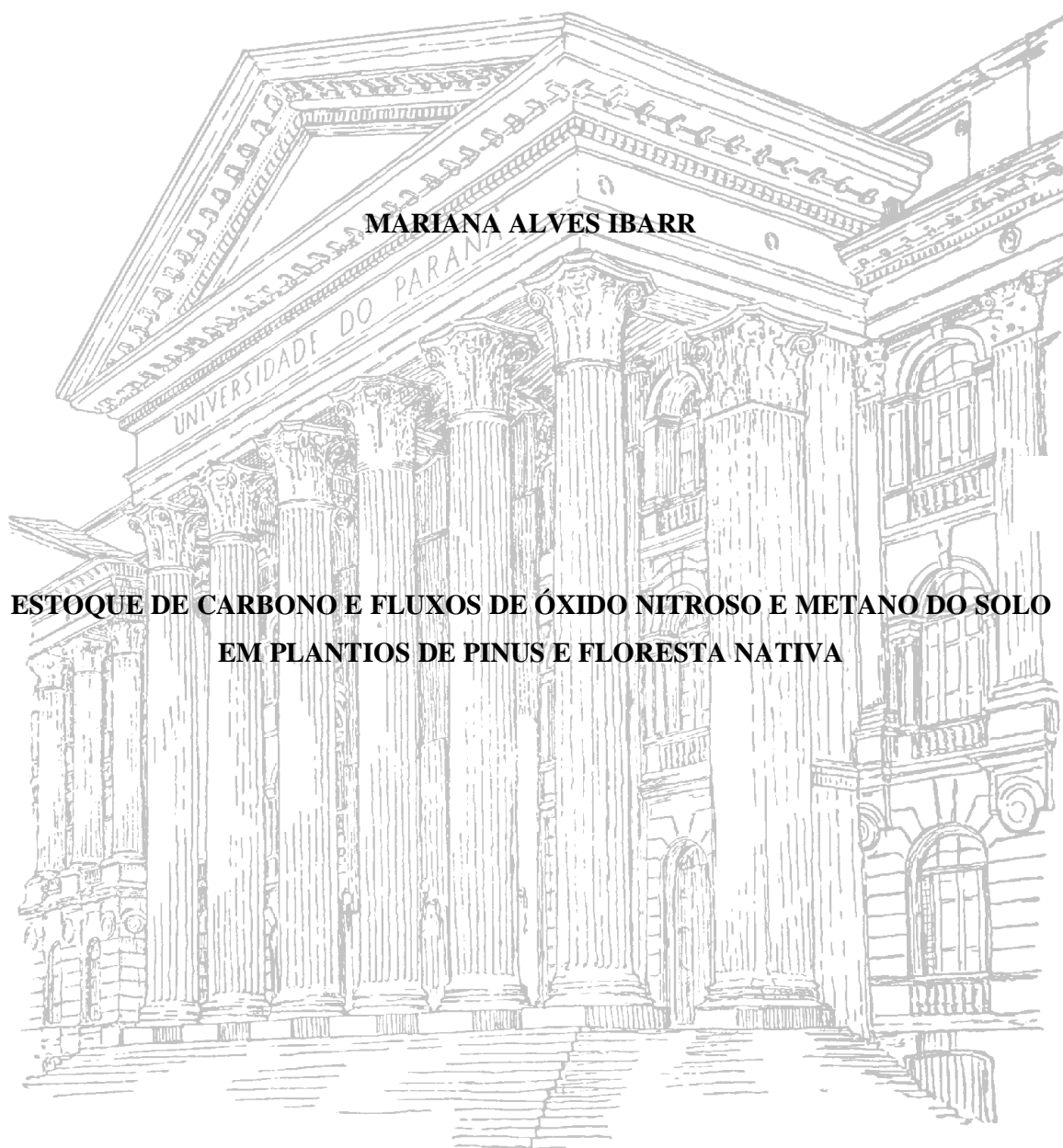


**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ**  
**SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

**MARIANA ALVES IBARR**

**ESTOQUE DE CARBONO E FLUXOS DE ÓXIDO NITROSO E METANO DO SOLO  
EM PLANTIOS DE PINUS E FLORESTA NATIVA**



**CURITIBA**

**2016**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ**  
**SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

**MARIANA ALVES IBARR**

**ESTOQUE DE CARBONO E FLUXOS DE ÓXIDO NITROSO E METANO DO SOLO**  
**EM PLANTIOS DE PINUS E FLORESTA NATIVA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração Solo e Ambiente, Linha de Pesquisa Qualidade, Manejo e Conservação do Solo e da Água, do Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito à obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Jeferson Dieckow

Co-orientadora: Dra. Josiléia Acordi Zanatta

Co-orientador: Prof. Cimélio Bayer

**CURITIBA**

**2016**

112 Ibar, Mariana Alves  
Estoque de carbono e fluxos de óxido nitroso e metano do solo em plantios de pinus e floresta nativa. Mariana Alves Ibar. – Curitiba : 2016.  
82 f. il.

Orientador: Jeferson Dieckow.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Agrárias. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo.

1. Solos – Teor de carbono. 2. Gases estufa. 3. Pinus taeda.  
I. Dieckow, Jeferson. II. Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Agrárias. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. III. Título.

CDU 631.417.1:504.7




## PARECER

A Banca Examinadora designada para avaliar a defesa da Dissertação de Mestrado de **MARIANA ALVES IBARR**, intitulada: "**Estoque de carbono e fluxo de óxido nitroso e metano em plantios de pinus e floresta nativa**", do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, após análise do texto e arguição do candidato, emitem parecer pela "**APROVAÇÃO**" da referida Dissertação. O candidato atende assim um dos requisitos para a obtenção do título de **Mestre em Ciência do Solo - Área de Concentração Solo e Ambiente**.

Secretaria do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, em Curitiba, 22 de fevereiro de 2016.

  
Prof. Dr. Jeferson Dieckow, Presidente

  
Prof. Dr. Frederico Costa Beber Vieira, Iº. Examinador

  
Dr. Marcos Fernando Gluck Rachwal, IIº. Examinador

  
Prof. Dra. Fabiane Machado Vezzani, IIIº. Examinador

Vá firme na direção das suas metas, porque  
o pensamento cria, o destino atrai e a fé  
realiza.

Lauro Trevisan

Se querer é poder, querer é vencer.

Rui Barbosa

Ao meu esposo Vagner, por fazer parte desta conquista.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida, e meus Anjos de Guarda pela força e proteção em todos os momentos.

A minha avó Maria, que me criou, e que através de seu exemplo, me ensinou valores que vou carregar até o fim dos meus dias.

Aos meus amados pais Evanir e Paula e Anaurelino e Marta, e a minha irmã Paolla, pelo amor e por todo o incentivo a realização dos meus objetivos.

Ao meu amigo e companheiro Wagner, por todo o amor, apoio e paciência de sempre.

À Universidade Federal do Paraná e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do solo pela oportunidade de estudo, e a CAPES pela concessão da bolsa.

Aos meus “pais científicos” Jeferson Dieckow e Josiléia Zanatta! Agradeço imensamente pela orientação, paciência, amizade e ensinamentos. São pessoas e profissionais como vocês que me espelho todos os dias.

Ao pesquisador Marcos Rachwal, pela amizade sincera, por toda dedicação empreendida na realização deste estudo e pelos momentos alegres.

Aos “irmãos científicos”, Bruna, Caroline, Júlia, Priscila e Reinaldo, pela amizade e companheirismo.

Aos estagiários de iniciação científica Bruno, Cristine, Fábio, Maurício, Michael, Paola, Taizy e Victoria, pela ajuda prestada e amizade.

À Embrapa Florestas e aos seus colaboradores, Amilcar, Arnaldo, Denise, Harry, Jacir, Mário, Marcela, Nádia, Onécimo, Osías e Renato, pelo acolhimento, pela ajuda nos trabalhos de campo, de laboratório e procesamento dos dados, e pelos momentos divertidos!

Ao projeto Saltus, pelo apoio financeiro necessário para a condução deste estudo.

A empresa Klabin e aos seus colaboradores James, Luis Carlos e sua equipe, pela disponibilização da área para a realização do estudo e apoio para a condução deste.

A todos que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste estudo!

Meu sincero e emocionado...

Muito obrigada!

## SUMÁRIO

<b>RESUMO GERAL</b> .....	viii
<b>GENERAL ABSTRACT</b> .....	x
<b>INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	12
<b>1. CAPÍTULO I. ESTOQUES DE CARBONO EM COMPARTIMENTOS DE SISTEMAS FLORESTAIS</b> .....	16
1.1. Resumo .....	16
1.2. Abstract .....	17
1.3. Introdução .....	18
1.4. Material e Métodos .....	19
1.4.1. Área de estudo .....	19
1.4.2. Tratamentos .....	19
1.4.3. Carbono do compartimento vegetal .....	22
1.4.3.1. Carbono da parte aérea e raízes .....	22
1.4.3.2. Carbono da serapilheira .....	24
1.4.4. Carbono orgânico do solo .....	25
1.4.5. Análise estatística .....	25
1.5. Resultados .....	26
1.5.1. Carbono do compartimento vegetal .....	26
1.5.2. Carbono orgânico do solo .....	28
1.5.3. Carbono nos compartimentos do sistema .....	30
1.6. Discussão .....	31
1.6.1. Carbono do compartimento vegetal .....	31
1.6.2. Carbono orgânico do solo .....	33
1.6.3. Carbono nos compartimentos do sistema .....	36
1.7. Conclusões .....	37
1.8. Referências Bibliográficas .....	37
<b>2. CAPÍTULO II. FLUXOS DE ÓXIDO NITROSO E METANO DO SOLO EM PLANTIOS DE PINUS COM DIFERENTES IDADES</b> .....	45
2.1. Resumo .....	45
2.2. Abstract .....	46
2.3. Introdução .....	47
2.4. Material e Métodos .....	48

2.4.1. Área de estudo .....	48
2.4.2. Tratamentos .....	48
2.4.3. Fluxos de óxido nitroso e metano do solo .....	50
2.4.4. Atributos do solo .....	52
2.4.5. Atributos da serapilheira .....	53
2.4.6. Atributos meteorológicos .....	54
2.4.7. Análise estatística .....	54
2.5. Resultados .....	54
2.5.1. Precipitação pluviométrica e temperatura do ar .....	54
2.5.2. Fluxos de óxido nitroso e metano do solo.....	55
2.5.3. Atributos do solo .....	58
2.5.4. Atributos da serapilheira .....	60
2.5.5. Fluxos de óxido nitroso e metano do solo e variáveis ambientais .....	60
2.6. Discussão .....	63
2.6.1. Fluxo de óxido nitroso do solo .....	63
2.6.2. Fluxo de metano do solo .....	65
2.7. Conclusões .....	68
2.8. Referências Bibliográficas .....	69
<b>CONCLUSÃO GERAL .....</b>	<b>76</b>
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>76</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>77</b>

# ESTOQUE DE CARBONO E FLUXOS DE ÓXIDO NITROSO E METANO DO SOLO EM PLANTIOS DE PINUS E MATA NATIVA<sup>1</sup>

Autora: Mariana Alves Ibarra

Orientador: Prof. Jeferson Dieckow

Co-orientadora: Dra. Josiléia Acordi Zanatta

Co-orientador: Prof. Cimélio Bayer

## RESUMO GERAL

O cultivo de árvores pode ser uma alternativa de sequestro de carbono na biomassa e no solo, e de diminuição de fluxos de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) e metano (CH<sub>4</sub>). Os objetivos deste estudo foram avaliar (1) a influência da idade de plantios de pinus na alocação de carbono no sistema solo-planta, (2) a contribuição do tempo de uso do solo sob florestas de pinus para o estoque de carbono do solo e (3) a magnitude e comportamento dos fluxos de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub> em solos sob plantio de pinus com diferentes idades comparativamente à floresta nativa. O trabalho foi desenvolvido em Telêmaco Borba – PR, num Latossolo Vermelho de textura argilosa. Os tratamentos avaliados consistiram de Floresta Estacional Semidecidual (MN), plantios em primeira rotação de *Pinus taeda* L. com 29 (P29) e 38 (P38) anos e, em segunda rotação, com 1 (P34+1), 9 (P29+9) e 18 (P31+18) anos. O estoque de carbono do solo (COT) foi avaliado até 100 cm de profundidade. O estoque de C na biomassa (parte aérea, raízes e serapilheira), sua distribuição e os fluxos de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub> foram avaliados apenas na MN, P34+1, P29+9 e P31+18. O estoque de C no sistema foi maior na MN (335,5 Mg ha<sup>-1</sup>) e nos plantios de pinus aumentou com a idade, de 138,5 Mg C ha<sup>-1</sup> em P34+1 a 267,5 Mg C ha<sup>-1</sup> em P31+18. O compartimento solo contribuiu com a maior quantidade de carbono nos sistemas, mas sua importância foi reduzida gradativamente à medida que aumentou a idade dos plantios e também o estoque de carbono na biomassa vegetal, chegando a 50 % no plantio de maior idade. A conversão da MN para pinus diminuiu significativamente o estoque de COT do solo, enquanto que o tempo de uso do solo sob pinus não apresentou efeito significativo. As emissões anuais cumulativas de N<sub>2</sub>O do solo nos plantios de pinus foram similares aos da MN (média de 0,67 kg N ha<sup>-1</sup>), exceto no do plantio mais jovem (P34+1), que emitiu mais (3,23 kg N ha<sup>-1</sup>). Em todos os tratamentos houve influxo de CH<sub>4</sub>, porém o maior consumo anual

ocorreu no solo da MN (-5,87 kg C ha<sup>-1</sup>), seguido dos plantios P34+1 e P31+18 (média de -1,85 kg C ha<sup>-1</sup>). Tanto o fluxo de N<sub>2</sub>O como de CH<sub>4</sub> foram influenciados por atributos físicos e químicos do solo. Os plantios de pinus com 18 anos foram eficientes em mitigar a emissão dos gases de efeito estufa, aumentando o sequestro de carbono na biomassa e o estoque de carbono total no sistema, além de apresentar fluxos equivalentes de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub> em relação à floresta nativa. A conversão do ecossistema nativo para floresta plantada reduziu os estoques de C no solo, mas o tempo de uso do solo com plantios de pinus não afetou o conteúdo de carbono no solo, mantendo-se abaixo da floresta nativa.

Palavras-chave: florestas plantadas, matéria orgânica, gases de efeito estufa, tempo de uso.

---

<sup>1</sup>Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. (81 f.) Fevereiro, 2016.

# CARBON STOCK AND NITROUS OXIDE AND METHANE FLUXES IN PINUS PLANTATIONS AND NATIVE FOREST<sup>2</sup>

Author: Mariana Alves Ibarra

Advisor: Prof. Jeferson Dieckow

Co-Advisor: Dra. Josiléia Acordi Zanatta

Co-Advisor: Prof. Cimélio Bayer

## GENERAL ABSTRACT

Trees plantations can be an alternative to carbon sequestration into biomass and soil, and to reduction of nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) and methane (CH<sub>4</sub>) fluxes. The objectives of this study were to asses (1) the age influence of pine plantations on carbon allocation in the system, (2) the contribution of land use time under pine forests to the soil carbon stock, and (3) the magnitude and behavior of N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub> fluxes in soils under pine plantation with different ages compared to native forest. The study was conducted in Telémaco Borba – PR, under a clay Red Latosol. Treatments consisted of Semideciduous Forest (MN), *Pinus taeda* L. plantations with 29 (P29) and 38 (P38) years in first rotation and with 1 (P34+1), 9 (P29+9) and 18 (P31+18) years in the second rotation. The soil carbon stock (COT) was evaluated up to 100 cm depth. The C stock in biomass (shoot, roots and leaf litter), their distribution and N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> fluxes were evaluated only in MN, P34+1, P29+9 e P31+18. The overall C stock was higher in MN (335.5 Mg ha<sup>-1</sup>), while pine plantations it increased over time, ranging from 138.5 Mg C ha<sup>-1</sup> in P34+1 to 267.5 Mg C ha<sup>-1</sup> in P31+18. The soil compartment contributed as the largest carbon pool in the system, but its importance was gradually reduced over plantations aging and biomass increments so that in oldest plantations it corresponded to half of the overall C stock. The MN conversion to pine significantly decreased the soil COT stock, while the land use time under pine did not present significant effect. The cumulative annual N<sub>2</sub>O emissions from the soil in pine plantations were similar to those observed in MN (average of 0.67 kg N ha<sup>-1</sup>), except in younger plantation (P34+1), that presented the biggest emission (3.23 kg N ha<sup>-1</sup>). All treatments showed CH<sub>4</sub> influx, but the biggest annual consumption occurred in MN soil (-5.87 kg C ha<sup>-1</sup>), followed by P34+1 and P31+18 plantations (average of -1.85 kg C ha<sup>-1</sup>). Both N<sub>2</sub>O as CH<sub>4</sub> fluxes were influenced for physical

and chemical soil properties. The *Pinus taeda* L. plantations with 18 years were effective in mitigate the greenhouses gases emission, increasing carbon sequestration in biomass and in total system carbon, besides presenting equivalent  $N_2O$  e  $CH_4$  fluxes in relation to native forest. Convertio of native ecosystem into pine plantation decreased the soil C stocks, but after pine establishment the soil carbon stock was maintained, although lower than in native forest.

Key-Words: planted forest, organic matter, greenhouse gass, use time.

---

<sup>2</sup>Soil Science Master Dissertation. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. (81 f.) February, 2016.

## INTRODUÇÃO GERAL

A emissão dos gases de efeito estufa (GEE) aumentou consideravelmente desde o período pré-industrial e as atividades antrópicas são as principais responsáveis por este fenômeno (IPCC, 2014). A intensificação da emissão dos GEE tem sido relacionada às mudanças do clima e notadamente ao aquecimento global, gerando discussões sobre possíveis estratégias de mitigação destes gases, sendo os principais dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) e óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ). No ano de 2009, o governo brasileiro instituiu a política nacional sobre mudança do clima (PNMC), oficializando o compromisso de redução das emissões dos gases de efeito estufa. A meta nacional é reduzir entre 36,1 e 38,9 %, permanecendo em uma linha de base de 3,2 Gt de  $\text{CO}_2$  equivalente (Brasil, 2016).

No âmbito das atividades relacionadas ao uso e manejo do solo, o plantio de florestas é considerado uma alternativa para a mitigação das emissões de GEE devido ao potencial de fixação de  $\text{CO}_2$  nos componentes arbóreos. Em nível mundial, as florestas plantadas brasileiras destacam-se por possuir taxas de crescimento 5 a 20 vezes maiores do que as florestas manejadas em clima temperado (Cerri, 2009) e por sequestrar 1,69 Pg de  $\text{CO}_2$  ano<sup>-1</sup> (IBÁ, 2015).

Ao mesmo tempo em que os plantios florestais sequestram consideráveis quantidades de carbono na biomassa, os solos florestais podem contribuir com o sequestro de C na forma de matéria orgânica (MO). O manejo dos solos florestais, como preparo reduzido e o período de rotação longo, aliado ao elevado aporte de serapilheira e raízes mortas contribuem para menores taxas de mineralização da MO, e conseqüente aumento do estoque de C do solo (Lal, 2004). O manejo dos solos florestais também pode favorecer a redução da emissão de  $\text{N}_2\text{O}$  e o aumento do influxo de  $\text{CH}_4$  devido à recuperação da densidade do solo, que influencia diretamente a porosidade e a umidade, fatores que controlam a dinâmica dos fluxos  $\text{N}_2\text{O}$  e  $\text{CH}_4$  (Smith et al., 2003; Allen et al., 2009; Livesley et al., 2009; Hiltbrunner et al., 2012). Além disso, as florestas plantadas promovem a melhor ciclagem do nitrogênio no sistema solo-planta, diminuindo sua disponibilidade na solução do solo e fazendo com que a intensidade de ocorrência dos processos de nitrificação, desnitrificação e a emissão de  $\text{N}_2\text{O}$  sejam menores (Livesley et al., 2009; Mc Daniel et al., 2014). A menor disponibilidade de nitrogênio na solução do solo também reduz o efeito inibitório à atividade das bactérias metanotróficas, que são responsáveis pela oxidação de  $\text{CH}_4$  (Allen et al., 2009; Livesley et al., 2009; Hiltbrunner et al., 2012).

Com o aumento da idade dos plantios florestais, o solo pode se beneficiar das melhorias nas propriedades químicas, físicas e biológicas, e por consequência ter ampliada a capacidade de mitigação de GEE que engloba armazenamento de carbono e mitigação de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O. Estudos realizados em outros países relatam o efeito positivo da idade da floresta no aumento do estoque de C da biomassa (Peichl e Arain, 2006) e do solo (Zhao et al., 2014), e na diminuição das emissões de N<sub>2</sub>O (Allen et al., 2009) e CH<sub>4</sub> pelo solo (Hiltbrunner et al., 2012). No entanto, é importante considerar que os estudos citados foram desenvolvidos em condições edafoclimáticas diferentes do Brasil, e que a dinâmica do C e dos fluxos de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub> são dependentes de uma complexa interação entre clima, solo, espécie e manejo florestal (Merino et al., 2004; Lal, 2005).

Estudos envolvendo estoque de carbono e fluxos de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub> em solos florestais no Sul do Brasil ainda são incipientes e insuficientes para esclarecer questionamentos sobre como a idade dos plantios florestais e o tempo de uso do solo sob cultivo podem afetá-los. O setor florestal nesta Região destaca-se por possuir o maior maciço florestal de pinus, devido à excelente adaptabilidade às condições edafoclimáticas e à baixa exigência nutricional das espécies do gênero (Ferreira et al., 2001). No Paraná, o pinus é cultivado desde a década de 50, sendo relevante para a geração de renda. Atualmente, a cultura contribui com R\$ 3,5 bilhões para a economia estadual (DERAL, 2015).

