leaf dark respiration at ambient temperature (a) and leaf dark respiration rate in basal temperature of 20 °C (b) in 6-year-old (6y) and 11-year-old (11y) *E. globulus* measured in summer and autumn. Bars represent means \pm standard error (n = 4-6). The letter A indicates significant differences ($P \leq 0.05$) between trees of different ages, and B indicates significant differences ($P \leq 0.05$) among trees of the same age between summer and autumn. Air temperature at the time of measurement specified in the figure.

Table 2. Stem diameter at breast height (DBH) and specific leaf area (SLA) of *Eucalyptus globulus* trees of 6-year-old (6y) and 11-year-old (11y) in summer and autumn 2008. Standard errors of the average are shown in brackets (n= 6). *ns* = not statistically significant between trees of different age.

	Summer		Autumn	
	6y	11y	6y	11y
DBH (cm)	10.69 (0.7) ^{ns}	11.81 (0.2) ^{ns}	10.8 (0.4) ^{ns}	11.82 (0.2) ^{ns}
SLA (m ² Kg ⁻¹)	3.48 (0.26) ^{ns}	3.53 (0.14) ^{ns}	4,08 (0,41) ^{ns}	3.43 (0.07) ^{ns}

CO₂ efflux, radial growth and sap flow

Stem CO₂ efflux at ambient temperature (E_s) showed a similar daily pattern in the 6y and 11y trees in summer and autumn (Fig. 2a-b). In the two seasons evaluated, E_s increases gradually throughout the day and reaches the maximum value during the night. However, E_s at different times throughout the day were not significantly different between 6y and 11y trees both in summer and autumn.

To investigate the effect of tree age in the process of stem respiration, the stem CO₂ efflux rate was normalized at 20 °C according to equation (2) (Fig. 3). When the stem CO₂ efflux was set at 20 °C (E_s 20 °C) using Q_{10} values of 1.30 (summer, 6y), 1.60 (summer, 11y), 1.60 (autumn, 6y) and 1.28 (autumn, 11y), calculated according to equation (1), the effect of seasonal and stand differences were pronounced. In the summer, there were significantly higher values in E_s 20 °C in 6y trees, while in autumn, the highest values in E_s 20 °C occurred in 11y trees (Fig. 3), increasing more than twice as compared to the 6y stand. When only the effect of seasonality was investigated in trees of the same age, we observed that the increase in E_s 20 °C in the autumn was significant for trees with 11y as compared to those observed in the summer ($P < 0.01$). However, 6y trees were not significantly different in E_s at 20 °C between summer and autumn ($P = 0.185$).

The diameter at breast height (DBH) was not significantly different between 6y and 11y trees during the summer and autumn (Table 2). Trees with 6y showed a radial increment of 11 mm during September (late summer) to November (autumn). In 11y trees, the increase of radial growth between summer and autumn was substantially lower than that observed in 6y trees (0.1 mm). Daily average of sap flow in trees with 11y was significantly higher in the summer (0.42 lh⁻¹) compared to the autumn (0.19 lh⁻¹) (Fig. 4).