Considerando a importância econômica da cultura do pinus para o Estado do Paraná, e os questionamentos sobre o benefício ambiental relacionado ao plantio destas florestas no Sul do Brasil, os objetivos deste estudo foram avaliar (1) a influência da idade dos plantios de pinus na alocação do carbono no sistema, (2) a contribuição do tempo de uso do solo sob florestas de pinus para o estoque de carbono do solo, (3) a magnitude e comportamento dos fluxos de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub> em solos sob plantio de pinus em diferentes idades e comparativamente à floresta nativa.

### **Literatura Citada**

Allen K, Corre MD, Tjoa A, Veldkamp E. Soil nitrogen-cycling responses to conversion of lowland forests to oil palm and rubber plantations in Sumatra, Indonesia. *PlosOne*, 2015; 10:1-21.

Brasil. Política nacional sobre mudança do clima [internet]. Brasília, DF; Ministério do Meio Ambiente – MMA; 2016 [acesso em: 02 mar. 2016]. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/clima/politica-nacional-sobre-mudanca-do-clima>.

Cerri CC. Práticas de gestão para redução da emissão de gases de efeito estufa e remoção de carbono na agricultura, pecuária e engenharia florestal brasileira [internet]. Rio de Janeiro, RJ: Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável – FBDS; 2009 [acesso em: 28 dez. 2015]. Disponível em: <http://www.fbds.org.br/IMG/pdf/doc-76.pdf>.

DERAL – Departamento de Economia Rural. Valor bruto da produção agrícola paranaense em 2014 [internet]. Curitiba, PR: Secretaria de Estado da Agricultura e Abastecimento; 2015 [acesso em: 04 dez. 2015]. Disponível em: <http://www.agricultura.pr.gov.br/arquivos/File/deral/AnaliseVBP2014Resumida.pdf>.

Ferreira CA, Silva HD, Reissmann CB, Bellote AFJ, Marques R. Nutrição de pinus no sul do Brasil: diagnóstico e prioridades de pesquisa. Ed 1a. Colombo: Embrapa Florestas; 2001. (Documentos, 60).

Hiltbrunner D, Zimmermann S, Karbin S, Hagedorn F, Niklaus PA. Increasing soil methane sink along 120-year afforestation chronosequence is driven by soil moisture. *Global Change Biology*, 2012; 18:3664-3671.

IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores. Indústria Brasileira de Árvores 2015 [internet]. Brasília, DF: IBÁ; 2015 [acesso em: 04 dez. 2015]. Disponível em: [http://www.iba.org/images/shared/iba\\_2015.pdf](http://www.iba.org/images/shared/iba_2015.pdf).

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2014: synthesis report. In: Core Writing Team, Pachauri RK, Meyer L, editors. Fifth assesment report. Geneva, Switzerland; 2014. p. 1-151.

Lal R. Forest soils and carbon sequestration. *Forest Ecology and Management*, 2005; 220:242-258.

Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 2004; 123:1-22.

Livesley SJ, Kiese R, Miehle P, Weston CJ, Butterbach-Bahl K, Arndt SK. Soil-atmosphere Exchange of greenhouse gases in a *Eucalyptus marginata* woodland, a clover-grass pasture and *Pinus radiata* and *Eucalyptus globulus* plantations. *Global Change Biology*, 2009; 15:425-440.

McDaniel MD, Kaye JP, Kaye MW. Do “hot moments” become hotter under climate change? Soil nitrogen dynamics from a climate manipulation experiment in a post-harvest forest. *Biogeochemistry*, 2014; 121:339-354.

Merino A, Batallón PP, Macías F. Responses of soil organic matter and greenhouse gas fluxes to soil management and land use changes in a humid temperate region of Southern Europe. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004; 36:917-925.

Peichl M, Arain MA. Above- and belowground ecosystem biomass and carbon pools in an age-sequence of temperate pine plantation forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006; 140:51-62.

Smith KA, Ball T, Conen F, Dobbie KE, Massheder J, Rey A. Exchange of greenhouse gases between soil and atmosphere: interactions of soil physical factors and biological processes. *European Journal of Soil Science*, 2003; 54:779-791.

Zhao J, Kang F, Wang L, Yu X, Zhao W, Song X, Zhang Y, Chen F, Sun Y, He T, Han H. Patterns of biomass and carbon distribution across a cronosequence of chine pine (*Pinus tabulaeformis*) forests. *PlosOne*, 2014; 9:1-12.

## CAPÍTULO I. ESTOQUES DE CARBONO EM COMPARTIMENTOS DE SISTEMAS FLORESTAIS

### RESUMO

Altas taxas de crescimento e manejo do solo podem favorecer o sequestro do dióxido de carbono atmosférico em plantios florestais, mas a magnitude deste efeito depende da produtividade do sítio, do tempo de uso e da idade do plantio florestal. Os objetivos deste estudo foram avaliar a influência do tempo de uso do solo sob floresta de pinus no estoque de carbono do solo e as alterações na alocação de carbono nos compartimentos do sistema com o aumento da idade. O trabalho foi desenvolvido em Telêmaco Borba – PR, sob um Latossolo Vermelho textura argilosa. Os tratamentos avaliados foram Floresta Estacional Semidecidual (MN), plantios de *Pinus taeda* L. com 29 (P29) e 38 (P38) anos em primeira rotação e com 1 (P34+1), 9 (P29+9) e 18 (P31+18) anos em segunda rotação. Os estoques de carbono da serapilheira, obtida por amostragem em área pré-determinada, e do solo, amostrado em subcamadas até 100 cm de profundidade, foram determinados por análise elementar, enquanto que o estoque de carbono da biomassa vegetal (parte aérea + raízes) foi estimado por equações alométricas. No pinus, a parte aérea foi o maior reservatório de carbono em biomassa, que aumentou com a idade do cultivo, ao ponto do pinus mais velho (P31+18) se igualar ao da MN. O estoque de C das raízes foi superior na MN (25,32 Mg ha<sup>-1</sup>) do que nos plantios de pinus, onde o estoque de carbono aumentou até a idade de nove anos (P29+9), possivelmente indicando uma estabilização do volume radicular. O menor estoque de carbono na serapilheira do pinus refletiu o comportamento dos estoques de carbono da parte aérea, com 5,25 Mg C ha<sup>-1</sup> no plantio P29+9 e 8,49 Mg C ha<sup>-1</sup> em P31+18. O estoque de COT do solo diminuiu aproximadamente 30 % com a conversão da MN para pinus, tanto na camada de 0-30 cm, como na camada de 0-100 cm. A alteração no estoque de C do solo ocorreu no primeiro ciclo de cultivo de pinus, sendo que a continuidade do uso não implicou em mudanças no conteúdo de C do solo, que se manteve ao redor de 130 Mg C ha<sup>-1</sup>. A MN apresentou o maior reservatório de carbono total (335,5 Mg ha<sup>-1</sup>), seguida de P31+18 (267,5 Mg ha<sup>-1</sup>), P29+9 (203,3 Mg ha<sup>-1</sup>) e P34+1 (138,5 Mg ha<sup>-1</sup>), sendo que o compartimento solo contribuiu com a maior proporção. A alocação de carbono nos sistemas aumentou gradualmente com a idade dos plantios, sendo que as maiores mudanças foram observadas no compartimento vegetal. O uso do solo com pinus reduziu o estoque de carbono total do ecossistema nativo, mas conseguiu manter inalterado o estoque de carbono do solo, mantendo-se abaixo deste.

Palavras-Chave: sistemas florestais, sequestro de carbono, matéria orgânica.

## CHAPTER I: CARBON STOCKS IN COMPARTMENTS OF FOREST SYSTEMS

### ABSTRACT

High growth rates and soil management of forest plantations constitute factors that favor de carbon dioxide sequestration, but the magnitude of the effect depends of site productivity, of use time and of the forest plantation age. The objectives of this study were to evaluate the influence of land use time under pine forest in soil carbon stock and the alterations in the carbon allocation in the system compartments with the age increasing. The study was developed in Telêmaco Borba – PR, under a clay Red Latosol. The treatments were Semideciduous Forest (MN), *Pinus taeda* L. with 29 (P29) and 38 (P38) years in first rotation and with 1 (P34+1), 9 (P29+9) and 18 (P31+18) years in second rotation. Litter and soil carbon stocks (eight layers up to 1 m depth), were analysed by dry combustion, while biomass carbon stock (shoot + roots) was estimated by allometric equations. Shoot was the larger biomass carbon reservoir, wich increased with the pine plantations age, becoming similar to that of MN in the oldest plantation (P31+18). Root carbon stock was higher in MN (25.32 Mg C ha<sup>-1</sup>) than in pine plantations, where the stock increased until the 9<sup>th</sup> year (P29+9) but not longer, possibly indicating a root volume stabilization. The smallest carbon stock in pine litter reflected the trend on shoot carbon stock, with 5.25 Mg C ha<sup>-1</sup> in P29+9 plantation and 8.49 Mg C ha<sup>-1</sup> in P31+18. The soil carbon stock in MN decreased about 30 % after MN into pine, either in 0-30 or 0-100 cm layer. The change in the soil C stock occurred in the first pine crop cycle, being that the use continuity did not result in the soil carbon content changes, which stabilized around 130 Mg C ha<sup>-1</sup>. MN had the largest soil C reservoir (335.53 Mg ha<sup>-1</sup>), followed by P31+18 (267.5 Mg ha<sup>-1</sup>), P29+9 (203.3 Mg ha<sup>-1</sup>) and P34+1 (138.5 Mg ha<sup>-1</sup>), being the soil compartment the main contributed or carbon allocation in the systems gradually increased with pine ages, being that the biggest changes were observed in vegetable compartment. The conversion of MN into pine reduced the total ecosystem carbon stock, but after pine was established, the carbon stock was maintained, yet at a lower level.

Keywords: forest systems, carbon sequestration, organic matter.

### 1.3. INTRODUÇÃO

É consenso mundial que o plantio de florestas possui papel fundamental para a atenuação das mudanças do clima, e sua importância se deve principalmente ao potencial de sequestro e armazenamento de carbono (IPCC, 2014; FAO, 2015). Em um sistema florestal, o carbono é alocado na biomassa e no solo, e quando somados, constituem o maior reservatório de C se comparado a outros sistemas de uso do solo (Lal, 2005; Jandl et al., 2007).

A taxa de sequestro de carbono na biomassa pode variar em função das condições de clima, solo, espécie e práticas silviculturais (Mund et al., 2002; Lal, 2005; Keith et al., 2009; Samuelson et al., 2014) que controlam a taxa de crescimento das árvores. Nas condições climáticas brasileiras, é possível obter as maiores produtividades do mundo para eucalipto e pinus, em média  $39 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  e  $31 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , respectivamente (IBÁ, 2015). Em regiões com sítio florestal de boa qualidade, com espécies melhoradas geneticamente e conduzidas com manejo adequado, as produtividades podem chegar a  $60 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  para eucalipto e ultrapassar  $40 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  para pinus (IPEF, 2014; SFB, 2016). Essas taxas de crescimento implicam em elevadas taxas de sequestro de carbono, chegando a  $460 \text{ Tg C ano}^{-1}$  (IBÁ, 2015).

O aumento da idade da floresta também promove o aumento do estoque de carbono na biomassa (Peichl e Arain, 2006; Samuelson et al., 2014; Zhao et al., 2014), fazendo com que a contribuição deste compartimento seja modificado com o tempo (Pregitzer e Euskirchen, 2004; Zhao et al., 2014). No entanto, a maioria dos estudos que quantifica o crescimento da parte aérea em florestas o faz com interesse em produtividade de madeira, obtendo o volume produzido e raramente quantifica a biomassa e o conteúdo de carbono.

O sequestro de C no solo é mais complexo e depende do balanço entre adição de C pelo aporte de serapilheira e raízes, e saída pela mineralização da matéria orgânica. Este balanço é diretamente influenciado pelos mesmos fatores que inicialmente controlam a taxa de sequestro de C na biomassa, porém no solo, regulam o aporte e as taxas de perda da matéria orgânica (Jobbágy e Jackson, 2000; Lal, 2005; Jandl et al., 2007).

O manejo dos solos florestais, como preparo reduzido e rotações com ciclos longos (>15 anos) contribuem para a menor exposição da matéria orgânica do solo (MOS), o que reduz a oxidação biológica, e conseqüentemente, pode promover o aumento do estoque de carbono do solo (Balbinot et al., 2003). O uso contínuo com florestas por vários ciclos pode acentuar este benefício (Jandl et al., 2007). Todavia, a crescente demanda por energia e o constante reajuste no preço deste insumo fazem com que muitas empresas do setor florestal

utilizem os resíduos da colheita para a geração de co-energia em suas fábricas, deixando o solo praticamente descoberto e com baixo aporte de resíduos. O efeito desta prática pode refletir diretamente nos estoques de carbono do solo (Jandl et al., 2007; Hytönen e Moilanen, 2014; Achat et al., 2015). A magnitude deste efeito, porém, ainda é pouco conhecida, pois estes estudos exigem longos períodos de experimentação e são dependentes dos fatores solo e clima local.

Assim, considerando o benefício ambiental que as florestas plantadas podem propiciar a mitigação de CO<sub>2</sub>, este estudo tem por objetivos (1) avaliar a influência do tempo de uso do solo sob florestas de pinus no estoque de carbono do solo e (2) a contribuição da idade destes plantios na alocação de carbono nos compartimentos do sistema.

## **1.4. MATERIAL E MÉTODOS**

### **1.4.1. ÁREA DE ESTUDO**

O estudo foi realizado na Fazenda Monte Alegre, de propriedade da Empresa Florestal Klabin S.A., situada no município de Telêmaco Borba – PR, a uma altitude de 880 m. O relevo da região é suave ondulado e o clima é subtropical sem estação seca definida (Cfa), com temperatura média anual de 20 °C e precipitação anual entre 1400 e 1600 mm, segundo classificação de Köppen (Caviglione et al., 2000). A vegetação nativa remanescente na área de estudo é Floresta Estacional Semidecidual com zona de contato com Floresta Ombrófila Mista. O solo foi classificado como LATOSSOLO VERMELHO distrófico, conforme Embrapa (2013).

### **1.4.2. TRATAMENTOS**

Os tratamentos foram selecionados conforme cronosequência de uso do solo, constituída por um tratamento referência (MN) e sua conversão para plantios de *Pinus taeda* L. (Tabela 1).

**Tabela 1.** Caracterização dos tratamentos avaliados. Telêmaco Borba – PR.

Tratamento	Ano de Implantação	1ª rotação	2ª rotação	Uso florestal	Identificação
		Tempo (anos)			
Floresta Estacional Semidecidual (estágio sucessional médio)					MN
<i>Pinus taeda</i>	1986	29	-	29	P29
<i>Pinus taeda</i>	1977	38	-	38	P38
<i>Pinus taeda</i>	1979	34	1	35	P34+1
<i>Pinus taeda</i>	1977	29	9	38	P29+9
<i>Pinus taeda</i>	1966	31	18	49	P31+18

A conversão da MN para plantio florestal ocorreu em 1966, três anos após a ocorrência de um incêndio de grandes proporções (Antonelli, 2013). A vegetação secundária, composta por capoeira, arbustos e espécies arbóreas de pequeno porte, foi retirada, enleirada e queimada para o início da atividade florestal. O tratamento P29 foi o plantio mais jovem avaliado depois da conversão da MN.

A seleção dos tratamentos foi realizada em maio de 2014, tendo como critério o histórico de uso, tipo de solo e semelhança textural do solo. A amostragem de solo foi realizada em subcamadas até 100 cm de profundidade, com o auxílio do trado holandês. As amostras foram secas em estufa a 60 °C, destorroadas e passadas em peneira de malha 2 mm. A análise granulométrica foi realizada pelo método do densímetro de Bouyoucos (Gee e Bauder, 2002). A massa de 20 g de solo foi agitada em 200 mL de solução dispersante composta por NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> e (NaPO<sub>3</sub>)<sub>6</sub> 0,02 mol L<sup>-1</sup>. Após 16 horas em agitação horizontal, a solução foi transferida para provetas de 1000 mL, e seu volume foi preenchido com água. O conteúdo da proveta foi agitado manualmente e após 40 segundos, a primeira leitura foi realizada com a utilização do densímetro, correspondendo à densidade do silte mais argila. A segunda leitura foi realizada 2 horas após sedimentação das amostras, obtendo-se a densidade de argila. O teor de silte foi estimado pela diferença entre a primeira e a segunda leitura e o teor de areia pela diferença entre o teor de silte e argila. A granulometria para cada tratamento é apresentada na Tabela 2.

**Tabela 2.** Granulometria do solo em Floresta Estacional Semidecidual (MN), plantações de *Pinus taeda* com 29 (P29) e 38 anos (P38) em primeira rotação e plantações de *Pinus taeda* com 1 (P34+1), 9 (P29+9) e 18 anos (P31+18) em segunda rotação. Telêmaco Borba – PR.

Tratamento	Camada (cm)	g kg <sup>-1</sup>			Classe textural
		Areia	Silte	Argila	
MN	0-20	275,0	112,5	612,5	argiloso
	20-40	212,5	175,0	612,5	argiloso
	40-60	200,0	162,5	637,5	argiloso
	60-80	187,5	162,5	650,0	argiloso
	80-100	187,5	137,5	675,0	argiloso
P29	0-20	75,0	262,5	662,5	argiloso
	20-40	75,0	237,5	687,5	argiloso
	40-60	25,0	237,5	737,5	argiloso
	60-80	75,0	212,5	712,5	argiloso
	80-100	62,5	275,0	662,5	argiloso
P38	0-20	337,5	100,0	562,5	argiloso
	20-40	287,5	125,0	587,5	argiloso
	40-60	237,5	150,0	612,5	argiloso
	60-80	237,5	125,0	637,5	argiloso
	80-100	237,5	137,5	625,0	argiloso
P34+1	0-20	175,0	237,5	587,5	argiloso
	20-40	137,5	175,0	687,5	argiloso
	40-60	100,0	187,5	712,5	argiloso
	60-80	125,0	187,5	687,5	argiloso
	80-100	125,0	187,5	687,5	argiloso
P29+9	0-20	250,0	312,5	437,5	franco-argiloso
	20-40	250,0	262,5	487,5	franco-argiloso
	40-60	175,0	187,5	637,5	argiloso
	60-80	125,0	162,5	712,5	argiloso
	80-100	125,0	162,5	712,5	argiloso
P31+18	0-20	262,5	175,0	562,5	argiloso
	20-40	250,0	187,5	562,5	argiloso
	40-60	250,0	162,5	587,5	argiloso
	60-80	225,0	175,0	600,0	argiloso
	80-100	225,0	162,5	612,5	argiloso

Após a seleção de cada área a ser avaliada, procedeu-se a instalação de três parcelas de 20 m x 30 m (600 m<sup>2</sup>) em cada tratamento. O delineamento foi inteiramente casualizado, como preconiza Alvarez e Alvarez (2013) para este tipo de estudo.

O preparo do solo dos plantios de pinus foi realizado pelo sistema de cultivo mínimo, com subsolagem a 0,45 m de profundidade na linha de plantio. O espaçamento utilizado foi de 3 m x 1,5 m em P34+1 e de 3 m x 2 m em P29, P38, P29+9 e P31+18. A produção das mudas foi por sementes e o plantio foi realizado manualmente, sem aplicação de calcário ou fertilizante. Os tratos culturais realizados foram matocompetição, através da aplicação de herbicida, e a realização de desbaste, sendo um no plantio P29 e dois no plantio P38.