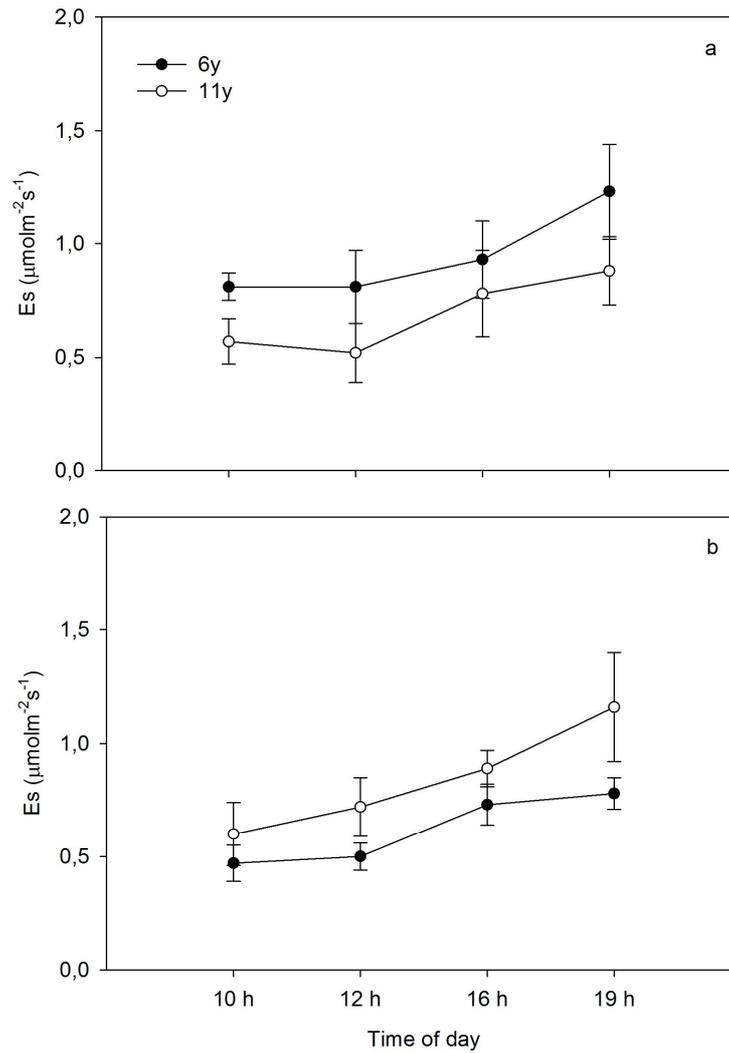


Figure 2. Diurnal variations in CO₂ efflux of stems in 6-year-old (6y) and 11-year-old (11y) *E. globulus* measured in summer (a) and autumn (b). Values represent mean \pm standard error (n = 6). * Indicate significant differences (P < 0.05) between trees of different ages. Measurements conducted at ambient temperature.

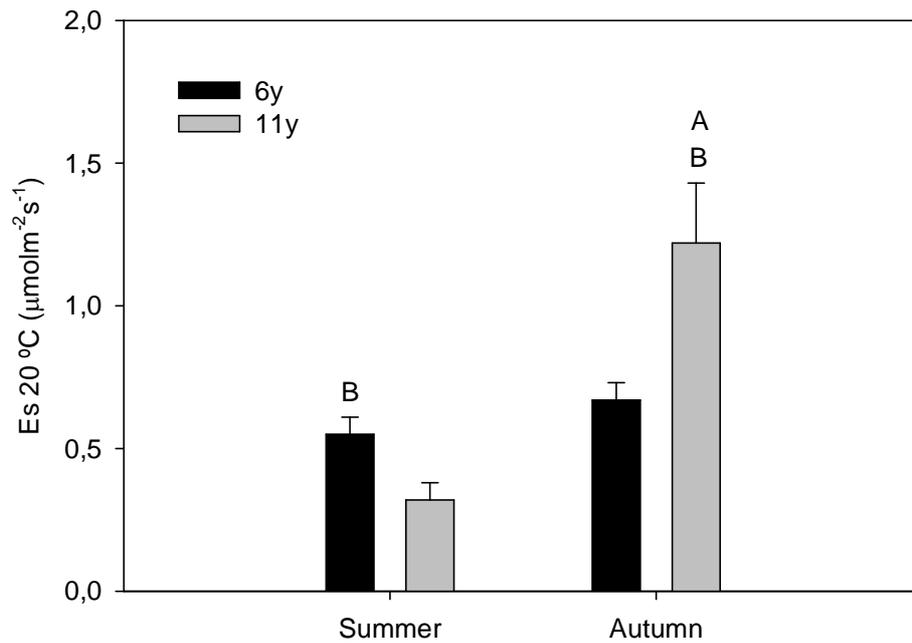


Figure 3. Stem CO₂ efflux of stems in the basal temperature of 20 ° C in 6-year-old (6y) and 11-year-old (11y) *E. globulus* measured in summer and autumn. Bars represent the average of all measurements taken throughout the day ± standard error (n = 24). The letter A indicates significant differences ($P \leq 0.05$) between trees of different ages, and B indicate significant differences ($P \leq 0.05$) among trees of the same age between summer and autumn.