### 1.4.3. CARBONO DO COMPARTIMENTO VEGETAL

#### 1.4.3.1. CARBONO DA PARTE AÉREA E RAÍZES

O estoque de carbono da biomassa aérea foi estimado pelo inventário de árvores, realizado em agosto de 2015, nos tratamentos P34+1, P29+9 e P31+18. Em cada parcela, a circunferência a altura do peito (CAP) foi medida em todas as árvores com o auxílio de fita métrica. A altura foi medida com clinômetro Haglof em 57 % das árvores de cada parcela dos plantios P29+9 e P31+18, e em todas as árvores do plantio P34+1. As Equações 1 e 2 foram utilizadas para estimar a altura das árvores dos plantios P29+9 e P31+18, respectivamente.

$$H = 2,417 + 4,154 \ln(\text{DAP}) \quad (\text{Equação 1})$$

$$\ln(H) = 2,273 + 0,260 \ln(\text{DAP}) \quad (\text{Equação 2})$$

Sendo:

H – altura estimada (m);

DAP – diâmetro a altura do peito (cm);

O volume das árvores dos tratamentos P29+9 e P31+18 foram calculados pela equação volumétrica (Equação 3) desenvolvida pela Empresa Florestal Klabin.

$$\ln(V) = -10,479 + 1,921 \ln(\text{DAP}) + 1,160 \ln(H) \quad (\text{Equação 3})$$

Sendo:

V – volume estimado (m<sup>3</sup>);

DAP – diâmetro a altura do peito (cm);

H – altura (m);

O volume das árvores (V) do tratamento P34+1 foi estimado pelo modelo de Schumacher e Hall (Figueiredo Filho et al., 2014) (Equação 4), que apresentou melhor ajuste para as características de altura, diâmetro a altura do peito e idade do tratamento.

$$V \text{ (m}^3\text{)} = 0,000034 \times \text{DAP}^{1,8237} \times \text{H}^{1,1652} \quad \text{(Equação 4)}$$

Sendo:

DAP – diâmetro a altura do peito (cm);

H – altura (m);

O fator de expansão da biomassa (FEB) da parte aérea para os tratamentos avaliados foi obtido pela Equação 5, conforme Sanquetta et al. (2011).

$$\text{FEB} = 3,5663 - 0,9055 \ln(\text{DAP}) + 0,0296 \ln(\text{DAP}) - 1,2032 \ln(\text{H}) + 0,3844 \ln(\text{DAP} \times \text{H} \times \text{idade}) \quad \text{(Equação 5)}$$

Sendo:

DAP – diâmetro a altura do peito (cm);

H – altura (m);

Idade – idade de cada tratamento (anos);

O fator de expansão da biomassa das raízes (FR) foi estimado pela Equação 6, conforme Sanquetta et al. (2011).

$$\text{FR} = 0,4105 + 0,0901 \ln(\text{DAP}) - 0,1945 \ln(\text{H}) \quad \text{(Equação 6)}$$

Sendo:

DAP – diâmetro a altura do peito (cm);

H – altura (m);

A biomassa da parte aérea e das raízes foi obtida pela Equação 7, conforme Higa et al. (2014):

$$\text{Biomassa (Mg ha}^{-1}\text{)} = \frac{\text{V} \times \text{D} \times \text{FE} \times \text{N}}{1000} \quad \text{(Equação 7)}$$

Sendo:

V – volume estimado (m<sup>3</sup>);

D – densidade da madeira de *Pinus taeda* (densidade média de 370 kg m<sup>-3</sup>, conforme Higa (2005));

FE – fator de expansão da biomassa (FEB ou FR);

N – número de árvores por hectare;

O estoque de carbono da biomassa da parte aérea e das raízes foi calculado pela Equação 8.

$$\text{Estoque de C (Mg ha}^{-1}\text{)} = B \times C \quad (\text{Equação 8})$$

Sendo:

B – biomassa da parte aérea ou das raízes (Mg ha<sup>-1</sup>);

C – concentração de carbono (considerou-se uma concentração média de 475 g kg<sup>-1</sup>, conforme Higa et al. (2014));

A biomassa e o estoque de carbono da parte aérea da MN foi obtido de Fiorucci et al. (2015), e o estoque de carbono das raízes foi calculado com base em Mokany et al. (2006), onde 24 % da biomassa da parte aérea correspondeu a biomassa de raízes em florestas nativas subtropicais. O estoque de carbono da biomassa arbórea para os tratamentos avaliados foi calculado pela soma dos estoques de carbono da parte aérea e raízes. A taxa anual de sequestro de carbono da biomassa arbórea foi obtida pela divisão entre estoque de carbono da biomassa arbórea e a idade de cada povoamento. O estoque de carbono do compartimento vegetal foi calculado pela soma dos estoques de carbono da parte aérea, raízes e serapilheira.

#### 1.4.3.2. CARBONO DA SERAPILHEIRA

Nos meses de abril e outubro de 2015, a serapilheira acumulada sobre o solo foi coletada nos tratamentos MN, P29+9 e P31+18. No tratamento P34+1, não havia serapilheira a ser coletada devido à idade do plantio, e nos plantios P29 e P38, a coleta não foi realizada devido à distância para monitoramento e colheita precipitada do talhão, respectivamente. A coleta de serapilheira foi realizada com um gabarito de madeira com área de 0,122 m<sup>2</sup> (0,35 m x 0,35 m), em cinco pontos aleatórios de cada parcela e em três horizontes, conforme seu grau de decomposição (Valverde, 1951; Reissman, 1983):

- Litter novo (Ln): resíduo vegetal depositado na superfície, não ou levemente decomposto. É caracterizado por acículas soltas com tamanho original e que apresentam boa rigidez.
- Litter fermentado (Lf): As acículas perderam sua rigidez inicial e sua estrutura ainda revela a sua origem.
- Litter humificado (Lh): não é possível detectar a origem da estrutura vegetal. A serapilheira é composta por fragmentos de 2-5 cm de comprimento e há presença de raízes finas.

As amostras coletadas foram secas em estufa a 60 °C, até obtenção de massa constante. A massa seca das amostras foi determinada e estas foram moídas em moinho de facas. A concentração de carbono destas amostras foi determinada em analisador elementar Vario EL III. O estoque de carbono da serapilheira depositada sobre o solo foi obtido pela multiplicação entre a massa seca e concentração de carbono. Os dados médios das duas amostragens de serapilheira foram apresentados neste estudo.

#### 1.4.4. CARBONO ORGÂNICO DO SOLO

Uma trincheira de 1 m<sup>3</sup> foi escavada em cada parcela, constituindo três trincheiras por tratamento. A amostragem de solo foi realizada em duas paredes de cada trincheira, nas camadas 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-45, 45-60, 60-80 e 80-100 cm, constituindo uma repetição. As amostras de solo foram secas em estufa a 40 °C, destorroadas e passadas em peneira de malha 2 mm, constituindo terra fina seca em estufa (TFSE). Uma sub-amostra de TFSE foi moída em moinho almofariz automatizado até passagem em peneira de 250 µm de malha para a determinação do teor de carbono. A concentração de carbono total (CT) foi determinada por combustão seca em analisador elementar Vario EL III. Considerando que todo o carbono do solo estudado é origem orgânica, designa-se a partir de então carbono orgânico total (COT).

Amostras indeformadas de solo foram coletadas para cada camada avaliada. Cilindros volumétricos de 98 cm<sup>3</sup> foram utilizados para as camadas 0-5 e 5-10 cm, e de 127 cm<sup>3</sup> para as demais. As amostras indeformadas foram submetidas ao toalete de limpeza do excesso de solo e a densidade aparente foi determinada pela relação entre a massa da amostra após estufa a 105 °C e o volume de solo contido no cilindro.

O estoque de carbono até 100 cm de profundidade foi obtido pela correção por massa equivalente, que considera a mesma massa de solo em todos os tratamentos, e tem como referência a massa de solo do tratamento MN (Sisti et al., 2004).

#### 1.4.5. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados foram submetidos ao teste de homogeneidade de variância (Bartlett), seguido de análise de variância (ANOVA), e quando significativos, as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de Tukey ( $p < 0,10$ ). Análises de regressão foram realizadas para estimar o comportamento dos estoques de COT nas profundidades 0-30 e 0-100 cm em relação ao tempo de uso do solo sob plantios de pinus.

## 1.5. RESULTADOS

### 1.5.1. CARBONO DO COMPARTIMENTO VEGETAL

Entre os compartimentos avaliados, o maior reservatório de carbono vegetal foi encontrado na parte aérea, independente do tratamento (Tabela 3). Neste compartimento, o pinus com maior idade (P31+18) chegou a 116 Mg C ha<sup>-1</sup>, possuindo 10,6 Mg ha<sup>-1</sup> de C a mais do que o estimado para a MN (105,4 Mg C ha<sup>-1</sup>). Entre os plantios de pinus, o estoque de carbono da parte aérea aumentou significativamente com a idade dos plantios, indo de 0,31 Mg ha<sup>-1</sup> no plantio mais jovem (P34+1) para 67,11 Mg ha<sup>-1</sup> em P29+9 e 116 Mg ha<sup>-1</sup> em P31+18.

O compartimento raízes foi o segundo que mais contribuiu para o armazenamento de carbono, sendo significativamente maior na MN (25,32 Mg C ha<sup>-1</sup>) do que nos plantios de pinus (Tabela 3). Nestes, ocorreu aumento entre o plantio jovem (P34+1) (0,04 Mg C ha<sup>-1</sup>) e intermediário (P29+9) (8,47 Mg C ha<sup>-1</sup>), e não houve diferença entre os plantios de 9 e 18 anos, que apresentaram estoque médio de 8,78 Mg C ha<sup>-1</sup>. Considerando a soma dos compartimentos parte aérea e raízes (biomassa arbórea), a menor quantidade de carbono foi estimada para o pinus mais jovem (P34+1), onde o estoque de C foi inferior a 0,5 Mg ha<sup>-1</sup> (Tabela 3). Porém, na maior idade de pinus avaliada (P31+18), obteve-se estoque de C de 125,1 Mg ha<sup>-1</sup>, similar ao verificado na MN (130,72 Mg ha<sup>-1</sup>).

O estoque de carbono na serapilheira aumentou gradualmente para os horizontes Ln, Lf e Lh, independente do tratamento (Tabela 3). O menor valor de carbono no horizonte Ln foi obtido na MN (0,19 Mg ha<sup>-1</sup>), enquanto que nos plantios de pinus, os estoques foram de aproximadamente 0,4 Mg C ha<sup>-1</sup>. No horizonte Lf, o acúmulo de C foi maior em P31+18, sendo igual na MN e em P29+9. No horizonte Lh, o estoque de carbono na serapilheira chegou a 2,34 Mg C ha<sup>-1</sup> na MN, e 5,74 Mg C ha<sup>-1</sup> em P31+18. No total de serapilheira acumulada, a MN apresentou o menor estoque de carbono (3,60 Mg ha<sup>-1</sup>), seguida de P29+9 (5,25 Mg ha<sup>-1</sup>) e P31+18 (8,49 Mg ha<sup>-1</sup>).

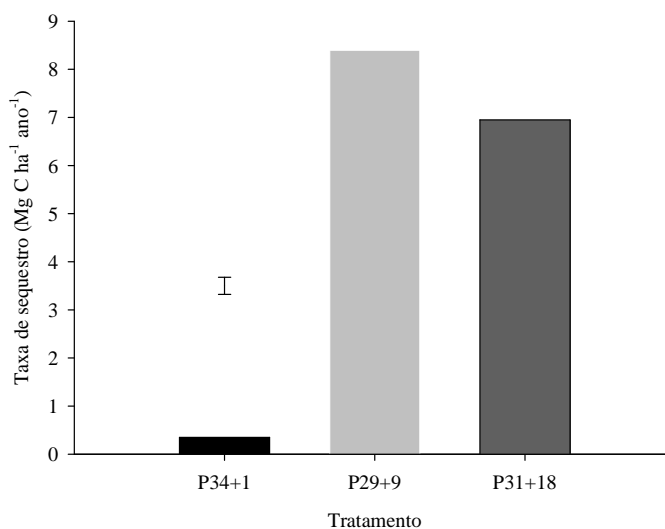
**Tabela 3.** Estoque de carbono dos compartimentos parte aérea, raízes e serapilheira em Floresta Estacional Semidecidual (MN) e plantações de *Pinus taeda* com 1 (P34+1), 9 (P29+9) e 18 anos (P31+18) em segunda rotação. Telêmaco Borba – PR.

Tratamento	Parte aérea	Raízes	Biomassa arbórea <sup>(1)</sup>	Serapilheira			
				Ln	Lf	Lh	Total
Mg C ha <sup>-1</sup>							
MN	105,40 <sup>(2)</sup> a	25,32 a <sup>(3)</sup>	130,72 a	0,19 b	1,06 b	2,34 c	3,60 c
P34+1	0,31 c	0,04 c	0,35 c	-	-	-	-
P29+9	67,11 b	8,47 b	75,58 b	0,41 a	1,35 b	3,49 b	5,25 b
P31+18	116,00 a	9,10 b	125,10 a	0,39 a	2,76 a	5,74 a	8,49 a

<sup>(1)</sup>Biomassa arbórea: soma do estoque de carbono dos compartimentos parte aérea e raízes.

<sup>(2)</sup>Os dados do estoque de carbono da parte aérea da MN foram obtidos a partir de Fiorucci et al. (2015). <sup>(3)</sup>Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,10$ ).

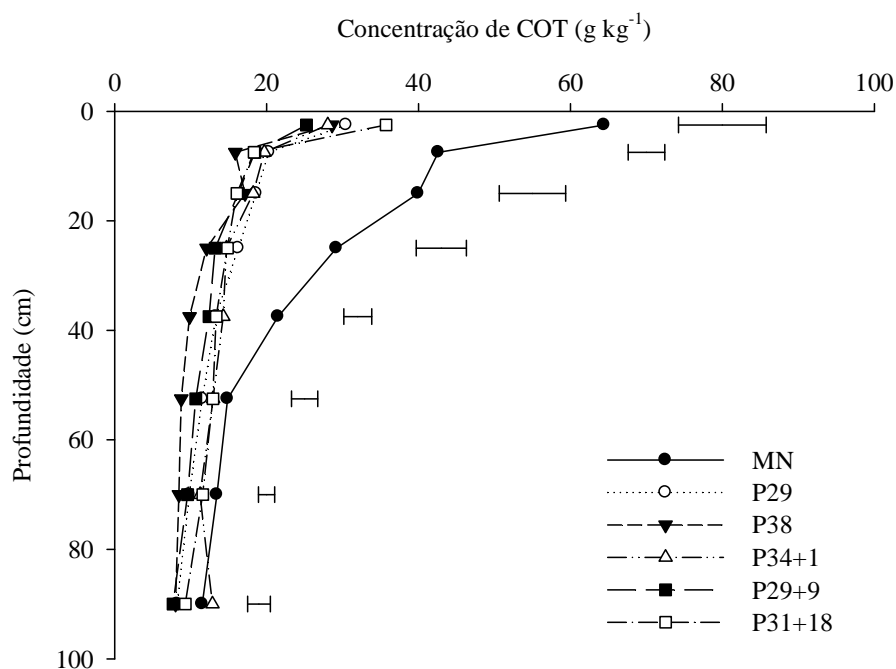
A taxa anual de sequestro de carbono na biomassa arbórea foi menor no plantio P34+1 ( $0,35 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ) e aumentou em P29+9, chegando a  $8,4 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  (Figura 1). No entanto, mesmo com o significativo aumento do estoque de carbono da biomassa arbórea entre os plantios com 9 e 18 anos, a taxa de sequestro diminuiu no plantio mais velho, indo para  $6,95 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ .



**Figura 1.** Taxa anual de sequestro de carbono da biomassa arbórea de plantações de *Pinus taeda* com 1 (P34+1), 9 (P29+9) e 18 anos (P31+18) em segunda rotação. Telêmaco Borba – PR. Barra vertical indica a diferença mínima significativa entre os tratamentos ( $p < 0,10$ ).

### 1.5.2. CARBONO ORGÂNICO DO SOLO

As concentrações de COT nos sistemas avaliados diminuíram em profundidade para todos os tratamentos (Figura 2). A maior redução foi verificada na MN, onde o teor variou de 64,4 g C kg<sup>-1</sup> na superfície para 11,5 g C kg<sup>-1</sup> em subsuperfície (camada 80-100 cm). A conversão da MN para pinus diminuiu significativamente a concentração de COT em praticamente todas as camadas, com as maiores alterações ocorrendo até a camada 30-45 cm. Em contrapartida, o tempo de uso do solo nos plantios de pinus não apresentou efeito significativo na variação das concentrações de COT, porém, foi possível perceber um aumento significativo da concentração de carbono da camada 30-45 até 80-100 cm no plantio P34+1, quando comparado ao plantio mais velho do primeiro ciclo (P38).



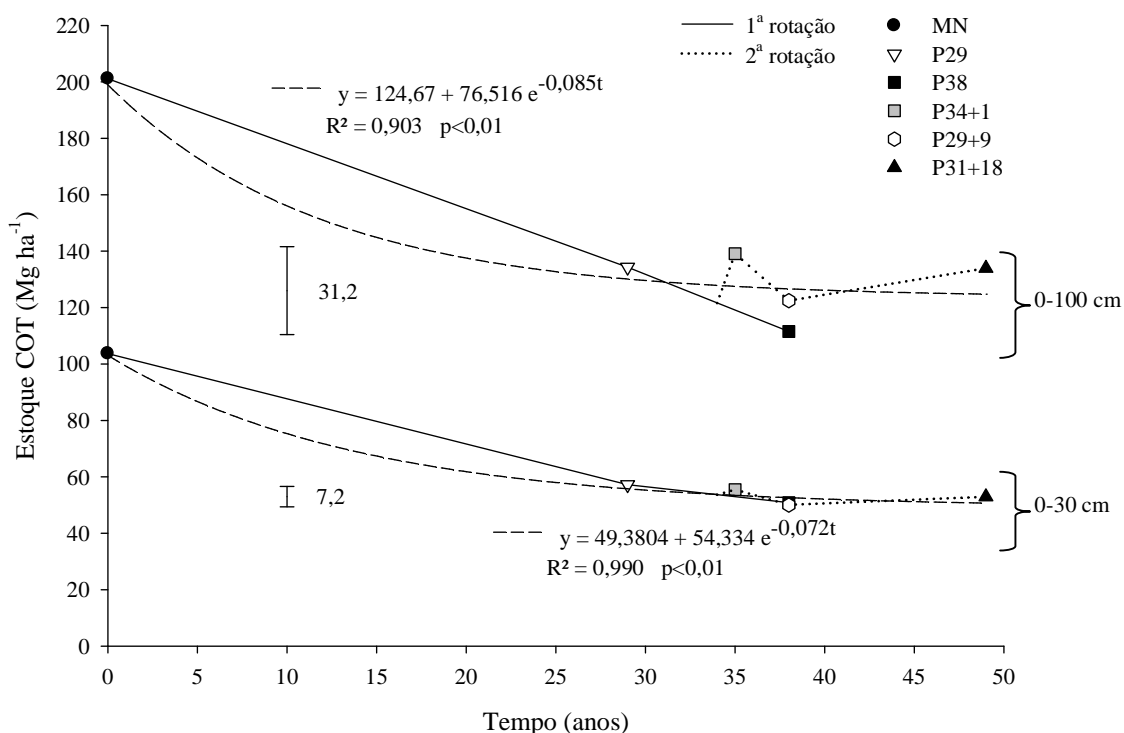
**Figura 2.** Concentração de carbono orgânico total (COT) do solo em Floresta Estacional Semidecidual (MN), plantações de *Pinus taeda* com 29 (P29) e 38 anos (P38) em primeira rotação e plantações de *Pinus taeda* com 1 (P34+1), 9 (P29+9) e 18 anos (P31+18) em segunda rotação. Telêmaco Borba – PR. Barras horizontais indicam a diferença mínima significativa entre os tratamentos ( $p < 0,10$ ).

A MN apresentou estoque de carbono de 103,7 Mg ha<sup>-1</sup> até 30 cm (Figura 3), e sua conversão para pinus (P29) apresentou diminuição significativa de 46,47 Mg ha<sup>-1</sup>. No primeiro ciclo da cultura (P38), foram perdidos 1,39 Mg C ha<sup>-1</sup> a cada ano, enquanto que na segunda rotação (P31+18), embora não significativo, ocorreu um aumento de 2,1 Mg C ha<sup>-1</sup>,

correspondendo a uma taxa de aumento anual de  $116,7 \text{ kg ha}^{-1}$ . Entre os plantios de pinus, mesmo em primeira rotação (P29 e P38), não foi observado diferenças significativas nos estoques de carbono do solo.

O maior estoque de carbono até 100 cm ocorreu na MN, com  $201,1 \text{ Mg ha}^{-1}$  (Figura 3). Da mesma forma que na profundidade 0-30 cm, a implantação de pinus (P29) contribuiu com uma significativa diminuição do estoque de carbono nesta profundidade ( $66,8 \text{ Mg ha}^{-1}$ ). Tanto o aumento da idade dos plantios de pinus em primeiro ciclo, quanto a implantação da segunda rotação e o aumento da idade nesta, não apresentaram efeito significativo no estoque de COT do solo até 100 cm.

A análise de regressão entre tempo de uso do solo sob pinus e estoque de COT na profundidade 0-30 cm representou 99 % do comportamento dos dados (Figura 3). Conforme a equação, a perda acumulada de carbono foi de  $54,3 \text{ Mg C ha}^{-1}$ , e o estoque de COT do solo tende a estabilizar em  $49,4 \text{ Mg ha}^{-1}$ .



**Figura 3.** Estoque de COT do solo nas camadas 0-30 e 0-100 cm em relação ao tempo de uso sob Floresta Estacional Semidecidual (MN), plantações de *Pinus taeda* com 29 (P29) e 38 anos (P38) em primeira rotação e plantações de *Pinus taeda* com 1 (P34+1), 9 (P29+9) e 18 anos (P31+18) em segunda rotação. Telêmaco Borba – PR. Barras verticais indicam a diferença mínima significativa entre os tratamentos em  $\text{Mg C ha}^{-1}$  ( $p < 0,10$ ).

Na profundidade 0-100 cm, a análise de regressão apresentou coeficiente de determinação de 0,903, indicando uma perda de carbono de 176,5 Mg ha<sup>-1</sup>, e estabilização do estoque em 124,67 Mg C ha<sup>-1</sup>. É possível perceber que para as duas profundidades avaliadas, o plantio P31+18, que possui o maior tempo de uso do solo com pinus, situa-se acima da curva de regressão.

### 1.5.3. CARBONO NOS COMPARTIMENTOS DO SISTEMA

O aumento da idade dos plantios de pinus promoveu mudanças na alocação de carbono entre os compartimentos do sistema florestal (Tabela 4). Do total de carbono armazenado no pinus jovem (P34+1), apenas 0,2 % (0,35 Mg C ha<sup>-1</sup>) foi alocado no compartimento vegetal e 99,8 % no solo (138,12 Mg C ha<sup>-1</sup>). Esta proporção se altera consideravelmente com o aumento da idade do plantio, indo de 39,8 % (80,83 Mg C ha<sup>-1</sup>) na biomassa e 60,2 % (122,44 Mg C ha<sup>-1</sup>) no compartimento solo do P29+9, para 50 % (133,58 Mg C ha<sup>-1</sup>) na biomassa e 50 % (133,94 Mg C ha<sup>-1</sup>) no solo do pinus de maior idade (P31+18).

O estoque de carbono total no sistema foi significativamente diferente entre os tratamentos (Tabela 4). A MN apresentou o maior estoque de C total (335,5 Mg ha<sup>-1</sup>), e entre os plantios de pinus, o menor estoque ocorreu em P34+1 (138,5 Mg ha<sup>-1</sup>), seguido de P29+9 (203,3 Mg ha<sup>-1</sup>) e P31+18 (267,5 Mg ha<sup>-1</sup>).

**Tabela 4.** Distribuição do carbono no compartimento vegetal (parte aérea, raízes e serapilheira) e compartimento solo (0-100 cm) em Floresta Estacional Semidecidual (MN) e plantações de *Pinus taeda* com 1 (P34+1), 9 (P29+9) e 18 anos (P31+18) em segunda rotação. Telêmaco Borba – PR.

Tratamento	Vegetal	Solo	Total
	Mg ha <sup>-1</sup>		
MN	134,41 Ba	201,12 Aa	335,53 a
P34+1	0,350 Bc	138,12 Ab	138,55 d
P29+9	80,83 Bb	122,44 Ab	203,27 c
P31+18	133,58 Aa	133,94 Ab	267,53 b

Letras maiúsculas na coluna indicam diferença significativa entre os compartimentos, e letras minúsculas na linha indicam diferença significativa entre os tratamentos, ambos pelo teste de Tukey (p<0,10).

## 1.6. DISCUSSÃO

### 1.6.1. CARBONO DO COMPARTIMENTO VEGETAL

O aumento do estoque de carbono da parte aérea com a idade da floresta, assim como a sua maior contribuição em relação às raízes, também foi encontrado em Mund et al. (2002), Pregitzer e Euskirchen (2004), Peichl e Arain (2006), Kashian et al. (2013) e Zhao et al. (2014) (Tabela 3). Neste estudo, o estoque de C da parte aérea do plantio mais velho (P31+18) superou a MN em  $10,5 \text{ Mg C ha}^{-1}$ , no entanto, as raízes da MN contribuíram para o sequestro de  $16,2 \text{ Mg C ha}^{-1}$  a mais que P31+18. O menor estoque de carbono da parte aérea da MN pode estar relacionado ao seu estágio sucessional, que é intermediário, apresentando menos carbono armazenado do que uma formação florestal em estágio clímax (Veloso-Gomes, 2014). O maior estoque de C nas raízes deste ecossistema se deve a elevada quantidade de carbono que é destinada a construção e manutenção das raízes de sistemas florestais naturais, quando comparados com plantios florestais (Lorenz e Lal, 2010). Os dados da MN são superiores aos encontrados por Amaro et al. (2013) em Floresta Estacional Semidecidual de Viçosa – MG, de  $86,93 \text{ Mg C ha}^{-1}$  para a parte aérea e de  $16,41 \text{ Mg C ha}^{-1}$  para as raízes.

Nos plantios, o pinus mais jovem (P34+1) apresentou taxa anual de sequestro de carbono de  $0,35 \text{ Mg ha}^{-1}$  (Figura 1), valor inferior ao encontrado na biomassa aérea de sistemas de culturas agrícolas constituídos por aveia/milho ( $4,11 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ), ervilhaca/milho ( $6 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ) e aveia+ervilhaca/milho+caupi ( $7,5 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ) (Lovato et al., 2004). Todavia, o baixo potencial de sequestro de carbono constatado nas árvores deste plantio é temporário, e o aumento da idade aliado ao maior tempo de rotação deste sistema contribui para maiores taxa e tempo de sequestro de C em relação às culturas agrícolas, que possuem ciclo anual.

A comprovação desta suposição pode ser observada pelo aumento do estoque de C das árvores do P29+9 (Tabela 3), que apresentou taxa anual de sequestro de  $8,4 \text{ Mg C ha}^{-1}$  (Figura 1). Comparando este valor com os obtidos por Balbinot et al. (2003) em plantio de *Pinus taeda* com 5 anos em Cambará do Sul – RS ( $8,3 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ), e por Sette Junior et al. (2006) em plantio da mesma espécie e com 12 anos em Rio Negrinho – SC ( $6,8 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ), verifica-se diferença entre os valores, indicando que o crescimento e a taxa de sequestro de C em plantios de pinus variam em função das condições edafoclimáticas em que cada estudo é desenvolvido (Mund et al., 2002; Lal, 2005; Keith et al., 2009; Samuelson et al., 2014).

Na Região Central dos EUA, Burger e Rodrigue (2003) obtiveram valor de estoque de carbono de  $190 \text{ Mg ha}^{-1}$  nas árvores de um plantio de *Pinus taeda* com 33 anos, correspondendo a uma taxa anual de sequestro de carbono de  $5,8 \text{ Mg ha}^{-1}$ . O valor de estoque encontrado pelos autores é superior ao encontrado no P31+18 ( $116 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ), porém, o plantio brasileiro apresentou maior taxa de sequestro de carbono ( $6,95 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ), mesmo apresentando menor idade. Neste caso, considerando que o plantio P31+18 é mais jovem e que a taxa de sequestro de carbono tende a estabilizar com o amadurecimento da floresta (Mund et al., 2002), é possível que quando este plantio chegar aos 33 anos, a taxa de sequestro de carbono seja semelhante ou até mesmo menor que o plantio americano. Nas condições subtropicais brasileiras, Veloso-Gomes (2014) obteve estoque de  $173 \text{ Mg C ha}^{-1}$  na biomassa arbórea de um plantio de *Pinus taeda* com 17 anos localizado em Rio Negrinho – SC,  $57 \text{ Mg C ha}^{-1}$  a mais que P31+18. O estudo do autor foi desenvolvido em condição de temperatura mais amena, o que pode ter favorecido o crescimento das árvores (Ferreira et al., 2001) e o maior estoque de carbono na biomassa arbórea. No mesmo estudo, Veloso-Gomes (2014) também avaliou o estoque de carbono da biomassa de um povoamento com 12 anos e obteve valor maior ( $167 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ) que o P31+18, demonstrando que as condições em que o estudo foi desenvolvido propiciou o maior sequestro de carbono. Os estoques de carbono da biomassa dos plantios com 12 e 17 anos são valores próximos, indicando estabilização do sequestro de carbono nestes sistemas.

A estabilização da taxa de sequestro de carbono com o amadurecimento das florestas é relatada por alguns estudos (Mund et al., 2002; Pregitzer e Euskirchen 2004; Ryan et al., 2004; Kashian et al., 2013), e também foi observada nos plantios P29+9 e P31+18, que mesmo com estoques diferentes e crescentes, apresentaram diminuição da taxa de sequestro com a idade (Figura 1). Nestes plantios, o efeito de estabilização pode ser observado no estoque de C do compartimento raízes (Tabela 3), corroborando com Pregitzer e Euskirchen (2004), Ryan et al. (2004) e Peichl e Arain (2006). Os autores relatam que após o fechamento do dossel, a taxa fotossintética é reduzida, e o crescimento das árvores torna-se mais lento, implicando na redução da taxa de absorção de água e nutrientes, e diminuição da quantidade de raízes de absorção. Desta forma, as raízes de sustentação permanecem em maior proporção, e como já estão formadas, o crescimento do sistema radicular estabiliza.

O efeito de estabilização do estoque de carbono com a idade do plantio florestal pode ocorrer no compartimento serapilheira (Peichl e Arain, 2006; Veloso-Gomes, 2014; Zhao et al., 2014). No entanto, tal comportamento não foi observado neste estudo, onde o estoque de

carbono apresentou aumento significativo do plantio com 9 anos ( $5,25 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ) para 18 anos ( $8,49 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ) (Tabela 3). Neste compartimento, o maior estoque de carbono no plantio mais velho (P31+18) é reflexo da maior queda de galhos aliada ao acúmulo de serapilheira ao longo do tempo. Em plantios mais velhos, o dossel é uniforme e a incidência de radiação solar no interior do povoamento é reduzida, fazendo com que a produção de acículas e galhos, assim como sua atividade cessem, ocorrendo a queda destes com o tempo (Schultz, 1997). A serapilheira de plantios de espécies do gênero *Pinus* sp. apresenta elevada concentração de lignina e elevada relação C:N (Kleinpaul et al., 2005; Veloso-Gomes, 2014), implicando em uma taxa de decomposição mais lenta e conseqüente acúmulo sobre o solo (Johnson et al., 1995; Lal, 2005; Lorenz e Lal, 2010; Wang et al., 2013; Xu et al., 2016). Este comportamento também foi observado em plantios de diversas espécies de pinus sob diferentes condições climáticas (Peichl e Arain, 2006; Wang et al., 2013; Zhao et al., 2014).

Em ecossistemas naturais, como na MN, a menor quantidade de serapilheira depositada sobre o solo reflete o menor estoque de carbono neste compartimento. Nestes sistemas, a taxa de decomposição é maior em razão da maior diversidade vegetal e microbiana, e da menor relação C:N do resíduo vegetal (Wang et al., 2013; Zhao et al., 2013; Erickson e Perakis, 2014). Elevadas taxas instantâneas de decomposição (K) da serapilheira em Floresta Estacional Semidecidual foram relatadas por Vital et al. (2004) em Botucatu – SP (1,71) e por Pimenta et al. (2011) em Londrina – PR (2,45).

#### 1.6.2. CARBONO ORGÂNICO DO SOLO

O estoque de COT até 100 cm chegou a  $201,1 \text{ Mg ha}^{-1}$  no solo da MN (Figura 3), valor próximo ao encontrado por Zinn et al. (2014), de  $223,6 \text{ Mg ha}^{-1}$  em Floresta Estacional Semidecidual do Sudeste brasileiro. O comportamento da concentração de carbono (Figura 2) também foi semelhante ao relatado pelos autores, que encontraram diminuição em profundidade e elevada variação, indo de  $62,3 \text{ g kg}^{-1}$  na camada 0-5 cm para  $18,9 \text{ g kg}^{-1}$  na camada 90-100 cm. A distribuição do carbono ao longo do perfil do solo pode ser variável, em função do tipo de vegetação. Em compilação de dados mundiais sobre o estoque de COT em perfis de solos sob diferentes tipos de vegetação, Jobbágy e Jackson (2000) alegam que a maior parte do sistema radicular dos sistemas florestais naturais é distribuída nas camadas superficiais, daí a maior concentração de carbono nestas. Os autores relatam que em florestas desenvolvidas sob clima tropical, 43 % do estoque de COT do solo situa-se até a profundidade de 20 cm.

O solo da MN, quando comparado aos plantios de pinus, apresentou maiores concentrações de carbono em profundidade. Algumas fontes que contribuem para o incremento de carbono em profundidade são relatadas por Rumpel e Kögel-Knabner (2011), sendo elas presença de raízes e seus exsudatos, bioturbação e carbono orgânico dissolvido (proveniente das camadas superiores). Considerando que o ecossistema da MN é dinâmico e estável, é possível que a interação destas quatro fontes possa ter contribuído para o incremento de carbono nas camadas subsuperficiais.

A conversão da MN para plantio de pinus (P29) diminuiu significativamente o estoque de COT do solo até 100 cm ( $134,3 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ), sendo que 70 % desta redução ( $46,7 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ) ocorreu até 30 cm de profundidade. Após a modificação do uso do solo, a perda de carbono nas camadas superficiais é considerada natural, devido a sua maior vulnerabilidade em sofrer perturbações (Peichl e Arain, 2006; Bárcena et al., 2014; Chiti et al., 2014; Zhao et al., 2014; Kucuker et al., 2015). Além disso, a conversão de florestas naturais altera algumas variáveis do solo, como temperatura e estrutura, que influenciam em maiores perdas de carbono (Lal, 2004; Lal, 2005; Bárcena et al., 2014; Zinn et al., 2014). Neste estudo, este processo foi provocado pela retirada, enleiramento e queima da vegetação secundária, operações que influenciaram o microclima do solo e estimularam a atividade microbiana, implicando em elevada perda de carbono. Para o plantio das mudas de pinus, a subsolagem foi realizada, constituindo outra operação que estimula a decomposição da matéria orgânica, devido à alteração da estrutura do solo e incorporação de resíduos orgânicos em profundidade (Johnson et al., 1995; Jandl et al., 2007).

O aumento da idade do pinus (P38), embora não significativo, apresentou tendência de diminuição da concentração de COT em todas as camadas, correspondendo a uma taxa de perda de  $2,5 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  no estoque até 100 cm de profundidade (Figura 2). A elevada taxa de perda de carbono neste período pode estar atrelada ao maior teor de areia neste plantio. Mesmo apresentando uma pequena diferença textural em relação ao P29, o maior teor de areia implica em menor proteção da matéria orgânica e menor interação organo-mineral (Johnson et al., 1995; Lal, 2005).

Alguns estudos relatam que a estabilização, ou até mesmo o aumento do estoque de COT pode ocorrer com o tempo de uso do solo e/ou com o ciclo de cultivo (Johnson et al., 1995; Veloso-Gomes, 2014; Bárcena et al., 2015). Neste estudo, o estoque de COT do solo, tanto em 30 cm, quanto até 100 cm, foi semelhante entre os plantios, indicando uma possível estabilização. Esta hipótese é confirmada pela análise de regressão, demonstrando que o

estoque de COT do solo até 100 cm começou a estabilizar em 25 anos após a conversão da MN. Alguns estudos relatam o aumento do estoque de carbono (até 100 cm de profundidade) com o tempo de uso do solo sob floresta e com a implantação de outro ciclo de cultivo. Zhao et al. (2014) encontraram aumento do estoque de COT do solo sob plantios de *Pinus tabulaeformis* com diferentes idades, indo de 109,1 Mg ha<sup>-1</sup> em povoamentos com menos de 30 anos, para 174 Mg ha<sup>-1</sup> em talhões entre 61 e 80 anos. Em relação ao ciclo de cultivo, Veloso-Gomes (2014) encontrou aumento de 96 Mg C ha<sup>-1</sup>, partindo de um povoamento com primeira rotação (177 Mg C ha<sup>-1</sup>) para segunda rotação (273 Mg C ha<sup>-1</sup>).

O tempo para a estabilização do estoque de carbono do solo, assim como para a biomassa, pode variar em função das condições edafoclimáticas e manejo florestal em que cada floresta é desenvolvida (Jobbágy e Jackson, 2000; Lal, 2005; Jandl et al., 2007). Em revisão bibliográfica realizada em florestas do Norte da Europa, Bárcena et al. (2015) encontraram que o tempo necessário para a estabilização do estoque de COT do solo é de 30 anos, tempo superior ao encontrado neste estudo. Por outro lado, Paul et al. (2002), ao avaliarem estudos de florestas de diferentes países e sob diferentes condições climáticas, relatam que 30 anos é suficiente para recuperar o estoque de carbono do solo. Nos plantios de pinus este efeito não foi observado, mesmo em 49 anos de uso do solo (P31+18).

A colheita da primeira rotação pode ter contribuído para a estabilização do estoque de carbono na segunda rotação (Figura 3). No plantio P34+1, é possível observar uma tendência de aumento do estoque de COT até 100 cm, e posterior diminuição com o aumento da idade (P29+9), indicando um possível efeito em longo prazo da colheita florestal. O sistema de colheita adotado foi o de árvores inteiras, onde as árvores recém cortadas são arrastadas até a margem da estrada e os resíduos de copa, galhos, acículas e árvores mortas são transformados em cavacos, para a produção de bioenergia para o abastecimento das caldeiras da área fabril da empresa (Klabin, 2015). Neste sistema, dependendo da intensidade de retirada dos resíduos remanescentes do corte e arraste das árvores do interior do talhão, estima-se que apenas 4 a 16 % destes permanecem sobre o solo (Hytönen e Moilanen, 2014), tendo como consequência elevadas taxas de exportação de nutrientes e de perda de matéria orgânica (Hytönen e Moilanen, 2014; Achat et al., 2015). Em compilação de dados mundiais sobre o efeito do manejo dos resíduos da colheita sobre a química do solo, Achat et al. (2015) relatam que este tipo de sistema é o segundo maior em perda de carbono, ocorrendo principalmente nas camadas superficiais.

A perda de carbono nas camadas superficiais após a realização da colheita pode ser observada no plantio P29+9. Em 30 cm, o estoque de COT neste tratamento foi similar ao plantio P38, que possui o mesmo tempo de uso sob floresta, porém em primeira rotação. Em 100 cm, o estoque do P29+9 foi 10,9 Mg C ha<sup>-1</sup> maior que o plantio P38, indicando maior armazenamento de carbono em profundidade. O mesmo comportamento foi observado no solo do P31+18, onde 75 % do seu estoque de COT estavam entre 30 e 100 cm de profundidade. Nestes tratamentos, o resíduo radicular da primeira rotação pode ter contribuído com o maior aporte de C nas camadas subsuperficiais (Rasse et al., 2005; Veloso-Gomes, 2014).

### 1.6.3. CARBONO NOS COMPARTIMENTOS DO SISTEMA

O estoque de carbono total nos tratamentos avaliados variou de 138,6 Mg ha<sup>-1</sup> em P34+1 para 335,5 Mg ha<sup>-1</sup> na MN (Tabela 4). O carbono armazenado na MN é superior ao relatado por Behling (2002) em vegetação de Floresta Estacional Semidecidual do Sudeste Brasileiro (260 Mg ha<sup>-1</sup>) e por Veloso-Gomes (2014) em vegetação de Floresta Ombrófila Mista de Rio Negrinho – SC (309 Mg C ha<sup>-1</sup>). Entre os plantios de pinus, o P34+1 apresentou reservatório de carbono maior que plantios de *Pinus ponderosa* entre 9 e 23 anos (120,55 Mg C ha<sup>-1</sup>) do Leste do EUA (Law et al., 2003), indicando que mesmo apresentando o menor estoque entre os tratamentos avaliados, este sistema foi eficiente em sequestrar carbono se comparado aos plantios americanos.

O estoque de carbono total no plantio P29+9 foi de 203,3 Mg ha<sup>-1</sup>, valor inferior a um plantio de *Pinus taeda* com 5 anos localizado em Cambará do Sul – RS (277 Mg ha<sup>-1</sup>) (Balbinot et al., 2003). O estoque de C total do plantio mais velho (P31+18) chegou a 267,5 Mg C ha<sup>-1</sup>, inferior ao encontrado por Veloso-Gomes (2014) em plantios de *Pinus taeda* com 12 (357 Mg C ha<sup>-1</sup>) e 17 anos (446 Mg C ha<sup>-1</sup>) no planalto norte catarinense. Em comparação com as condições edafoclimáticas encontradas em Telêmaco Borba, os estudos de Balbinot et al. (2003) e Veloso-Gomes (2014) foram desenvolvidos em condições de temperatura mais amena e de solo com maior fertilidade natural, que propiciaram o maior crescimento e sequestro de carbono na biomassa das árvores de *Pinus taeda*, e o acúmulo de carbono no solo, por isso o maior estoque de C total nestes sistemas, mesmo sendo plantios mais jovens do que os avaliados neste estudo. Todavia, embora os plantios P29+9 e P31+18 tenham apresentado valores inferiores aos plantios da mesma espécie desenvolvidos no Sul do Brasil, os estoques destes plantios superam plantios mais velhos desenvolvidos em outros países sob

diferentes condições edafoclimáticas, como *Pinus tabulaeformis* (178,1 Mg C ha<sup>-1</sup>) com aproximadamente 30 anos e desenvolvido em clima temperado do Nordeste da China (Zhao et al., 2014), e *Tectona grandis* (245 Mg C ha<sup>-1</sup>) com 20 anos em clima tropical da Região Central do Panamá (Kraenzel et al., 2003).

Os dados de estoque de carbono total dos tratamentos avaliados neste estudo demonstram que o compartimento solo contribuiu com o maior reservatório de carbono em relação ao compartimento vegetal, daí a sua importância para o armazenamento de carbono nos ecossistemas (Johnson et al., 1995, Lal, 2004 e Lorenz e Lal, 2010). Com relação ao estoque de C no compartimento vegetal, a proporção aumentou gradualmente com a idade do plantio, chegando a 50 % no plantio mais velho P31+18. Este comportamento é normalmente encontrado em razão do crescimento do compartimento vegetal com o tempo (Peichl e Arain, 2006; Veloso-Gomes, 2014; Zhao et al., 2014), e em alguns casos, o estoque de carbono do compartimento vegetal pode ultrapassar o compartimento solo, como em plantios de *Pinus ponderosa* muito antigos (entre 190 e 316) localizados no Leste do EUA, onde a proporção chegou a 75 % no vegetal e 25 % no solo (Law et al., 2003). Neste caso, o padrão de alocação de carbono pode ter ocorrido em função das características do solo em que estes plantios foram desenvolvidos, que possuem baixa fertilidade natural e textura arenosa, limitando o armazenamento de carbono no solo (Jobbágy e Jackson, 2000), assim como o crescimento das árvores.

## 1.7. CONCLUSÕES

1. A implantação de florestas de *Pinus taeda* L. provocou diminuição do estoque de carbono do solo em relação à mata nativa, enquanto que o tempo de uso do solo sob pinus promoveu estabilização do mesmo.

2. O aumento da idade dos plantios promoveu o aumento do estoque de carbono na biomassa e a modificação da alocação de C no compartimento vegetal do sistema.