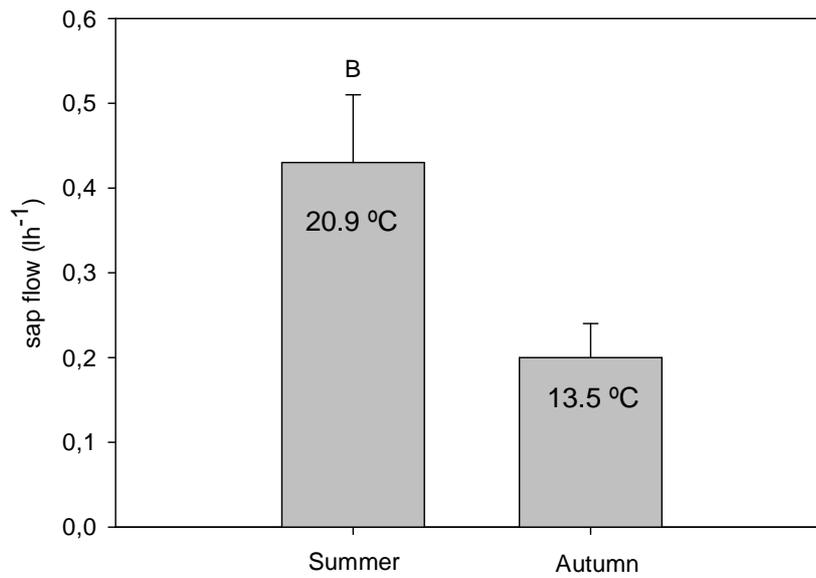


Figure 4. Daily average of sap flow in 11-year-old (11y) *E. globulus* measured in summer and autumn. Bars represent the integrated average of all measurements taken throughout the day during each season \pm standard error ($n = 24$). The letter B indicates significant differences ($P \leq 0.05$) among trees of the same age between summer and autumn. Average air temperature in the figure.

Relationship between respiration and water status of trees

Pre-dawn leaf water potential was similar in 6y and 11y trees during the summer (-1.4 MPa and -1.5 MPa, respectively). However, in autumn, in the 11y stand predawn water potential was significantly lower (-0.64 MPa) compared to 6y stand (-0.36 MPa) (Table 1). To verify the effect of water status of trees on the respiration rate, linear regression analysis was performed between E_s 20 °C (daily averages) and R_{leaf} 20 °C and corresponding predawn leaf water potential (Ψ_{pd}). In Figure 5a we see that the values of R_{leaf} 20 °C decrease with the reduction in Ψ_{pd} ($R^2 = 0.37$; $R_{\text{leaf}} = 0.511 + (0.22*\Psi_{\text{pd}})$; $P < 0.005$) in trees of both ages, indicating that the decline in leaf dark respiration rate during the summer may be partially associated with the effect of the seasonal drought.

During the summer, stem CO_2 efflux of trees of both ages did not show a significant relationship with Ψ_{pd} ($R^2 = 0.12$; $E_s = 0.92 + (0.33*\Psi_{\text{pd}})$; $P = 0.29$), indicating that the observed differences between 6y and 11y trees are not related to the water status of the trees (Fig. 5b). In autumn, the relationship between E_s 20 °C and Ψ_{pd} was significant ($R^2 = 0.59$; $E_s = 0.172 - (1.297*\Psi_{\text{pd}})$; $P < 0.05$), with higher values in stem efflux being observed at lower Ψ_{pd} (Fig. 5b).