## 1.8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Achat DL, Deleuze C, Landmann G, Pousse N, Ranger J, Augusto L. Quantifying consequences of removing harvesting residues on forest soils and tree growth – a meta-analysis. *Forest Ecology and Management*, 2015; 348:124-141.

Alvarez VH, Alvarez GAM. Reflexões sobre a utilização de estatística para pesquisas em ciência do solo. In: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – SBCS. Boletim informativo da SBCS. Viçosa, SBCS; 2013. p.28-35.

Amaro MA, Soares CPB, Souza AL, Leite HG, Silva GF. Estoque volumétrico, de biomassa e de carbono em uma Floresta Estacional Semidecidual em Viçosa, Minas Gerais. *Árvore*, 2013; 37:849-857.

Antonelli D. Quando o Paraná virou um inferno [internet]. Curitiba, PR: Gazeta do Povo; 2013 [acesso em 28 jan. 2016]. Disponível em: <http://www.gazetadopovo.com.br/vida-e-cidadania/quando-o-parana-viceu-um-inferno-cek86t5u466b3ztyk8vor6jim>.

Balbinot R, Schumacher MV, Watzlawick LF, Sanquetta CR. Inventário do carbono orgânico em um plantio de *Pinus taeda* aos 5 anos de idade no Rio Grande do Sul. *Revista Ciências Exatas e Naturais*, 2003; 1:60-68.

Bárcena TG, Kiaer LP, Vesterdal L, Stefánsdóttir HM, Gundersen P, Sigurdsson BD. Soil carbon stock change following afforestation in Northern Europe: a meta-analysis. *Global Change Biology*, 2014; 20:2393-2405.

Behling H. Carbon storage increases by major forest ecosystems in tropical South America since the last glacial maximum and the early Holocene. *Global and Planetary Change*, 2002; 33:107-116.

Burger JA, Rodrigue JA. Carbon inventory of reforested mined land in the Eastern United States: preliminary results. In: Annual Carbon Sequestration Conference; 5-8 may. 2003; Washington: Department of Energy of National Energy Technology Laboratory; 2003. p.1-10.

Cavaglione JH, Kihl LRB, Caramori PH, Oliveira D. Cartas climáticas do Paraná [internet]. Londrina, PR: Instituto Agrônômico do Paraná – IAPAR; 2000 [acesso em: 28 jul. 2015]. Disponível em: <http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=677>.

Chiti T, Grieco E, Perugini L, Rey A, Valentini R. Effect of the replacement of tropical forests with tree plantations on soil organic carbon levels in the Jomoro district, Ghana. *Plant Soil*, 2014; 375:47-59.

Embrapa – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 3ª ed. Brasília: Embrapa; 2013.

Erickson HE, Perakis S. Soil fluxes of methane, nitrous oxide, and nitric oxide from aggrading forests in coastal Oregon. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014; 76:268-277.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. International online conference on the economics of climate change mitigation options in the forest sector: summary report [internet]. Rome: FAO; 2015 [acesso em: 25 dez. 2015]. Disponível em: <http://www.fao.org/3/a-i5170e.pdf>.

Figueiredo Filho A, Machado AS, Miranda ROV, Retslaff FAS. Compêndio de equações de volume e de afilamento de espécies florestais plantadas e nativas para as regiões geográficas do Brasil. Curitiba: Os autores; 2014.

Fiorucci LH, Cardoso DJ, Figueiredo DJ. Quantificação de estoque de carbono e biomassa arbórea em Floresta Ombrófila Mista e em área de Floresta Estacional Semidecidual. In: Anais do XIV Evento de Iniciação Científica da Embrapa Florestas; 21-22 jul. 2015; Colombo: Embrapa Florestas; 2015. p.90-91.

Gee GW, Bauder JW. Particle size analysis. In: Dane JH, Topp GC, editors. *Methods of soil analysis*. Madison, Soil Science Society of America; 2002.p.278-284.

Higa RCV. Dinâmica de carbono de *Pinus taeda* L. voltadas a exigências climáticas e práticas silviculturais [relatório final de pós doutorado]. Gainesville: University of Florida; 2005. Não publicado.

Higa RCV, Cardoso DJ, Andrade GC, Zanatta JA, Rossi LMB, Pulrolnik K, Nicodemo MLF, Garrastazu MC, Vasconcelos SS, Salis SM. Protocolo de medição e estimativa de biomassa e

carbono florestal [internet]. Colombo, PR: Embrapa Florestas; 2014 [acesso em: 08 dez. 2015]. Disponível em: <http://www.cppse.embrapa.br/redepecus/sites/default/files/Protocolo%20de%20medi%C3%A7%C3%A3o%20estimativa%20de%20biomassa%20e%20carbono%20florestal.pdf>.

Hytönen J, Moilanen M. Effect of harvesting method on the amount of logging residues in the thinning of Scots pine stands. *Biomassa and Bioenergy*, 2014; 67:347-353.

IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores. Indústria Brasileira de Árvores 2015 [internet]. Brasília, DF: IBÁ; 2015 [acesso em: 04 dez. 2015]. Disponível em: [http://www.iba.org/images/shared/iba\\_2015.pdf](http://www.iba.org/images/shared/iba_2015.pdf).

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2014: synthesis report. In: Core Writing Team, Pachauri RK, Meyer L, editors. Fifth assesment report. Geneva, Switzerland; 2014. p. 1-151.

IPEF – Instituto de pesquisas e estudos florestais. Produtividade potencial do *Pinus* [internet]. Piracicaba, SP: IPEF; 2014 [acesso em: 10 fev. 2016]. Disponível em: <http://www.ipef.br/pppib/relatorioanual.asp>.

Jandl R, Lindner M, Vesterdal L, Bauwens B, Baritz R, Hagedorn F, Johnson DW, Minkinen K, Byrne KA. How strongly can Forest management influence soil carbon sequestration? *Geoderma*, 2007; 137:253-268.

Jobbágy EG, Jackson RB. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applicattions*, 2000; 10:423-436.

Johnson MG, Levine ER, Kern JS. Soil organic matter: distribution, genesis and management to reduce greenhouse gas emissions. *Water, Air and Soil Pollution*, 1995; 82:593-615.

Kashian DM, Romme WH, Yinker DB, Turner MG, Ryan MG. Postfire in forest carbon storage over a 300-year chronosequence of *Pinus contorta*-dominated forests. *Ecological Monographs*, 2013; 83:49-66.

Keith H, Mackey BG, Lindenmayer DB. Re-evaluation of forest biomass carbon stocks and lessons from the world's most carbon-dense forests. PNAS, 2009; 106:11635-11640.

Klabin. Resumo público: plano de manejo florestal 2015 Telêmaco Borba – PR [internet]. Telêmaco Borba, PR: Klabin; 2015 [acesso em: 03 fev. 2016]. Disponível em: [https://www.klabin.com.br/media/1475/resumo\\_pr\\_versao\\_site\\_2015.pdf](https://www.klabin.com.br/media/1475/resumo_pr_versao_site_2015.pdf).

Kleinpaul IS, Schumacher MV, Brun EJ, Brun FGK, Kleinpaul JJ. Suficiência amostral para coletas de serapilheira acumulada sobre o solo em *Pinus elliottii* Engelm, *Eucalyptus* sp. e Floresta Estacional Decidual. *Árvore*, 2005; 29:965-972.

Kraenzel M, Castillo A, Moore T, Potvin C. Carbon storage of harvest-age teak (*Tectona grandis*) plantations, Panama. *Forest Ecology and Management*, 2003; 173:213-225.

Kucuker MA, Guney M, Oral HV, Coptu NK, Onay TT. Impact of deforestation on soil carbon stock and its spatial distribution in the Western Black Sea Region of Turkey. *Journal of Environmental Management*, 2015; 147:227-235.

Lal R. Forest soils and carbon sequestration. *Forest Ecology and Management*, 2005; 220:242-258.

Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 2004; 123: 1-22.

Law BE, Sun OJ, Cambell J, Tuyl SV, Thornton PE. Changes in carbon storage and fluxes in a chronosequence of ponderosa pine. *Global Change Biology*, 2003; 9:510-524.

Lorenz K, Lal R. Carbon sequestration in forest ecosystems. 1<sup>a</sup> ed. Dordrecht: Springer; 2010.

Lovato T, Mielniczuk J, Bayer C, Vezzani F. Adição de carbono e nitrogênio e sua relação com os estoques no solo e com o rendimento do milho em sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 2004; 28:175-187.

Mokany K, Raison RJ, Prokushkin AS. Critical analysis of root: shoot ratios in terrestrial biomes. *Global Change Biology*, 2006; 12:84-96.

Mund M, Kummetz, Hein M, Bauer GA, Schulze ED. Growth and carbon stocks of a spruce forest chronosequence in Central Europe. *Forest Ecology and Management*, 2002; 171:275-296.

Paul KI, Polglase PJ, Nyakuengama, Khanna PK. Change in soil carbon following afforestation. *Forest Ecology and Management*, 2002; 168:241-257.

Peichl M, Arain MA. Above- and belowground ecosystem biomass and carbon pools in an age-sequence of temperate pine plantation forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006; 140:51-62.

Pimenta JA, Rossi LB, Torezan JMD, Cavalheiro AL, Bianchini E. Produção de serapilheira e ciclagem de nutrientes de um reflorestamento e de uma Floresta Estacional Semidecidual no Sul do Brasil. *Acta Botanica Brasilica*, 2011; 25:53-57.

Pregitzer KS, Euskirchen ES. Carbon cycling and storage in world forests: biome patterns related to forest age. *Global Change Biology*, 2004; 10:2052-2077.

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

Reissman CB. Morfologia dos horizontes de húmus em florestas de coníferas do sul do Brasil. *Revista do Setor de Ciências Agrárias*, 1983; 5:11-16.

Rumpel C, Kögel-Knabner I. Deep soil organic matter – a key but a poorly understood component of terrestrial C cycle. *Plant Soil*, 2011; 338:143-158.

Ryan MG, Binkley D, Fownes JH, Giardina CP, Senock RS. An experimental test to the causes of forest growth decline with stand age. *Ecological Monographs*, 2004; 74:393-414.

Samuelson LJ, Stokes TA, Butnor JR, Johnsen KH, Gonzalez-Benecke CA, Anderson P, Jackson J, Ferrari L, Martin TA, Cropper Jr. WP. Ecosystem carbon stocks in *Pinus palustris* forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 2014; 44:476-486.

Sanquetta CR, Corte APD, Silva F. Biomass expansion factor and root-to-shoot ratio for *Pinus* in Brazil. *Carbon Balance and Management*, 2011; 6:1-8.

Schultz RP. Loblolly pine: the ecology and culture of loblolly pine (*Pinus taeda* L.) [internet]. New Orleans, Louisiana: USDA Forest Service Southern Research Station; 1997 [acesso em 01 fev. 2016]. Disponível em: [http://www.srs.fs.usda.gov/pubs/misc/ah\\_713.pdf](http://www.srs.fs.usda.gov/pubs/misc/ah_713.pdf).

Sette Junior CR, Nakajima NY, Geromini MP. Captura de carbono orgânico em povoamentos de *Pinus taeda* L. na Região de Rio Negrinho, SC. *Floresta*, 2006; 36:33-44.

SFB – Serviço Florestal Brasileiro. As florestas plantadas [internet]. Brasília, DF: Sistema Nacional de Informações Florestais; 2016 [acesso em: 10 fev. 2016]. Disponível em: <http://www.florestal.gov.br/snif/recursos-florestais/as-florestas-plantadas>.

Sisti CPJ, Santos HP, Kohhann R, Alves BJR, Urquiaga S, Boddey RM. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. *Soil & Tillage Research*, 2004; 76:39-58.

Valverde FC. Estudo dos horizontes orgânicos do solo de matas, no arenito Bauru. *Bragantia*, 1951; 11:195-210.

Veloso-Gomes M. Estoque de carbono e emissão de gases de efeito estufa em Cambissolo sob plantações de *Pinus taeda* [dissertação]. Curitiba: Universidade Federal do Paraná; 2014.

Vital ART, Guerrin IA, Franken WK, Fonseca RCB. Produção de serapilheira e ciclagem de nutrientes de uma Floresta Estacional Semidecidual em zona ripária. *Árvore*, 2004; 28:793-800.

Wang H, Liu S, Wang J, Shi Z, Lu L, Zeng J, Ming A, Tang J, Yu H. Effects of tree species mixture on soil organic carbon stocks and greenhouse gas fluxes in subtropical plantation in China. *Forest Ecology and Management*, 2013; 300:4-13.

Xu X, Shi Z, Li D, Rey A, Ruan H, Craine JM, Liang J, Zhou J, Luo Y. Soil properties control decomposition of soil organic carbon: results from data-assimilation analysis. *Geoderma*, 2016; 262:235-242.

Zhao HF, Yao XJ, Wang Q, Chen YS, Xu XN. Nitrogen deposition and soil nitrogen dynamics in subtropical evergreen broad-leaved stands along an age-sequence. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2013; 13:237-250.

Zhao J, Kang F, Wang L, Yu X, Zhao W, Song X, Zhang Y, Chen F, Sun Y, He T, Han H. Patterns of biomass and carbon distribution across a chronosequence of Chinese pine (*Pinus tabulaeformis*) forests. *PlosOne*, 2014; 9:1-12.

Zinn YL, Guerra AR, Silva CA, Faria JA, Silva TAC. Soil organic carbon and morphology as affected by pine plantations establishment in Minas Gerais, Brasil. *Forest Ecology and Management*, 2014; 318:261-269.

## CAPÍTULO II. FLUXOS DE ÓXIDO NITROSO E METANO DO SOLO EM PLANTIOS DE PINUS COM DIFERENTES IDADES

### RESUMO

Florestas plantadas podem reduzir emissões de metano (CH<sub>4</sub>) e óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) do solo, por serem perenes e propiciarem microclima favorável a tal redução de emissão. No entanto, estudos ainda são insuficientes para esclarecer o efeito de plantios florestais sobre a emissão de gases de efeito estufa do solo. O objetivo deste estudo foi avaliar a emissão de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub> do solo numa cronosequência de plantios de pinus comparativamente à floresta nativa. O estudo foi realizado no município de Telêmaco Borba – PR, num Latossolo argiloso. Os tratamentos incluíram Floresta Estacional Semidecidual (MN) e plantações de *Pinus taeda* L. com 1 (P34+1), 9 (P29+9) e 18 (P31+18) anos em segunda rotação. A amostragem de ar foi realizada entre dez/2014 a nov/2015, em intervalos de 21 dias. A densidade, a porosidade, concentração de carbono e nitrogênio mineral do solo foram avaliados, assim como a concentração de carbono e de nitrogênio da serapilheira. O fluxo de N<sub>2</sub>O variou de -44,4 a 304,1 µg N-N<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>, com predomínio de valores entre -30 e +30 µg N-N<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>. As emissões cumulativas anuais de N<sub>2</sub>O nos plantios mais velhos (P29+9 e P31+18) foram semelhantes a MN (média de 0,67 kg N ha<sup>-1</sup>), enquanto que P34+1 emitiu 3,23 kg N ha<sup>-1</sup>, sendo a maior entre os sistemas avaliados. O fluxo de CH<sub>4</sub> foi predominantemente negativo, e o maior consumo anual acumulado ocorreu na MN (-5,87 kg C ha<sup>-1</sup>), seguida de P34+1 e P31+18 (média de -1,85 kg C ha<sup>-1</sup>) e menor em P29+9 (-0,39 kg C ha<sup>-1</sup>). O fluxo de N<sub>2</sub>O apresentou correlação positiva com a temperatura do solo e as concentrações de nitrato, já o fluxo de CH<sub>4</sub> apresentou correlação positiva com a porosidade preenchida por água, que foi diretamente influenciada pela macroporosidade do solo, e negativa com a concentração de amônio. A menor relação C:N da serapilheira da MN pode ter favorecido a ciclagem mais eficiente do N, reduzindo o fluxo de N<sub>2</sub>O e propiciando melhores condições a atividade das bactérias metanotróficas. Solos sob plantios de *Pinus taeda* com idade igual ou superior a nove anos foram eficientes em mitigar N<sub>2</sub>O, já para o CH<sub>4</sub>, o influxo foi menor do que no ecossistema nativo.

Palavras-chave: gases de efeito estufa, sistemas florestais, idade dos plantios.

## CHAPTER II. NITROUS OXIDE AND METHANE FLUXES IN PINE PLANTATIONS WITH DIFFERENT AGES

### ABSTRACT

Planted forests may reduce methane (CH<sub>4</sub>) and nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) emissions, for being perennial and create favorable microclimate to such reduction emissions. However, studies are insufficient to clarify the effects of planted forests over soil greenhouse gases emission. The aim of this study was evaluate the N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> emission from the soil of a pine plantation chronosequence, compared to native forest. The study was carried out in Telêmaco Borba – PR, Brazil, in a clayey Latosol. Treatments included Semideciduous Forest (MN) and *Pinus taeda* L. plantations with 1 (P34+1), 9 (P29+9) and 18 (P31+18) years in second rotation. Air was sampled between dec/2014 and nov/2015, at 21-day intervals. The soil bulk density, porosity, and carbon and nitrogen concentrations were evaluated; as well as carbon and nitrogen concentration in litter. The N<sub>2</sub>O flux varied from -44,4 to 304,1 µg N-N<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>, with most values between -30 and +30 µg N-N<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>. The N<sub>2</sub>O annual cumulative emissions in the older plantations (P29+9 e P31+18) were similar to MN (average of 0,67 kg N ha<sup>-1</sup>), while P34+1 issued 3,23 kg N ha<sup>-1</sup>, being the biggest between the evaluated systems. The CH<sub>4</sub> flux was predominantly negative, and the biggest consumption occurred in the MN (-5,87 kg C ha<sup>-1</sup>), followed by P34+1 e P31+18 (average of -1,85 kg C ha<sup>-1</sup>) and lower in P29+9 (-0,39 kg C ha<sup>-1</sup>). The N<sub>2</sub>O flux was positively correlated with soil temperature and the nitrate concentrations, while CH<sub>4</sub> flux presented positively correlation with the porosity filled with water, which was directly influenced by soil macroporosity, and negative correlation with the concentrations of ammonium. The lower C:N ratio of MN leaf litter may have favored the more efficient N cycling, reducing the N<sub>2</sub>O flux and propitiating better conditions to methanotrophic bacterias. Soils under *Pinus taeda* L. plantations aging nine years or more were efficient to mitigate N<sub>2</sub>O, but for CH<sub>4</sub>, the influx was lower than native ecosystem.

Keywords: greenhouse gas emissions, forest systems, age of plantations.

### 2.3. INTRODUÇÃO

O cultivo de florestas é considerado uma alternativa para a mitigação dos gases de efeito estufa (GEE), em razão do potencial sequestro de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) nos componentes arbóreos (Balbinot et al., 2003; Jandl et al., 2007), e pela alteração de algumas variáveis do solo que controlam as emissões de gases com elevado potencial de aquecimento global, como metano ( $\text{CH}_4$ ) e óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) (Hiltbrunner et al., 2012; IPCC, 2013; Martins et al., 2015).

A maior parte dos estudos que avaliam a contribuição das florestas plantadas para a mitigação de GEE é realizada a partir da conversão de solos agrícolas ou pastagens para florestas, e os resultados são positivos. De modo geral, a conversão destes sistemas promove o aumento do consumo de  $\text{CH}_4$  e a diminuição da emissão de  $\text{N}_2\text{O}$  pelo solo (Smith et al., 2000; Merino et al., 2004; Allen et al., 2009; Livesley et al., 2009; Shvaleva et al., 2014). No entanto, os fatores que controlam a dinâmica destes gases diferenciam-se em função da diversidade de clima, relevo, solo, espécie e manejo florestal em que cada estudo foi desenvolvido, daí a importância de considerá-los.

Se por um lado a simples conversão de sistemas agrícolas ou pastagens para florestas plantadas apresenta benefícios para a mitigação de  $\text{N}_2\text{O}$  e  $\text{CH}_4$ , por outro, estes benefícios podem ser acentuados com o tempo de uso do solo sob floresta. Allen et al. (2009) constataram que o aumento da idade do povoamento florestal pode reduzir os fluxos de  $\text{N}_2\text{O}$  e  $\text{CH}_4$ , devido à estabilidade química, física e biológica que as florestas proporcionam ao solo ao longo do tempo. Os autores observaram que povoamentos florestais de *Pinus radiata* entre dois e três anos de idade apresentaram maior emissão de  $\text{N}_2\text{O}$ , quando comparados com povoamentos de 5 e 23 anos. Em relação ao metano, os plantios mais velhos absorveram o dobro de  $\text{CH}_4$  ( $-40 \mu\text{g C m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ) em relação aos novos ( $-20 \mu\text{g C m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ).

Estudos envolvendo os fluxos de  $\text{N}_2\text{O}$  e  $\text{CH}_4$  em cronossequências florestais brasileiras ainda são incipientes e insuficientes para esclarecer questionamentos sobre como a idade do plantio florestal pode afetá-los. Além disso, os estudos sobre cronossequências florestais oriundas da conversão de floresta nativa são ainda mais raros, devido à intensidade de mudança de uso do solo e à dificuldade em estabelecer históricos confiáveis, e sua condução só é possível em locais onde o plantio de florestas é realizado há muitos anos.

No estado do Paraná, os primeiros plantios florestais são da década de 50 e localizam-se no Segundo Planalto, numa região de transição entre tipologias florestais e clima Cfa. A

área com pinus no estado é a maior do Brasil, representando 42,4%, e a cultura contribui com R\$ 3,5 bilhões para a economia estadual (DERAL, 2015).