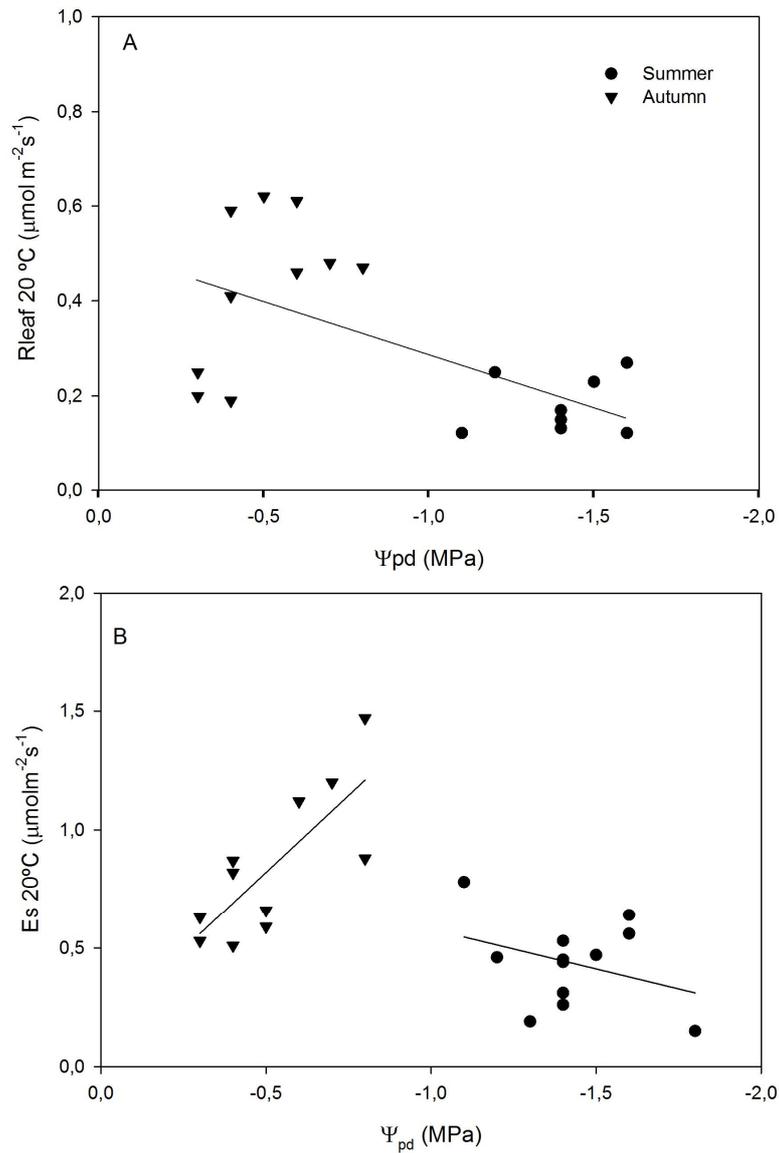


Figure 5. (A) Relationship between values of leaf dark respiration at 20 °C ($R_{leaf\ 20\ ^\circ C}$) and leaf water potential (Ψ_{pd}) in 6-year-old (6y) and 11-year-old (11y) *E. globulus* measured in summer and autumn. Data shown include all measurements taken at each site and date ($n = 12$). (B) Relationship between stem CO₂ efflux at 20 °C ($E_s\ 20\ ^\circ C$) and leaf water potential (Ψ_{pd}) in 6-year-old (6y) and 11-year-old (11y) *E. globulus* measured in summer and autumn. Data shown represent the average of all measurements taken throughout the day on six trees for each site and season ($n = 12$).

Discussion

The results of this study indicate a larger effect of the season on the respiratory emissions of leaves and stems than of the age of trees. Our results reject the initial hypothesis, since the increase in CO₂ respiratory emission in leaves and stem of adult trees was observed only during autumn. Thus, our results raised the following questions that we will try to answer: Why is the rate of leaf respiration and stem CO₂ efflux increased from summer to autumn? And why the respiration of 11y trees increases more during the autumn than 6 y with the seasonal variation?

Leaf respiration and the influence of drought water deficit

The leaf dark respiration in *Eucalyptus globulus* trees of different ages (6y and 11y) responded to seasonal variation in a similar manner, i.e. increasing in the autumn when predawn leaf water potential increased. The lower rate of leaf respiration in summer could be interpreted as a mechanism to regulate the carbon balance, and this could be particularly important during periods unfavorable to carbon assimilation due to water scarcity and high temperature, such as in the summer (Rodriguez-Calcerrada et al.,2010). Indeed, the decrease observed in leaf respiration during the summer was correlated to the reduction of leaf water potential. In fact, Pereira et al. (1986) studying the seasonal variation of photosynthetic rate of *E. globulus*, observed that photosynthesis was drastically reduced during the summer compared to the other seasons. Thus, the reduction in leaf dark respiration rate during summer may be responsible for maintaining a positive carbon balance when environmental conditions are unfavorable to carbon the assimilation, such as the hot and dry summer in the Mediterranean. A component of biochemical acclimation to temperature may be involved

(Pereira et al 1986).

The importance of tree size

The rate of CO₂ efflux from stem represents a combination of the CO₂ generated through the metabolism of living cells of the stem and the CO₂ dissolved in the transpiration stream transported in the xylem sap that can spread radially to the atmosphere (Teskey et al. 2008). Several studies observed an age/size-dependent decline in stem CO₂ efflux in some tree species (Bosc et al. 2003; Cerasoli et al. 2009; Ryan et al. 1997, 2009). However, the results of the present study do not fully support this hypothesis since respiration rate decreased with increasing the age of the trees, because, autumn measurements showed, a higher CO₂ efflux from the stem in 11y trees as compared to 6y trees. The 6y trees had a higher stem CO₂ efflux compared with 11y trees during the measurements conducted in summer. However, unlike 11y trees and the response observed in the leaf dark respiration rate, the stem CO₂ efflux in 6y trees remained constant during the transition from summer to autumn.

The largest stem CO₂ efflux was observed in summer in 6y trees. This may be associated with the increased availability of nitrogen in the soil. Several studies have observed a positive relationship between nitrogen concentration and stem respiration (Ryan et al., 1996, Stockfors & Linder, 1998, Maier 2001). The largest efflux in 6y trees in the summer can be explained also by the higher contribution of growth respiration at this time of year in younger trees, which is compatible with the increase in radial growth of 6y trees observed throughout the summer (data not shown) and the period between assessments. Thus, it is reasonable to assume that the largest stem efflux observed during summer in 6y trees is the result of a highest growth respiration in those trees as compared with 11y trees.

Instead of a reduction in respiratory rate with increasing age/size of trees, we observed, an increase in stem CO₂ efflux from stems of 11y trees compared to 6y trees, although radial stem growth ceased. However, these results were similar to that reported by Machado and Reich (2006) in three cold-temperate tree species of different sizes. That increase in respiration in larger trees was associated by Machado & Reich (2006) to the increase of the component of maintenance respiration. Hunt et al. (1999) observed a higher cost of maintenance processes in tissue associated with the structural support as the trees become larger and older. Thus, the results of this study indicate that the increase in stem CO₂ efflux in 11y trees was associated with a higher energy demand for maintenance of the cellular processes of stem cells and that these processes are more intense during autumn compared to summer.

Saveyn et al. (2007) observed that the stem CO₂ efflux was dependent on the water status of stem cells. The results of this study demonstrated that the stem efflux decreases linearly with the reduction in leaf water potential, indicating that the lower respiratory activity of stem cells observed in summer may be associated with the effects of seasonal drought. During the summer, the warm and dry Mediterranean climate favors the water loss due to high transpiration demand. The higher sap flow observed during the summer probably was the main factor responsible for the reduction in leaf water potential and, consequently, on respiratory activity of stems of 6y and 11y trees in relation to autumn.

The marked increase in stem CO₂ efflux observed in 11y trees during the autumn was associated with a reduction in sap flow and the increase in leaf water potential. Under better water conditions, there is an increase in metabolic activity of stem cells (Saveyn et al. 2007; 2008), and specifically on *E. globulus* grown trees, the water status recovery after a water deficit period seems to be particularly important to the processes of maintenance respiration. Cerasoli et al. (2009) showed that in eucalyptus trees, the respiration of cells

located between inner bark and cambium contributes proportionally more to stem efflux than xylem.

The lowest leaf water potential observed in 11y trees (-0.64 MPa) than the 6y trees (-0.36 MPa) during the autumn, probably will not reflect differences in availability of water in the stem cells between 6y and 11y trees. The lowest leaf water potential observed in 11y trees probably resulted from a significant hydraulic limitation that occurs as the trees become taller (Ryan et al., 2006).

The increase observed in stem efflux during autumn in 11y trees may be due to the increase in cambial activity related to maintenance processes of the cambium cells rather than the increase in the number of vessel elements, since no differences were observed in radial growth of 11y trees. The increase in maintenance respiration in autumn may be associated with cell wall formation and lignification of vessel elements occurring before the winter (Rossi et al. 2006). These processes are probably more intense in bigger trees and in better water conditions after the drought period typical of summer in the Mediterranean.

Conclusion

The Mediterranean region is considered one of Europe's most vulnerable regions to the effects of climate change. In this context, detailed knowledge of the factors linked to ontogeny and the season that can influence tree carbon balance is fundamental to sustainability of forest plantations areas. In this study, the observed results do not support the idea of a consistent negative relationship between respiration and age / size of the trees. The respiration of leaves and stems of *E. globulus* trees showed a similar variation with the season, increasing significantly in the autumn. Our data also suggest that as trees become larger and older, the increase in the processes associated with maintenance may be

responsible for the increase in respiration and that these processes are more intense during the autumn, with the recovery of water status after the period of summer drought.