Considerando a importância da cultura do pinus para o Estado do Paraná, e da necessidade de estudos relacionados aos fluxos de GEE em cronossequências florestais procedentes de floresta nativa, este estudo tem como objetivos avaliar a (1) emissão de CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O dos plantios de pinus em relação à floresta nativa e (2) influência da idade destes plantios nos fluxos de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub>.

## **2.4. MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.4.1. ÁREA DE ESTUDO**

O estudo foi realizado em experimento de campo, na Fazenda Monte Alegre, propriedade da Empresa Florestal Klabin S.A., em Telêmaco Borba, PR. A fazenda localiza-se a uma altitude de 880 m e o relevo da região é suave ondulado. O clima é subtropical sem estação seca definida (Cfa), conforme a classificação de Köppen, com temperatura média anual de 20 °C e precipitação anual entre 1400 e 1600 mm (Caviglione et al., 2000). Segundo IAPAR (2016), no município de Telêmaco Borba, o período mais chuvoso ocorre entre janeiro e junho, onde a precipitação acumulada corresponde a 52% da precipitação anual. A condição normal de temperatura do ar é de 20,9 °C entre os meses de agosto e abril, e o período mais frio é de maio a julho, quando a temperatura fica em torno de 15,7 °C.

A vegetação nativa remanescente na área de estudo é Floresta Estacional Semidecidual, sendo que a região onde esta formação está localizada caracteriza-se por ser zona de transição com Floresta Ombrófila Mista. O solo foi classificado como LATOSSOLO VERMELHO distrófico segundo Embrapa (2013).

### **2.4.2. TRATAMENTOS**

O estudo foi conduzido em uma cronossequência de uso do solo, composta por um tratamento referência (MN) e plantios de *Pinus taeda* L. com diferentes idades (Tabela 1).

**Tabela 1.** Caracterização dos tratamentos avaliados. Telêmaco Borba – PR.

Tratamento	Ano de Implantação	1ª rotação	2ª rotação	Uso florestal	Identificação
		Tempo (anos)			
Floresta Estacional Semidecidual (estágio sucessional médio)					<b>MN</b>
<i>Pinus taeda</i>	1979	34	1	35	<b>P34+1</b>
<i>Pinus taeda</i>	1977	29	9	38	<b>P29+9</b>
<i>Pinus taeda</i>	1966	31	18	49	<b>P31+18</b>

A conversão da MN foi realizada após a ocorrência de um incêndio acidental de grandes proporções no ano de 1963 (Antonelli, 2013). A vegetação secundária, constituída por capoeira e espécies arbóreas de pequeno porte, foi enleirada e queimada para a implantação dos plantios de pinus.

O preparo do solo dos plantios consistiu em subsolagem a 0,45 m de profundidade na linha de plantio. O espaçamento utilizado foi de 3 m x 1,5 m em P34+1 e de 3 m x 2 m em P29+9 e P31+18. A produção das mudas foi por sementes e o seu plantio foi realizado manualmente sem aplicação de calcário e fertilizante. Os tratamentos silviculturais realizados foram matocompetição, através da aplicação de herbicida.

Os tratamentos foram selecionados em maio de 2014, conforme seu histórico, tipo de solo e semelhança textural deste. Para isso, amostras deformadas de solo foram coletadas em subcamadas de 20 cm, até 100 cm de profundidade, com trado holandês. As amostras foram secas em estufa a 60 °C, destorroadas e passadas em peneira de malha 2 mm, constituindo terra fina seca em estufa (TFSE). Os teores de areia, silte e argila foram determinados pelo método do densímetro de Bouyoucos (Gee e Bauder, 2002). Em frascos de vidro, 20 g de TFSE foi equilibrada em 200 mL de solução dispersante composta por NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> e (NaPO<sub>3</sub>)<sub>6</sub> 0,02 mol L<sup>-1</sup>. Após 16 horas em agitação horizontal com solução dispersante, as amostras foram transferidas para provetas de 1000 mL, onde seu conteúdo foi preenchido com água. Com o auxílio de um agitador manual, procedeu-se a agitação, e após 40 segundos de sua finalização, realizou-se a primeira leitura, obtendo-se a densidade da argila mais silte. Após 2 horas de sedimentação do silte, realizou-se a segunda leitura, correspondendo à densidade da argila. O teor de silte foi obtido pela diferença entre primeira e segunda leitura, e o teor de areia pela diferença entre teor de argila e silte. A granulometria do solo para cada tratamento é apresentada na Tabela 2.

**Tabela 2.** Granulometria do solo na camada 0-20 cm em Floresta Estacional Semidecidual (MN) e plantações de *Pinus taeda* com 1 (P34+1), 9 (P29+9) e 18 anos (P31+18) em segunda rotação. Telêmaco Borba – PR.

Tratamento	Areia	Silte	Argila	Classe textural
	g kg <sup>-1</sup>			
MN	275	113	613	argiloso
P34+1	175	238	588	argiloso
P29+9	250	313	438	franco-argiloso
P31+18	263	175	563	argiloso

Após a seleção de cada área, realizou-se a instalação de três parcelas, de dimensões de 20 m x 30 m (600 m<sup>2</sup>), em cada tratamento. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, como recomenda Alvarez e Alvarez (2013) para este tipo de estudo.

#### 2.4.3. FLUXOS DE ÓXIDO NITROSO E METANO DO SOLO

Em cada parcela, seis bases circulares foram instaladas de forma aleatória. As bases foram inseridas no solo a 5 cm de profundidade, e foram confeccionadas em aço galvanizado, contando com uma área interna de 0,082 m<sup>2</sup>.

A amostragem de ar para análise da concentração de gases de efeito estufa foi realizada entre dezembro de 2014 e novembro de 2015, a cada 21 dias, pelo método da câmara estática fechada (Zanatta et al., 2014). A câmara tinha dimensões de 35,65 cm de altura x 33,3 cm de diâmetro, foi revestida com manta térmica e possuía termômetro digital, para monitoramento da temperatura interna, e conexão de tipo três vias, para a coleta da amostra de ar, fixados na parte superior. A borda inferior da câmara foi circundada com tarugo de borracha de 3 cm de diâmetro. No momento da coleta de ar, a câmara foi hermeticamente acoplada à base instalada no solo. Amostras de ar do interior da câmara foram retiradas nos intervalos de tempo de 0, 20, 40 e 60 minutos após fechamento da câmara em sua respectiva base com auxílio de seringas de polipropileno de 20 mL. Trinta segundos antes da coleta de ar dos tempos 20, 40 e 60 minutos, acionava-se um ventilador instalado na parte interna da câmara, a fim de homogeneizar o ar em seu interior.

As amostras de ar das seringas foram transferidas para frascos de vidro de 12 mL previamente evacuados (Extainer®). A quantificação da concentração de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub> em cada amostra foi realizada por cromatografia gasosa no equipamento Thermo Scientific, modelo

Trace GC 1310, pertencente a Embrapa Florestas. O cromatógrafo é equipado com detector de ionização de chama (FID) para a avaliação de CH<sub>4</sub>, e detector de captura de elétrons (ECD) para a avaliação do N<sub>2</sub>O.

As taxas de emissão de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub> (expressas em ppm min<sup>-1</sup> ou ppb min<sup>-1</sup>) foram obtidas por meio do coeficiente angular da reta, calculado pelo incremento linear da concentração dos gases no interior da câmara pelo tempo. A quantidade de gás contida na câmara foi calculada pela lei do gás ideal, conforme segue:

$$n = \frac{P \times V}{R \times T} \quad (\text{Equação 1})$$

Sendo:

P – pressão atmosférica (0,948 atm);

V – volume de gás contido na câmara (L). Calculado a partir da taxa de emissão do gás de interesse e o volume total da câmara;

n – número de mols;

R – constante universal do gás ideal (0,082 atm×L mol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>);

T – temperatura interna da câmara (K);

Considerando a área de solo ocupada pela câmara (0,082 m<sup>2</sup>), calculou-se a massa de gás emitido por unidade de área por unidade de tempo (minutos), sendo expressa em µg N-N<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> e µg C-CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>. Os fluxos médios de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub> para cada evento de amostragem foram obtidos a partir das dezoito câmaras avaliadas em cada tratamento.

A emissão anual acumulada foi calculada pela integração dos fluxos diários obtidos ao longo do período de avaliação. A quantidade de carbono necessária para mitigar a emissão anual acumulada de N<sub>2</sub>O (C-N<sub>2</sub>O) e CH<sub>4</sub> (C-CH<sub>4</sub>) foi calculada pelas Equações 2 e 3, respectivamente.

$$\text{C-N}_2\text{O (kg ha}^{-1}\text{)} = \left(\frac{\text{EAA} \times 44}{28}\right) * \text{PAG} * \text{F} \quad (\text{Equação 2})$$

Sendo:

EAA – Emissão anual acumulada (kg N-N<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>);

PAG – potencial de aquecimento global do N<sub>2</sub>O (310 kg CO<sub>2</sub>, conforme IPCC (2013));

F – fator (0,273 - utilizado para a conversão de CO<sub>2</sub> em C);

$$\text{C-CH}_4 \text{ (kg ha}^{-1}\text{)} = \left(\frac{\text{EAA} \times 16}{12}\right) * \text{PAG} * \text{F} \quad (\text{Equação 3})$$

Sendo:

EAA – Emissão anual acumulada ( $\text{kg C-CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ );

PAG – potencial de aquecimento global do  $\text{CH}_4$  ( $23 \text{ kg CO}_2$ , conforme IPCC (2013));

F – fator (0,273 - utilizado para a conversão de  $\text{CO}_2$  em C);

#### 2.4.4. ATRIBUTOS DO SOLO

A amostragem de solo foi realizada concomitante a amostragem de ar. Próximo de cada base e de forma aleatória, duas sub-amostras de solo foram coletadas na camada 0-5 cm com trado calador, constituindo uma amostra. A partir destas amostras, foram determinadas a umidade gravimétrica do solo pela secagem de aproximadamente 10 g de solo úmido em estufa a  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  por 24 horas, conforme Embrapa (1997), e o N mineral. O nitrogênio mineral, na forma de amônio ( $\text{N-NH}_4^+$ ) e nitrato ( $\text{N-NO}_3^-$ ), foi extraído em solução de KCl  $1 \text{ mol L}^{-1}$  e determinado por espectrofotometria em sistema de análise por injeção em fluxo (FIA) (Hambridge, 2007 a,b). As concentrações de  $\text{NH}_4^+$  e  $\text{NO}_3^-$  foram integradas para a determinação das suas respectivas intensidades. Além disso, a temperatura do solo foi aferida próximo de cada base durante a amostragem de ar, com termômetro digital tipo espeto, modelo Soloterm 1200.

Para a determinação da porosidade preenchida por água (PPA), utilizaram-se os dados de umidade do solo, densidade aparente e densidade de partículas, conforme Equação 4.

$$\text{PPA (\%)} = \frac{U_g}{1 - \frac{\rho}{\rho_p}} \times 100 \quad (\text{Equação 4})$$

Sendo:

$U_g$  – umidade gravimétrica ( $\text{g g}^{-1}$ );

$\rho$  – densidade aparente ( $\text{g cm}^{-3}$ );

$\rho_p$  – densidade de partículas ( $\text{g cm}^{-3}$ );

A densidade de partículas foi obtida de amostras deformadas de solo, coletadas em fevereiro de 2015, na camada 0-5 cm, em seis pontos aleatórios de cada tratamento. As amostras foram secas em estufa a  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ , destorroadas e passadas em peneira de malha 2 mm, constituindo terra fina seca em estufa (TFSE). A densidade de partículas foi determinada pelo método do álcool etílico, utilizando balão volumétrico de 50 mL e 20 g de TFSE, previamente seca em estufa a  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  por 24 horas, conforme metodologia descrita por Embrapa (1997).

Amostras indeformadas de solo na camada 0-5 cm foram coletadas em trincheiras abertas em cada uma das parcelas experimentais para a determinação dos atributos físicos.

Cilindros volumétricos de 98 cm<sup>3</sup> foram utilizados para obtenção da densidade do solo, microporosidade e porosidade total do solo. As amostras indeformadas foram submetidas ao toailete de limpeza do excesso de solo e posteriormente saturadas por 24 horas. Logo após, submetidas à mesa de tensão (-6 kPa) por 24 horas, pesadas, e em seguida secas em estufa a 105 °C por 24 horas. A densidade aparente do solo foi determinada pela relação entre a massa da amostra após estufa e o volume de solo. A microporosidade do solo foi obtida pelo volume de água liberado entre a mesa de tensão e a secagem na estufa. A porosidade total foi calculada pela relação entre a densidade aparente do solo e de partículas. A macroporosidade foi calculada pela diferença entre porosidade total e microporosidade.

Uma sub-amostra de TFSE foi moída em moinho almofariz automatizado até passagem em peneira de 250 µm de malha, para a determinação da concentração de carbono orgânico total (COT), que foi realizada por combustão seca em analisador elementar Vario El III.

#### 2.4.5. ATRIBUTOS DA SERAPILHEIRA

Nos meses de abril e outubro de 2015, a serapilheira acumulada sobre o solo foi coletada nos tratamentos MN, P29+9 e P31+18. A coleta de serapilheira foi realizada com um gabarito de madeira com área de 0,122 m<sup>2</sup> (0,35 m x 0,35 m), em cinco pontos aleatórios de cada parcela e em três horizontes, conforme seu grau de decomposição (Valverde, 1951; Reissman, 1983):

- Litter novo (Ln): resíduo vegetal depositado na superfície, não ou levemente decomposto. É caracterizado por acículas soltas com tamanho original e que apresentam boa rigidez.
- Litter fermentado (Lf): As acículas perderam sua rigidez inicial e sua estrutura ainda revela a sua origem.
- Litter humificado (Lh): não é possível detectar a origem da estrutura vegetal. A serapilheira é composta por fragmentos de 2-5 cm de comprimento e há presença de raízes finas.

As amostras coletadas foram secas em estufa a 60 °C, até obtenção de massa constante. A massa seca das amostras foi determinada e estas foram moídas em moinho de facas. A concentração de carbono foi determinada em analisador elementar Vario EL III. Os dados médios das duas amostragens de serapilheira foram apresentados neste estudo. A massa

seca total da serapilheira depositada sobre o solo foi obtida pela soma dos respectivos valores de camada avaliada, e as concentrações de carbono e nitrogênio pela média destas.

#### 2.4.6. ATRIBUTOS METEOROLÓGICOS

Os dados de temperatura do ar e precipitação pluviométrica no período de estudo foram obtidos da estação meteorológica da Empresa Klabin. A estação meteorológica é automática, e localiza-se nas coordenadas 24°12'43,22" S e 50°33'27,63" O, a uma distância média de 6 km dos tratamentos avaliados.

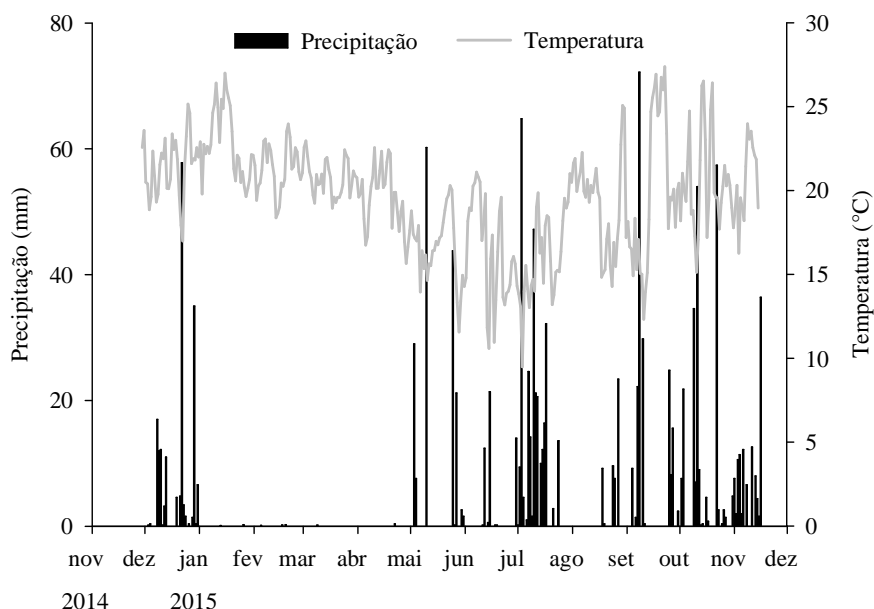
#### 2.4.7. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados foram submetidos ao teste de homogeneidade de variância (Bartlett), seguido de análise de variância (ANOVA). Quando significativos, as médias dos tratamentos foram comparadas entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,10$ ). A correlação de Pearson foi realizada a fim de conhecer a relação entre as variáveis ambientais e os fluxos de  $N_2O$  e  $CH_4$  individualmente. A influência destas variáveis de forma conjunta sobre os fluxos de  $N_2O$  e  $CH_4$  foi obtida por análise de regressão múltipla.

### 2.5. RESULTADOS

#### 2.5.1. PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA E TEMPERATURA DO AR

A precipitação pluviométrica (Figura 1) foi muito reduzida entre janeiro e abril de 2015, apresentando valor médio mensal de 0,9 mm. Nos meses seguintes, a ocorrência de chuva foi frequente, com o maior acumulado ocorrendo em julho, e máxima intensidade em setembro, chegando a 72 mm dia<sup>-1</sup>. A temperatura média do ar não apresentou variações significativas, ficando próxima de 16 °C entre maio e julho, e 21 °C nos demais meses.

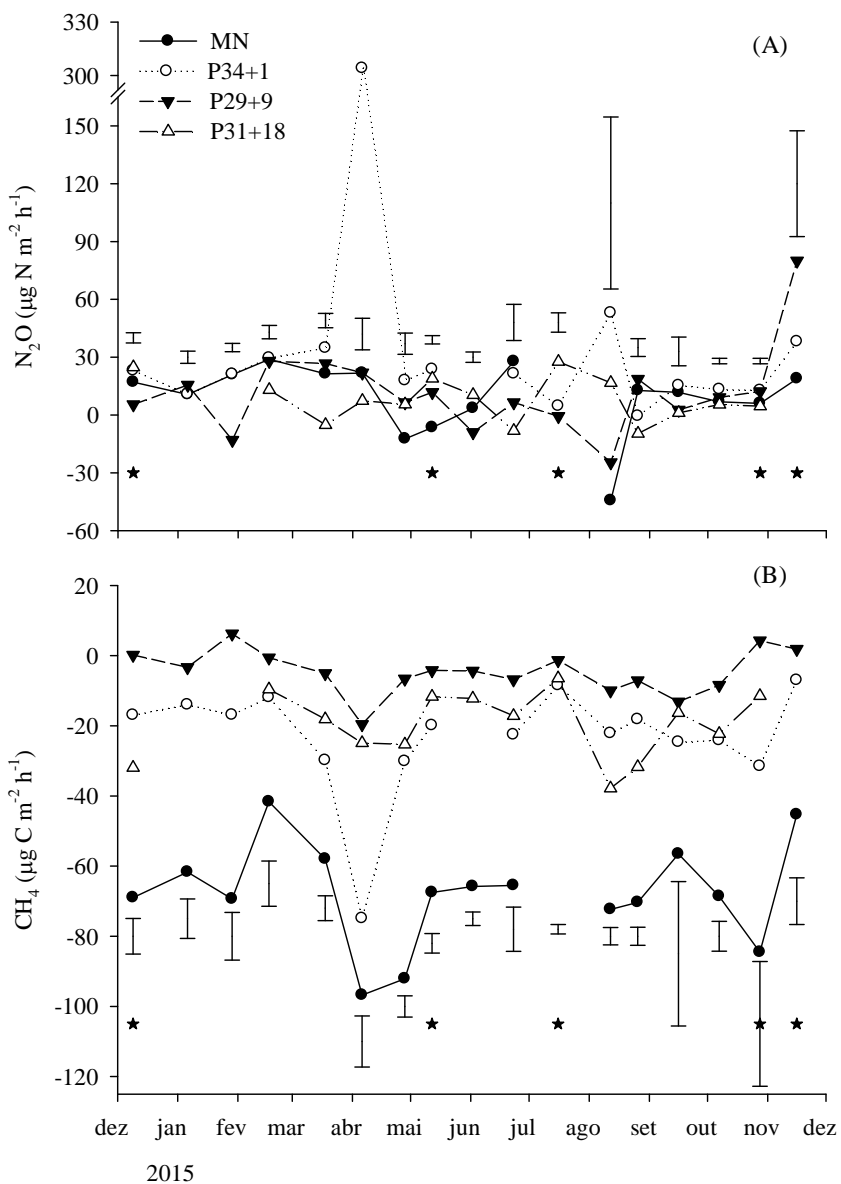


**Figura 1.** Precipitação pluviométrica e temperatura média diária do ar durante o período de avaliação. Telêmaco Borba – PR. Fonte: Empresa Florestal Klabin.

### 2.5.2. FLUXOS DE ÓXIDO NITROSO E METANO DO SOLO

O fluxo de  $N_2O$  do solo variou de  $-44,4$  a  $304,1 \mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{h}^{-1}$ , sendo que a maioria dos eventos ficou dentro da faixa de  $-30$  a  $+30 \mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{h}^{-1}$  (Figura 2A). O solo do tratamento P31+18 apresentou o maior número de eventos de coleta com as menores emissões de  $N_2O$ , seguido de P29+9 e MN. As maiores emissões ocorreram no solo do P34+1, que apresentou uma amplitude de emissão de  $-0,61$  a  $304,1 \mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{h}^{-1}$ .