Acknowledgments

This work was developed under the project "Limitations of carbon assimilation due to tree age in *Eucalyptus globulus* (Labill.)" coordinated by Dr. Sofia Cerasoli and funded by the Portuguese government (Foundation for Science and Technology 2009). Sofia Cerasoli is post-doc from the Foundation for Science and Technology (LV-504/2006). The stay of Tanise Luisa Sausen in Portugal was funded by the Training Program for Graduate Studies Abroad for the Coordination of Improvement of Higher Education Personnel (CAPES, Brazil).

References

- Atkin OK, Tjoelker MG (2003) Thermal acclimation and the dynamic response of plant respiration to temperature. *Trends in Plant Science* 8: 343-351.
- Bosc A, Grandcourt AD, Loustau D (2003) Variability of stem and branch maintenance respiration in a *Pinus pinaster* tree. *Tree Physiology* 23: 227-236.
- Cerasoli S, McGuire MA, Faria J, Mourato M, Schmidt M, Pereira JS, Chaves MM, Teskey RO (2009) CO₂ efflux, CO₂ concentration and photosynthetic refixation in stems of *Eucalyptus globulus* (Labill.). *Journal of Experimental Botany* 60: 99–105.
- Cernusak LA, Hutley LB, Beringer J, Tapper NJ (2006) Stem and leaf gas exchange and their responses to fire in a north Australian tropical savanna. *Plant Cell Environmental* 29: 632-646.
- Céschia E, Damesin C, Lebaube S, Pontailler JY, Dufrêne E (2002) Spatial and seasonal variations in stem respiration of beech trees (*Fagus sylvatica*). *Annals of Forest Science* 59: 801-812.
- Chambers JQ, Tribuzy ES, Toledo LC, Crispim BF, Higuchi N, Santos J, Araújo AC, Krujt B, Nobre AD, Trumbore SE (2004) Respiration from a tropical forest ecosystem: Partitioning of sources and low carbon use efficiency. *Ecological Applications* 14: S72-S88.
- Damesin C, Céschia E, Le Goff N, Offorini JM, Dufrene E (2002) Stem and branch respiration of beech: from tree measurements to estimations at the stand level. *New Phytologist* 153: 159-172.
- Edwards NT & Wullschleger SD (2000) Carbon dioxide efflux rates from stems of mature *Quercus prinus* L. & *Acer rubrum* L. trees do not appear to be affected by sapflow rates. *Journal of Sustainable Forest* 10: 125-131.
- Gifford RM (2003) Plant respiration in productivity models: conceptualization, representation and issues for global terrestrial carbon-cycle research. *Functional Plant Biology* 30:171-186.
- Granier A (1987) Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiology* 3: 309–320.
- Hunt ER, Lavigne MB, Franklin SE (1999) Factors controlling the decline of net primary production with stand age for balsam fir in Newfoundland assessed using an ecosystem simulation model. *Ecol Model* 122: 151–164.
- Litton CM, Raich, JW, Ryan MG (2007) Carbon allocation in forest ecosystems. *Global Climate Change* 13: 2089-2109.

- Machado JL, Reich PB (2006) Dark respiration rate increases with plant size in saplings of three temperate tree species despite tissue nitrogen and nonstructural carbohydrates. *Tree Physiology* 26: 915-923.
- Maier CA (2001) Stem growth and respiration in loblolly pine plantations differing in soil resource availability. *Tree Physiology* 21: 1183-1193.
- Pereira JS, Tenhunen JD, Lange OL, Beyschlag W, Meyer A, David MM (1986) Seasonal and diurnal patterns in leaf gas exchange of *Eucalyptus globulus* trees growing in Portugal. *Canadian Journal of Forest Research* 16:177-184.
- Rodríguez-Calcerrada J, Atkin OK, Robson M, Zaragoza-Castells J, Gil L, Aranda I (2010) Thermal acclimation leaf dark respiration of beech seedlings experiencing summer drought in high and low light environments. *Tree Physiology* 30: 214-224.
- Rossi S, Deslauriers A, Anfodillo T, Morin H, Saracino A, Motta R, Borghetti M (2006) Conifers in cold environments synchronize maximum growth rate of tree-ring formation with day length. *New Phytologist* 170:301-310.
- Ryan MG, Phillips N, Bond BJ. 2006. The hydraulic limitation hypothesis revisited. *Plant, Cell and Environment* 29: 367-381.
- Ryan MG, Cavaleri MA, Almeida AC, Penchel R, Senoch RS, Stape JL (2009) Wood CO₂ efflux and foliar respiration for *Eucalyptus* in Hawaii and Brazil. *Tree Physiology* 29: 1213-1222.
- Ryan MG, Huubarc M, Pongracic S, Raison RJ, McMurtrie RS (1996) Foliage, fine-root, woody-tissue and stem respiration in *Pinus radiata* in relation to nitrogen status. *Tree Physiology* 16:333-343.
- Ryan MG, Lavigne MB, Gower ST (1997) Annual carbon cost of autotrophic respiration in boreal forest ecosystems in relation to species and climate. *Journal of Geophysical Research* 28:871-883.
- Ryan MG (1991) Effects of climate change on plant respiration. *Ecological Applications* 1: 157-167.
- Saveyn A, Steppe K, Lemeur R (2007) Daytime Depression in Tree Stem CO₂ Efflux Rates: Is It Caused by Low Stem Turgor Pressure? *Annals of Botany* 99: 477-485.
- Saveyn A, Steppe K, Lemeur R (2008) Report on non-temperature related variations in CO₂ efflux rates from young tree stems in the dormant season. *Trees* 22:165-174.
- Skogley EO, Dobermann A (1996) Synthetic ion-exchange resins: Soil and environmental studies. *Journal of Environmental Quality* 25: 13-24.
- Smith H (2000) Phytochromes and light signal perception by plants – an emerging synthesis. *Nature* 407: 585 -591.

Steppe K, Saveyn A, McGuire MA, Lemeur R, Teskey RO (2007) Resistance to radial CO₂ diffusion contributes to between-tree variation in CO₂ efflux of *Populus deltoids* stems. *Functional Plant Biology* 34:785–792.

Stockfords J & Linder S (1998) Effect of nitrogen on the seasonal course of growth and maintenance respiration in stems of Norway spruce trees. *Tree Physiology* 18:155-166.

Teskey RO, Saveyn A, Steppe K, McGuire MA (2008) Origin, fate and significance of CO₂ in tree stems. *New Phytologist* 177:17–32.

Valentini R, Matteucci G, Dolman AJ et al. (2000) Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. *Nature* 404: 861–865.

Waring RH, Landsberg JJ, William M (1998) Net primary production production of forests: a constant fraction of gross primary production? *Tree Physiologist* 18:129-134.

Wright IJ, Reich PB, Atkin OK, Lusk CH, Tjoelker MG, Westoby M (2006) Irradiance, temperature and rainfall influence leaf dark respiration in woody plants: evidence from comparisons across 20 sites. *New Phytologist* 169: 309-319.

Zaragoza-Castells J, Sánchez-Gómez D, Hartley IP, Matesanz S, Valladares F, Lloyd J, Atkin OK (2008) Climate dependent variations in leaf respiration in a dry-land, low productivity Mediterranean forest: the importance of acclimation in both high-light and shaded habitats. *Functional Ecology* 22: 172-184.

Zha T, Kellomaki S, Wang KY, Ryypo A, Niinijto S (2004) Seasonal and annual stem respiration of Scots pines trees under boreal conditions. *Annals of Botany* 94: 889-896.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo constitui a primeira análise compreensiva do estoque de carbono em florestas manejadas de eucalipto sob clima subtropical no Sul do Brasil. A informação gerada neste estudo, visa subsidiar inventários regionais e nacionais sobre a eficiência de florestas plantadas no sequestro de carbono.

Os resultados deste estudo indicaram que a biomassa do caule representa o principal *pool* de carbono (média de 68% do carbono total) em um sistema florestal manejado com árvores de *E. saligna*, seguido pelo estoque de carbono no solo (média de 30% do carbono total) (Capítulo 1). A utilização de testes não-paramétricos e análises de regressão linear permitiu selecionar um conjunto de características do solo capazes de indicar variações no acúmulo de carbono na biomassa e no solo. Das características do solo analisadas, o teor de argila mostrou-se o principal determinante do estoque de carbono no solo (Capítulo 1 e 2).