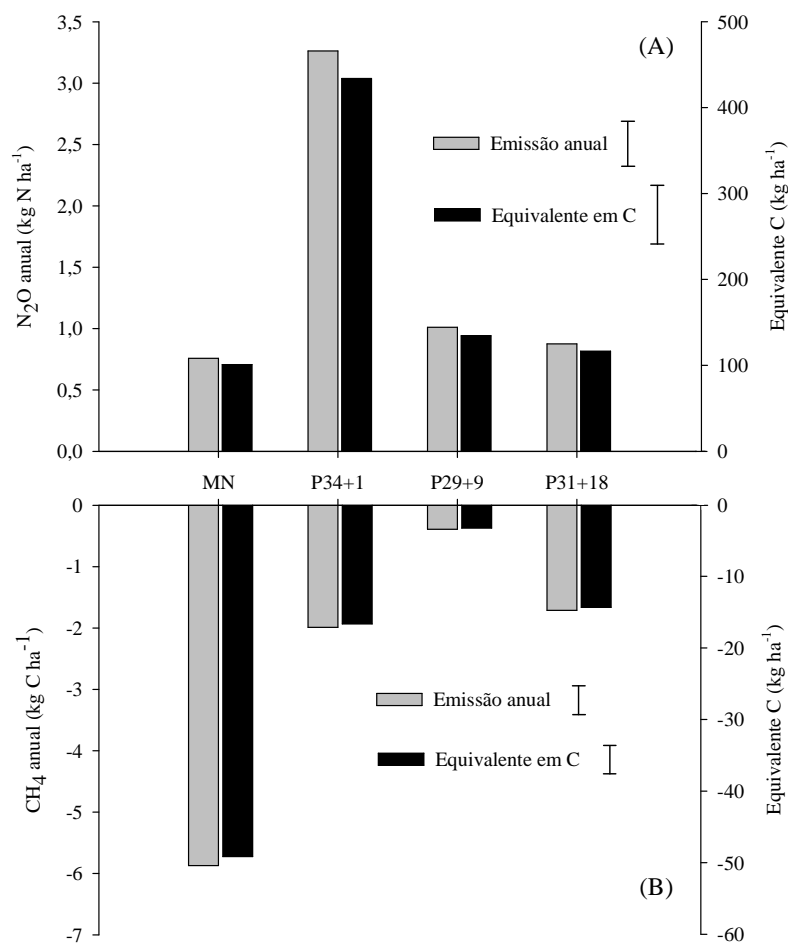
Houve predomínio de influxo de  $CH_4$  (Figura 2B) em praticamente todos os tratamentos. O solo da MN apresentou as maiores taxas de absorção, chegando a  $-96,8 \mu\text{g C-CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{h}^{-1}$ , porém, o oposto ocorreu no solo do tratamento P29+9, que apresentou as menores taxas de influxo de  $CH_4$ , chegando a emitir  $6,2 \mu\text{g C-CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{h}^{-1}$ . O solo dos tratamentos P34+1 e P31+18 apresentaram fluxos com valores intermediários aos anteriores, predominando valores entre  $0$  e  $-20 \mu\text{g C-CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{h}^{-1}$ .



**Figura 2.** Fluxo de N<sub>2</sub>O (A) e CH<sub>4</sub> (B) do solo em Floresta Estacional Semidecidual (MN) e plantações de *Pinus taeda* com 1 (P34+1), 9 (P29+9) e 18 anos (P31+18) em segunda rotação. Telêmaco Borba – PR. Barras verticais indicam a diferença mínima significativa entre os tratamentos ( $p < 0,10$ ) e as estrelas indicam a ocorrência de chuva antes e/ou no momento da amostragem de ar.

A emissão anual acumulada de N<sub>2</sub>O do solo do P34+1 chegou a 3,3 kg N-N<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (Figura 3A), já o solo da MN e nos plantios P29+9 e P31+18, as emissões foram estatisticamente similares entre si, 0,7, 1,0 e 0,9 kg N-N<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, respectivamente (Figura 3A). Considerando que o N<sub>2</sub>O possui um potencial de aquecimento global de 310 vezes maior

que o CO<sub>2</sub> (IPCC, 2013), a quantidade de C necessária para mitigar tais emissões foram relativamente altas, chegando a 100,9 kg ha<sup>-1</sup> na MN, 433,8 kg ha<sup>-1</sup> no P34+1, 134,5 kg ha<sup>-1</sup> em P29+9 e 116,5 kg ha<sup>-1</sup> em P31+18 (Figura 3A).



**Figura 3.** Emissão anual acumulada e equivalente de C necessário para mitigar as emissões anuais de N<sub>2</sub>O (A) e CH<sub>4</sub> (B) do solo sob Floresta Estacional Semidecidual (MN) e plantações de *Pinus taeda* com 1 (P34+1), 9 (P29+9) e 18 anos (P31+18) em segunda rotação. Telêmaco Borba – PR. Barras verticais indicam a diferença mínima significativa entre os tratamentos (p<0,10).

A emissão anual acumulada de CH<sub>4</sub> foi negativa em todos os tratamentos avaliados (Figura 3B), e o maior consumo ocorreu no solo da MN (-5,9 kg C-CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>), sendo quinze vezes maior que o observado no solo do P29+9 (-0,4 kg C-CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>), que foi o tratamento com menor influxo acumulado. Entre P34+1 (-2,0 kg C-CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>) e P31+18 (-1,7 kg C-CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>), não houve diferença significativa. Em função do predomínio do

consumo anual de CH<sub>4</sub> nos tratamentos, o saldo de C necessário para mitigar a emissão deste gás é positivo, e consegue compensar em 48,7 % a emissão anual de N<sub>2</sub>O da MN, 3,8 % do P34+1, 2,4 % do plantio P29+9 e 12,3 % do P31+18.

### 2.5.3. ATRIBUTOS DO SOLO

A porosidade total e macroporosidade do solo nos tratamentos MN, P34+1 e P31+18 foram similares, em média 0,72 e 0,42 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, respectivamente (Tabela 3). A menor porosidade total foi observada no solo do P29+9 (0,57 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>), sendo que a redução no volume de poros ocorreu principalmente pela diminuição do volume de macroporos (0,24 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>). A concentração de COT no solo da MN (64,42 g kg<sup>-1</sup>) foi 2,3 vezes maior que o P34+1 (28,06 g kg<sup>-1</sup>), que por sua vez, não diferiu estatisticamente de P29+9 (25,25 g kg<sup>-1</sup>) e P31+18 (35,71 g kg<sup>-1</sup>) (Tabela 3).

**Tabela 3.** Densidade de partículas (DP), porosidade total (PT), macroporosidade (Macro), microporosidade (Micro) e concentração de carbono orgânico total (COT) do solo na camada 0-5 cm sob Floresta Estacional Semidecidual (MN) e plantações de *Pinus taeda* com 1 (P34+1), 9 (P29+9) e 18 anos (P31+18) em segunda rotação. Telêmaco Borba – PR.

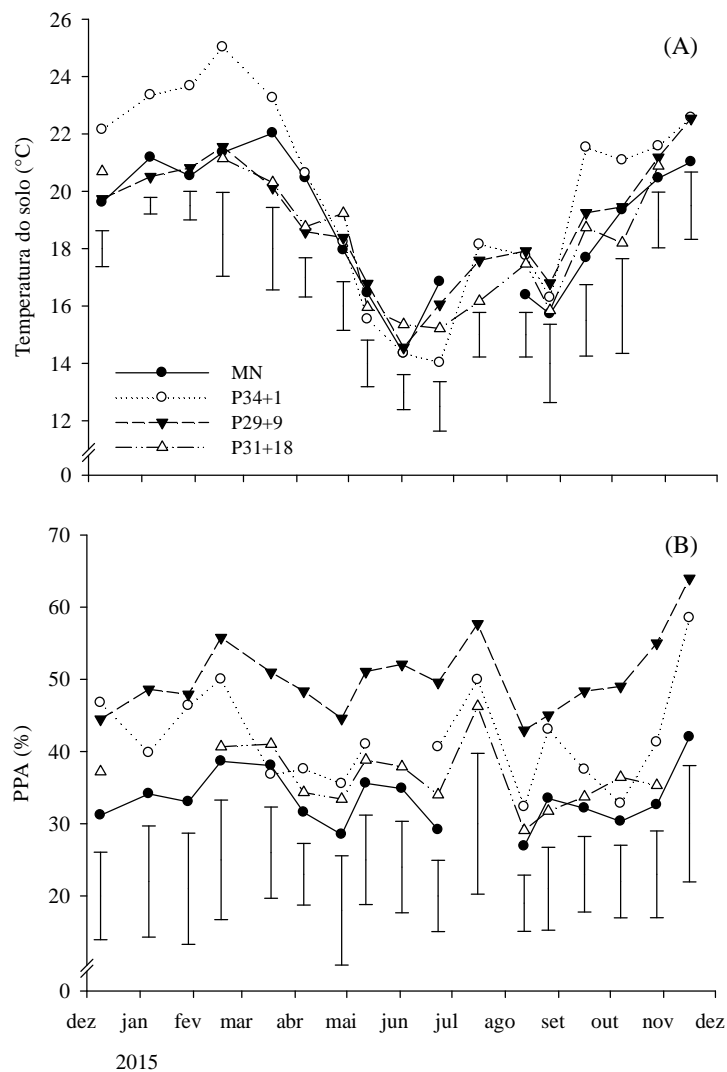
Tratamento	DP (kg dm <sup>-3</sup> )	PT	Porosidade		COT (g kg <sup>-1</sup> )
			Macro (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	Micro	
MN	2,44 b	0,76 a	0,43 a	0,33 a	64,42 a
P34+1	2,82 a	0,70 a	0,43 a	0,27 a	28,06 b
P29+9	2,46 b	0,57 b	0,24 b	0,33 a	25,25 b
P31+18	2,59 b	0,70 a	0,38ab	0,32 a	35,71 b

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (p<0,10).

A temperatura do solo (Figura 4A) variou entre 20,1 e 25,0 °C no período do verão, e de 14,0 a 21,5 °C no período do inverno. No verão, nitidamente o solo do plantio P34+1 apresentou as maiores temperaturas (em média 23,8 °C) se comparado aos demais tratamentos, que apresentaram temperaturas ao redor de 21,8 °C na média dos tratamentos e do período. No inverno, o solo P34+1 apresentou a maior amplitude térmica, variando de 14,0 a 21 °C.

Os maiores valores de porosidade preenchida por água (Figura 4B) foram observados no solo do P29+9, com uma PPA média de 50,3 % durante todo o período de avaliação. A

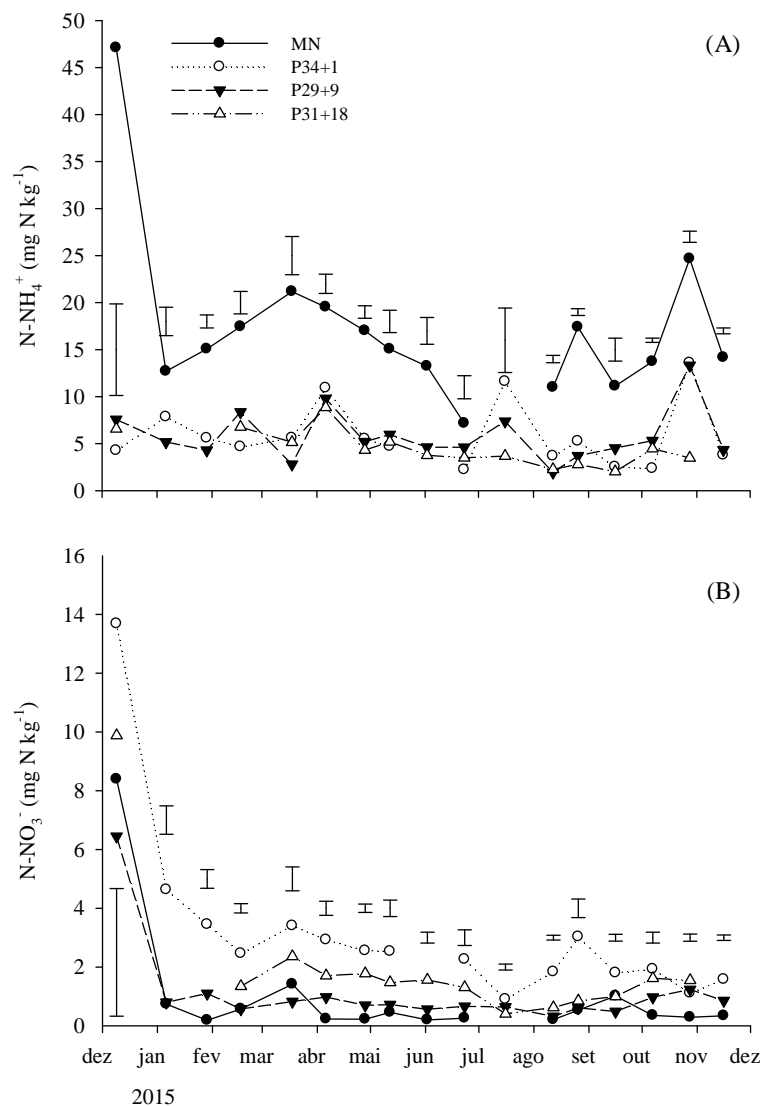
segunda maior PPA média ocorreu no solo do P34+1 (41,9 %), seguido de P31+18 (36,4 %) e MN (33,3 %).



**Figura 4.** Temperatura (A) e porosidade preenchida por água (PPA) (B) do solo em Floresta Estacional Semidecidual (MN) e plantações de *Pinus taeda* com 1 (P34+1), 9 (P29+9) e 18 anos (P31+18) em segunda rotação. Telêmaco Borba – PR. Barras verticais indicam a diferença mínima significativa entre os tratamentos ( $p < 0,10$ ).

A concentração de  $\text{NH}_4^+$  no solo variou de 1,9 a 47,1 mg N  $\text{kg}^{-1}$  (Figura 5A), e a de  $\text{NO}_3^-$  entre 0,2 e 13,7 mg N  $\text{kg}^{-1}$  (Figura 5B). O solo da MN apresentou as maiores concentrações médias de  $\text{NH}_4^+$  (17,3 mg N  $\text{kg}^{-1}$ ) e as menores concentrações médias de  $\text{NO}_3^-$  (1,0 mg N  $\text{kg}^{-1}$ ). Nos plantios de pinus, os teores de  $\text{NH}_4^+$  do solo foram similares entre si, e as

concentrações médias de  $\text{NO}_3^-$  foram maiores em P34+1 (3,1 mg N  $\text{kg}^{-1}$ ), seguido de P31+18 (2,0 mg N  $\text{kg}^{-1}$ ) e P29+9 (1,1 mg N  $\text{kg}^{-1}$ ), cujas concentrações se equivaleram as observadas na MN.



**Figura 5.** Concentração de  $\text{NH}_4^+$  (A) e  $\text{NO}_3^-$  (B) do solo em Floresta Estacional Semidecidual (MN) e plantações de *Pinus taeda* com 1 (P34+1), 9 (P29+9) e 18 anos (P31+18) em segunda rotação. Telêmaco Borba – PR. Barras verticais indicam a diferença mínima significativa entre os tratamentos ( $p < 0,10$ ).

#### 2.5.4. ATRIBUTOS DA SERAPILHEIRA

A massa seca da serapilheira depositada sobre o solo do P31+18 foi superior aos demais tratamentos (20,66 Mg  $\text{ha}^{-1}$ ), equivalendo a 2,5 e 1,7 vezes a quantidade de

serapilheira verificada na MN (8,35 Mg ha<sup>-1</sup>) e no tratamento P9+9 (12,22 Mg ha<sup>-1</sup>), respectivamente (Tabela 4). A menor concentração de carbono foi encontrada na serapilheira da MN (436,66 g kg<sup>-1</sup>), que por sua vez foi semelhante ao P29+9 (461,20 g kg<sup>-1</sup>) e inferior ao P31+18 (474,30g kg<sup>-1</sup>). A ordem inversa ocorreu para a concentração de nitrogênio da serapilheira, sendo menor em P31+18 (11,37 g kg<sup>-1</sup>), seguida de P29+9 (11,92 g kg<sup>-1</sup>) e MN (15,93 g kg<sup>-1</sup>). A relação C:N da serapilheira da MN foi de 28, valor menor que os tratamentos com pinus, sendo que nestes, a relação C:N aumentou com a idade, indo de 39 em P29+9 para 42 em P1+18.

**Tabela 4.** Valores médios de duas avaliações de massa seca, concentrações de carbono e nitrogênio e relação C:N da serapilheira depositada sobre o solo em Floresta Estacional Semidecidual (MN) e plantações de *Pinus taeda* com 9 (P29+9) e 18 anos (P31+18) em segunda rotação. Telêmaco Borba – PR.

Tratamento	Massa seca (Mg ha <sup>-1</sup> )	C		C:N
		g kg <sup>-1</sup>		
MN	8,35 c	436,66 b	15,93 a	28 c
P29+9	12,22 b	461,20 ab	11,92 b	39 b
P31+18	20,66 a	474,30 a	11,37 c	42 a

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (p<0,10).

#### 2.5.5. FLUXOS DE ÓXIDO NITROSO E METANO DO SOLO E VARIÁVEIS AMBIENTAIS

O fluxo de N<sub>2</sub>O apresentou correlação positiva com a temperatura do solo e concentração de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, enquanto que para o fluxo de CH<sub>4</sub> houve correlação positiva com a PPA e negativa com a concentração de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (Tabela 5).

**Tabela 5.** Correlação de Pearson entre fluxos de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub> do solo e porosidade preenchida por água (PPA), temperatura e concentrações de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> e NO<sub>3</sub><sup>-</sup> do solo. Telêmaco Borba – PR.

Gás	PPA	Temperatura do solo	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
N <sub>2</sub> O	0,066 <sup>ns</sup>	0,216*	0,028 <sup>ns</sup>	0,121*
CH <sub>4</sub>	0,619*	0,053 <sup>ns</sup>	-0,632*	0,096 <sup>ns</sup>

\*: coeficiente de correlação (r) com p<0,10; <sup>ns</sup>: não significativo.

Os dados da regressão múltipla demonstram o predomínio da influência positiva da temperatura do solo e da concentração de nitrato sobre o fluxo de óxido nitroso do solo nos tratamentos avaliados (Equação 5).

$$\text{N}_2\text{O} (\mu\text{g N m}^{-2} \text{ h}^{-1}) = 0,138\text{PPA} + 2,960\text{T} + 0,055\text{NH}_4^+ + 1,215\text{NO}_3^- - 47,645 \quad (\text{Equação 5})$$

$$(\text{R}^2 = 0,052; n = 189; p < 0,01)$$

Sendo:

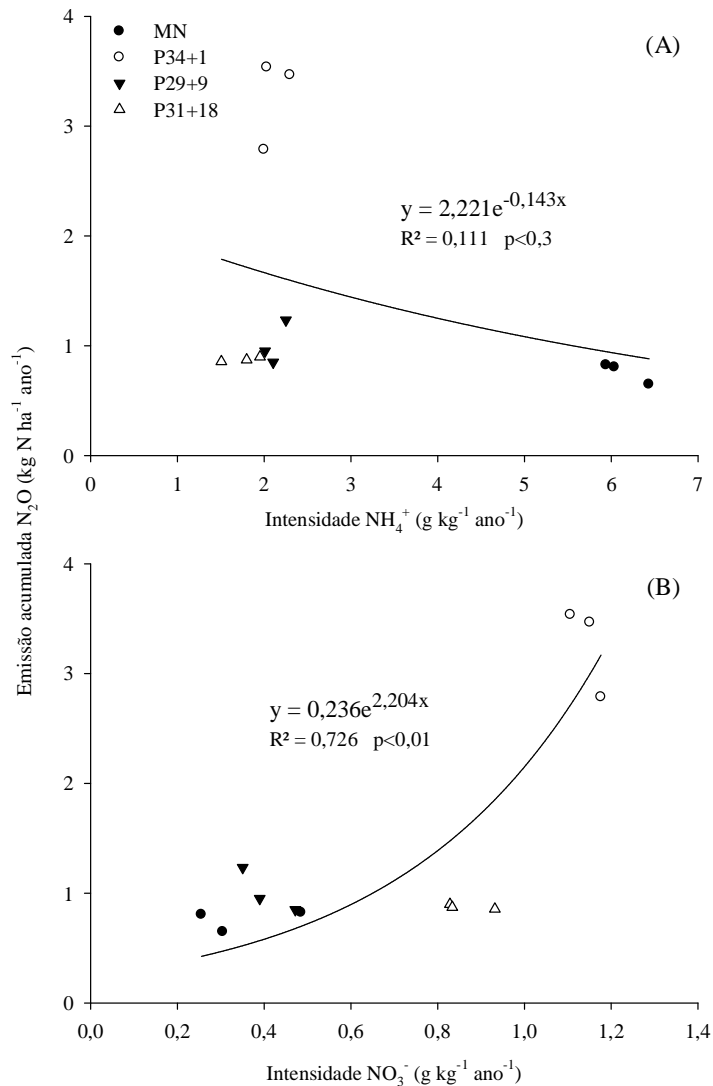
T= temperatura do solo (°C);

A regressão múltipla para o fluxo de CH<sub>4</sub> do solo representa 64,5 % dos dados e revelou a influência positiva da PPA e da concentração de nitrato, e negativa da temperatura do solo e concentração de amônio (Equação 6). A influência de cada variável é equilibrada, exceto a temperatura do solo que apresentou menor influência.

$$\text{CH}_4 (\mu\text{g C m}^{-2} \text{ h}^{-1}) = 1,380\text{PPA} - 0,173\text{T} - 1,933\text{NH}_4^+ + 1,530\text{NO}_3^- - 69,062 \quad (\text{Equação 6})$$

$$(\text{R}^2 = 0,645; n = 189; p < 0,01)$$

A Figura 6 ilustra a relação entre a emissão anual acumulada de N<sub>2</sub>O e intensidades de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> e NO<sub>3</sub><sup>-</sup> nos tratamentos avaliados (Figuras 6A e 6B, respectivamente). Para modelos similares de regressão, a emissão acumulada de óxido nitroso foi melhor relacionada com a intensidade de nitrato do solo, representando 72,6 % dos dados e nível de significância de 0,01. Esta equação demonstra aumento contínuo da emissão de N<sub>2</sub>O com o aumento da concentração de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, correspondendo a uma taxa de 220 % de aumento da emissão a cada 1 g kg<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de nitrato na solução do solo.