A relação entre as características do solo e o estoque de carbono nas frações do solo demonstrou que o teor de argila, o pH e a concentração de cátions metálicos foram associados com as variações observadas na fração CAM, atuando nos processos de estabilização da matéria orgânica no solo (Capítulo 2). As características químicas da fração foliar de serrapilheira não foram associadas com as variações observadas no acúmulo de carbono nas frações do solo. A concentração de lignina foi particularmente importante na análise dos estágios do processo de decomposição dos *litterbags*. Entretanto sua contribuição no acúmulo de carbono na fração mais estável do solo (CAM) não foi observada neste estudo (Capítulo 2).

A investigação dos efeitos da composição química dos resíduos vegetais sobre o estoque de carbono no solo é particularmente importante em plantações de eucalipto,

visto que esses sistemas florestais são considerados como importantes drenos de carbono atmosférico devido a alta produção anual de serrapilheira e lenta taxa de decomposição. Nossos resultados apontaram que a relação entre a produção de serrapilheira e o estoque de carbono no solo não é positiva (Capítulo 1 e 2). As pequenas variações observadas no estoque de carbono nas frações do solo (COP e CAM) na mata de eucalipto parecem depender, principalmente, da composição química das raízes, principalmente a concentração de potássio, magnésio e fósforo, em detrimento da produção e composição química das folhas (Capítulo 2).

A disponibilidade de água no solo mostrou-se o principal fator responsável por variações no acúmulo de carbono na biomassa (Capítulo 1). A disponibilidade de água no solo foi fortemente associada com a concentração de carbono nas folhas e em menor proporção com o caule (Capítulo 1). O alto acúmulo de carbono observado na biomassa do caule das árvores foi associado com o padrão de alocação de biomassa e indica o importante papel deste componente no balanço de carbono em sistemas florestais manejados. A composição química do caule, sobretudo a concentração de celulose, é o principal produto econômico destes sistemas florestais em função da indústria papelreira. As diferentes espécies e/ clones utilizadas nestes sistemas florestais apresentam, de maneira geral, uma maior alocação de biomassa para o caule em detrimento da copa e do sistema radicular. Todavia, a função fisiológica do caule no balanço de carbono não está completamente elucidada.

Para investigar a influência de fatores ambientais e ontogenéticos no balanço de carbono, um experimento de campo foi conduzido em Portugal, sob clima Mediterrâneo a fim de analisar o efeito da variação na temperatura do ar e na precipitação em duas estações contrastantes sobre a emissão respiratória de folhas e do caule em árvores de *E. globulus* de diferentes idades. Os resultados do experimento conduzido em Portugal

(Capítulo 3) indicaram que condições ambientais favoráveis ao ganho de carbono, tais como no outono com uma temperatura mais amena e um melhor status hídrico após o período quente e seco do verão, também estimulam a atividade respiratória das folhas e do caule. O efeito das diferenças ontogenéticas sobre a magnitude das perdas respiratórias de *E. globulus* foi mais pronunciado sob determinadas condições ambientais, visto que o acentuado aumento observado na taxa de respiração foliar e no efluxo de CO₂ do caule das árvores mais velhas ocorreu apenas durante o outono e parece estar associado com o aumento na energia requerida para os processos de manutenção celular.

Diante do exposto, os resultados deste estudo indicaram que em sistemas florestais manejados com eucalipto a maior alocação de biomassa para o caule é o principal fator responsável pelo maior acúmulo de carbono neste componente e que gradientes de precipitação e/ou variações sazonais na disponibilidade de água no solo, podem ser o principal fator responsável por variações no balanço de carbono, tanto no estoque de carbono como na taxa respiratória do caule.

O acúmulo de carbono no solo foi associado, com as características intrínsecas do solo, sendo o teor de argila o principal indicador de variações no estoque de carbono. Além das características do solo, as características químicas dos resíduos orgânicos, principalmente das raízes, parecem ter maior influência sobre a incorporação e estabilização da matéria orgânica no solo em detrimento da produção de serrapilheira.

Futuros trabalhos abrangendo uma maior área de estudo no estado do Rio Grande do Sul, contemplando solos com variações na granulometria e no gradiente de precipitação, bem como a contribuição de associações micorrízicas são necessários para a completa caracterização do balanço de carbono em sistemas florestais manejados com eucalipto.