**Figura 6.** Relação entre emissão acumulada de  $N_2O$  e intensidades de  $NH_4^+$ (A) e  $NO_3^-$  (B) do solo sob Floresta Estacional Semidecidual (MN) e plantações de *Pinus taeda* com 1 (P34+1), 9 (P29+9) e 18 anos (P31+18) em segunda rotação. Telêmaco Borba – PR. Os três pontos indicam as três parcelas avaliadas em cada tratamento.

## 2.6. DISCUSSÃO

### 2.6.1. FLUXO DE ÓXIDO NITROSO DO SOLO

A produção de  $N_2O$  no solo através do processo de nitrificação normalmente ocorre sob condições aeróbicas (Cardoso et al., 2001; Wrage et al., 2001; Zanatta, 2009), em intervalo de PPA variando de 20 a 60 % (Livesley et al., 2009; Gregorich et al., 2015). Considerando tais informações, e que o valor máximo de PPA obtida neste estudo foi de 63 %

(Figura 4B), é provável que grande parte da emissão de  $N_2O$  seja proveniente deste processo. A relação positiva entre fluxo  $N_2O$  e concentração de  $NO_3^-$  do solo (Tabela 5), e a relação entre emissão acumulada e intensidade de  $NO_3^-$  nos tratamentos avaliados (Figura 6) são indícios de que o processo de nitrificação está contribuindo com a emissão de  $N_2O$  (Wang et al., 2013; Erickson e Perakis, 2014).

Com relação aos tratamentos, a menor emissão acumulada de  $N_2O$  ( $0,76 \text{ kg N-N}_2O \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ) no solo da MN (Figura 3) se deve a menor intensidade de ocorrência do processo de nitrificação, refletindo uma concentração média de  $NH_4^+$  ( $17,3 \text{ mg kg}^{-1}$ ) maior (Figura 5A). Neste tratamento, a diversidade vegetal e microbiana são maiores, e a serapilheira apresenta baixa relação C:N (Tabela 4), favorecendo o processo de decomposição (Wang et al., 2013; Zhao et al., 2013; Erickson e Perakis, 2014). Por ser um ecossistema estável e possuir uma ciclagem eficiente de nitrogênio (Allen et al., 2015), o amônio mineralizado é competido pelas plantas e pelos diversos grupos microbianos do solo, restando uma baixa concentração para o processo de nitrificação e emissão de óxido nitroso (Kaye et al., 1997; Osaki, 2008).

A magnitude de emissão de  $N_2O$  no solo do P34+1 (Figura 2A) foi superior às encontradas em solos florestais de clima subtropical (Wang et al., 2013; Veloso-Gomes, 2014; Godoi et al., 2016) e temperado (Merino et al., 2004; Allen et al., 2009; Livesley et al., 2009; McDaniel et al., 2014). Possivelmente, a recente colheita da primeira rotação e o plantio de mudas, que possuem um dossel pouco desenvolvido, contribuíram para a alteração do microclima da floresta, ocorrendo maiores amplitudes de temperatura e umidade do solo (Seitz, 1976; McDaniel et al., 2014; Godoi et al., 2016). Ainda, o aporte de elevada quantidade de material orgânico da colheita estimulou a atividade microbiana, logo, o nitrogênio mineralizado ficou mais vulnerável à nitrificação devido à presença de árvores ainda pouco desenvolvidas, e que não exploravam o volume integral de solo das entrelinhas, culminando em maiores taxas de perdas de  $N_2O$  (McDaniel et al., 2014).

As emissões anuais acumuladas no solo dos plantios P29+9 e P31+18 foram estatisticamente semelhantes a MN, em média  $0,9 \text{ kg N-N}_2O \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  (Figura 3). Este resultado foi superior ao encontrado por Merino et al. (2004) ( $0,8 \text{ kg N-N}_2O \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ), em solo de floresta de carvalhos com 40 anos de idade no Sul da Europa, e por Livesley et al. (2009), que encontrou um valor médio de  $0,2 \text{ kg N-N}_2O \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  para solos de floresta nativa, plantios de *Eucalyptus globulus* com 7 anos e plantios de *Pinus radiata* com 18 anos no Oeste da Austrália. Em condições subtropicais, a emissão anual acumulada de  $N_2O$  do solo obtida neste estudo também foi superior em relação a solo de Floresta Decidual Aluvial

(0,1 kg N-N<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>) e solos de florestas de *Eucalyptus saligna* com 2 (0,3 kg N-N<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>) e 4 anos (0,1 kg N-N<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>) no Pampa gaúcho (Godoi, 2012). No entanto, em solo de florestas de *Pinus taeda* com 12 anos em segunda rotação localizadas no Planalto Norte catarinense, Veloso-Gomes (2014) encontrou emissão superior (1,6 kg N-N<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>), e similar em Floresta Ombrófila Mista (0,9 kg N-N<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>).

A semelhante emissão anual entre MN, P29+9 e P31+18 (Figura 3) certamente decorre da menor concentração de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> e NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (Figuras 5A e 5B) verificado no solo dos plantios, fazendo com que as emissões de N<sub>2</sub>O permanecessem baixas (Wang et al., 2013; Erickson e Perakis, 2014). A menor taxa de mineralização de N no solo dos plantios de pinus deve ser baixa em razão da alta relação C:N da serapilheira depositada sobre o solo (Tabela 4) (Wang et al., 2013), que acumulou com o aumento da idade. Na MN, a mineralização do N é mais intensa, porém a liberação de elevados teores de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> não resultaram necessariamente em maiores emissões de N<sub>2</sub>O, possivelmente devido à ciclagem mais eficiente do N neste ecossistema (McDonald e Healey, 2000; Pinto et al., 2009; Allen et al., 2015) e até mesmo devido a maior competição biológica pelo N mineral (Kaye et al., 1997; Osaki, 2008).

Entre os plantios, o solo do P29+9 apresentou os maiores valores de PPA em relação ao P31+18, em média 50,3 % (Figura 4B), embora com concentrações de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> e NO<sub>3</sub><sup>-</sup> similares (Figuras 5A e 5B). Comparando estes tratamentos, as maiores emissões diárias no P29+9 ocorreram com maior frequência entre fevereiro e abril (Figura 2A), período em que a precipitação foi praticamente nula (Figura 1) e o solo apresentou redução da PPA (Figura 4B). Possivelmente, a diminuição da umidade do solo propiciou melhores condições para a ocorrência do processo de nitrificação, e isto teria dado suporte às perdas de N<sub>2</sub>O. Este comportamento pode ser confirmado pela relação entre concentração de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> e emissão de N<sub>2</sub>O (Tabela 5), evidenciando a produção de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> e N<sub>2</sub>O simultaneamente. No solo do P31+18, as maiores emissões ocorreram em eventos chuvosos (Figura 2A), ou após a ocorrência de chuvas. Nestes eventos, é possível observar a diminuição da concentração de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> do solo (Figura 5B), indicando uma possível redução pelo processo de desnitrificação em decorrência do aumento da PPA (Wrage et al., 2001; Zanatta, 2009; Gregorich et al., 2015), e/ou a sua lixiviação.

#### 2.6.2. FLUXO DE METANO DO SOLO

O predomínio de absorção de CH<sub>4</sub> pelo solo, como observado nos tratamentos avaliados (Figura 2B), também foi relatado por Borken et al. (2003), Merino et al. (2004),

Allen et al. (2009), Livesley et al. (2009), Hiltbrunner et al. (2012) e Wang et al. (2013) em solos florestais de clima temperado. O saldo negativo é resultado líquido entre os processos de emissão e absorção de metano no solo, tanto pode haver produção por metanogênese, como pode ocorrer metanotrofia pela atividade das bactérias metanotróficas (Singh et al., 2010). Em comparação com outros tipos de uso do solo, a amplitude do fluxo de CH<sub>4</sub> no solo dos sistemas florestais avaliados (-96,8 a 6,2 µg C-CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) foi menor em relação à pastagem de *Brachiaria decumbens* no Sudoeste de Goiás (-30 a +70 µg C-CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) (Carvalho et al., 2014), solos representativos do cultivo de arroz irrigado no Rio Grande do Sul (750 a 51300 µg C-CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) (Silva et al., 2011) e sob sistema agrícola em plantio direto constituído por diferentes sistemas de culturas como aveia preta+ervilhaca/milho+caupi, guandu+milho, lablab+milho, aveia preta/milho e ervilhaca/milho, que apresentaram variação média de -40 a +62 µg C-CH<sub>4</sub> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> (Bayer et al., 2012).

A correlação negativa entre fluxo de metano e concentração de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (Tabela 5) difere do relatado em alguns estudos, onde é descrito o efeito inibitório do NH<sub>4</sub><sup>+</sup> sobre a oxidação de CH<sub>4</sub>, fazendo com que seu consumo seja menor (Merino et al., 2004; Allen et al., 2009; Livesley et al., 2009; Hiltbrunner et al., 2012; Brevilieri e Dieckow, 2015; Shrestha et al., 2015; Godoi et al., 2016). Neste estudo, considerando que a maior concentração de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> e o maior influxo de CH<sub>4</sub> ocorreram na MN, e que os plantios de pinus possuem concentrações de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> inferiores, é possível inferir que o teor de amônio não influenciou a oxidação de CH<sub>4</sub>. Em revisão bibliográfica, Bodelier e Laanbroek (2004) alegam que devido à complexa interação entre diversos fatores do solo, a concentração de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> pode não apresentar efeito, inibir ou até mesmo estimular a oxidação de metano. Em ecossistemas naturais, como na MN, a dinâmica da ciclagem de nutrientes é mais eficiente (McDonald e Healey, 2000; Pinto et al., 2009; Allen et al., 2015), proporcionando condições favoráveis ao desenvolvimento das bactérias metanotróficas, responsáveis pela oxidação de CH<sub>4</sub> (Bodelier e Laanbroek, 2004).

Todavia, segundo a regressão múltipla, a concentração de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> apresentou relação positiva com o fluxo de CH<sub>4</sub>, indicando um possível efeito inibitório a metanotrofia. Este efeito pode ocorrer durante a nitrificação, onde são produzidos compostos intermediários como hidroxilamina (NH<sub>2</sub>OH) e nitrito (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), que apresentam efeitos tóxicos às bactérias metanotróficas (Wang e Ineson, 2003; Brevilieri e Dieckow, 2015; Shrestha et al., 2015). Diante do exposto e considerando que o maior consumo anual de metano ocorreu no solo do P34+1 (-1,99 kg C ha<sup>-1</sup>) (Figura 3), onde a concentração de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> foi maior (em média 3,13 g

$\text{N kg}^{-1}$ ) (Figura 5B), é possível que este efeito não tenha sido limitante à atividade metanotrófica. Por outro lado, o efeito inibitório do nitrato também pode ocorrer durante a desnitrificação, através da sua redução para  $\text{NO}_2^-$  (Wang e Ineson, 2003; Mochizuki et al., 2012). Porém, considerando que a desnitrificação normalmente ocorre em um intervalo de PPA maior que 60 % (Smith et al., 2003; Livesley et al., 2009; Gregorich et al., 2015) e que o máximo valor de PPA obtido neste estudo foi de 63 % (Figura 4B), é provável que este processo tenha ocorrido em menor escala, assim como o efeito inibitório do nitrato, embora sítios anaeróbicos possam ocorrer em solos aerados (Zanatta et al., 2009). Além disso, torna-se difícil reconhecer se a concentração de nitrato está limitando a atividade metanotrófica durante o processo de desnitrificação, pois intervalos de PPA elevados do solo também afetam diretamente a produção de  $\text{CH}_4$ , contribuindo para a metanogênese (Smith et al., 2000; Smith et al., 2003; Bodelier e Laanbroek, 2004; Merino et al., 2004; Allen et al., 2009; Livesley et al., 2009; Hiltbrunner et al., 2012; Godoi et al., 2016).

Neste estudo, a PPA do solo nos tratamentos foi relativamente elevada durante todo o período de avaliação (Figura 4B), mesmo entre os meses de fevereiro e abril, período em que a precipitação foi praticamente nula, demonstrando que a textura argilosa do solo dos tratamentos implicou em maior retenção de umidade (Xu et al., 2016). A PPA apresentou relação positiva com o fluxo de  $\text{CH}_4$  (Tabela 5), e sua influência se dá na difusividade do  $\text{CH}_4$  e  $\text{O}_2$ , de modo que menores valores de PPA levam a maior difusividade desses gases no interior do solo, e conseqüentemente, maiores taxas de oxidação de  $\text{CH}_4$  (Smith et al., 2003; Borken et al., 2003; Veloso-Gomes, 2014; Shrestha et al., 2015).

A PPA foi influenciada pelo volume de macroporos do solo (Tabela 3). Nos tratamentos MN, P34+1 e P31+18, o maior volume de macroporos propiciou que se verificassem os menores valores de PPA. Todavia, no pinus P29+9, para uma mesma condição de umidade, o menor volume de macroporos do solo permitiu que maior proporção destes estivessem ocupados por água, obtendo assim a condição propícia para a produção de  $\text{CH}_4$  no solo. Essa condição física do solo manteve maior PPA no solo do P29+9 durante todo o período de avaliação. Em uma cronossequência florestal Hiltbrunner et al. (2012) relatam que a menor PPA também motivou a mitigação de  $\text{CH}_4$  do solo, sendo essa maior em plantios mais velhos. Os autores alegam que a diminuição da PPA do solo de plantios mais velhos se deve a menor infiltração de água em função da espessa camada de serapilheira, assim como as maiores taxas de absorção, evapotranspiração e interceptação da água.

Embora o solo do tratamento P31+18 tenha apresentado emissão anual acumulada semelhante ao P34+1 (Figura 3), o aumento da idade do plantio de 9 para 18 anos contribuiu para a mitigação de 1,3 kg C-CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup>. O solo da MN apresentou o maior influxo anual de CH<sub>4</sub>, -5,87 kg C-CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, se comparado aos plantios de pinus (P34+1, P29+9 e P31+18), que apresentaram consumo médio de -1,36 kg C-CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>. Além da PPA, como já discutido anteriormente, um outro fator que possivelmente influenciou os maiores influxos de CH<sub>4</sub> no solo da MN foi o teor de carbono orgânico (Tabela 3). O maior teor de carbono orgânico contribuiu para a melhoria da estrutura do solo, o que favoreceu a difusividade dos gases e também a infiltração de água (Smith et al., 2003; Bodelier e Laanbroek, 2004; Merino et al., 2004), restringindo condições propícias para a produção de CH<sub>4</sub>. Por outro lado, em P34+1, o preparo do solo (subsolação) para o plantio deve ter favorecido a rápida infiltração de água, reduzindo a umidade do solo, aumentando a difusividade de gases (Tian et al., 2012) e resultando no consumo de 1,99 kg C-CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>.

Comparando o valor de influxo de CH<sub>4</sub> do solo da MN com os obtidos por Veloso-Gomes (2014) em solo sob Floresta Ombrófila Mista em Rio Negrinho – SC (-10,77 kg C-CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>), e por Godoi (2012) em solo sob Floresta Estacional Decidual Aluvial no município de Cacequi – RS (-3,20 kg C-CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>), verifica-se amplitude de valores. As condições climáticas em que estes estudos foram desenvolvidos podem ter influenciado o consumo de CH<sub>4</sub>, mesmo constituindo formações florestais diferentes. Desta forma, a temperatura amena (clima Cfb) em Rio Negrinho possivelmente foi mais propícia à atividade metanotrófica, enquanto que em regiões mais quentes (clima Cfa), como Cacequi e Telêmaco Borba, a metanogênese pode ter sido favorecida, assim como a redução da atividade metanotrófica, já que são grupos bacterianos mais sensíveis ao estresse abiótico (Horz et al., 2005; Mohanty et al., 2007). Uma hipótese para o aumento da metanogênese em regiões com clima Cfa pode estar relacionada à criação de sítios anaeróbicos no solo em decorrência da maior atividade microbiana e maior demanda de O<sub>2</sub> (Smith et al., 2003; Singh et al., 2010; Xu et al., 2016).

## 2.7. CONCLUSÕES

- O solo do ecossistema nativo ou de plantios de pinus com idade igual e superior a 9 anos apresentaram emissão de N<sub>2</sub>O equivalentes.

- Todos os sistemas avaliados apresentaram capacidade de mitigar metano, contudo, a magnitude de valores foi maior na mata nativa do que nos plantios de pinus, onde não foi

observado efeito claro da idade da floresta, mas das características físicas do solo, como a macroporosidade.

## 2.8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Allen DE, Mendham DS, Bhupinderpal-Singh, Cowiec A, Wang W, Dalal RC, Raison RJ. Nitrous oxide and methane emissions from soil are reduced following afforestation of pasture lands in three contrasting climatic zones. *Australian Journal of Soil Research*, 2009; 47:443-458.

Allen K, Corre MD, Tjoa A, Veldkamp E. Soil nitrogen-cycling responses to conversion of lowland forests to oil palm and rubber plantations in Sumatra, Indonesia. *PlosOne*, 2015; 10:1-21.

Alvarez VH, Alvarez GAM. Reflexões sobre a utilização de estatística para pesquisas em ciência do solo. In: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – SBCS. Boletim informativo da SBCS. Viçosa, SBCS; 2013. p.28-35.

Antonelli D. Quando o Paraná virou um inferno [internet]. Curitiba, PR: Gazeta do Povo; 2013 [acesso em 28 jan. 2016]. Disponível em: <http://www.gazetadopovo.com.br/vida-e-cidadania/quando-o-parana-viceu-um-inferno-cek86t5u466b3ztyk8vor6jim>.

Balbinot R, Schumacher MV, Watzlawick LF, Sanquetta CR. Inventário do carbono orgânico em um plantio de *Pinus taeda* aos 5 anos de idade no Rio Grande do Sul. *Revista Ciências Exatas e Naturais*, 2003; 1:60-68.

Bayer C, Gomes J, Vieira FCB, Zanatta JA, Piccolo MC, Dieckow J. Methane emission from soil under long-term no-till cropping systems. *Soil & Tillage Research*, 2012; 124:1-7.

Bodelier PLE, Laanbroek HJ. Nitrogen as a regulatory of methane oxidation in soils and sediments. *FEMS Microbiology Ecology*, 2004; 47:265-277.

Borken W, Xu Y, Beese F. Conversion of hardwood forests to spruce and pine plantations strongly reduced soil methane sink in Germany. *Global Change Biology*, 2003; 9:956-966.

Brevilieri RC, Dieckow J. Mitigação de emissões de gases de efeito estufa em solos agrícolas e florestais como indicador de serviços ambientais. In: Parron LM, Garcia JR, Oliveira EB, Brown GG, Prado RB, editores. Serviços ambientais em sistemas agrícolas e florestais do Bioma Mata Atlântica. Brasília, Embrapa; 2015.p.109-121.

Cardoso NA, Saminêz TC, Vargas MA. Fluxo de gases-traço de efeito estufa na interface solo-atmosfera em solos de Cerrado. Planaltina: Embrapa Cerrados; 2001. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 17).

Carvalho JLN, Raucci GS, Frazão LA, Cerri CEP, Bernoux M, Cerri CC. Crop-pasture rotation: a strategy to reduce soil greenhouse gas emissions in the Brazilian Cerrado. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2014; 183:167-175.

Caviglione JH, Kihl LRB, Caramori PH, Oliveira D. Cartas climáticas do Paraná [internet]. Londrina, PR: Instituto Agronômico do Paraná – IAPAR; 2000 [acesso em: 28 jul. 2015]. Disponível em: <http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=677>.

DERAL – Departamento de Economia Rural. Valor bruto da produção agrícola paranaense em 2014 [internet]. Curitiba, PR: Secretaria de Estado da Agricultura e Abastecimento; 2015 [acesso em: 04 dez. 2015]. Disponível em: <http://www.agricultura.pr.gov.br/arquivos/File/deral/AnaliseVBP2014Resumida.pdf>.

Embrapa - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Manual de métodos de análise de solo. 2ª ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos; 1997.

Embrapa – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 3ª ed. Brasília: Embrapa; 2013.

Erickson HE, Perakis S. Soil fluxes of methane, nitrous oxide, and nitric oxide from aggrading forests in coastal Oregon. Soil Biology & Biochemistry, 2014; 76:268-277.

Gee GW, Bauder JW. Particle size analysis. In: Dane JH, Topp GC, editors. Methods of soil analysis. Madison, Soil Science Society of America; 2002. p.278-284.

Godoi SG. Fluxo de gases de efeito estufa em solos do Pampa gaúcho sob silvicultura [dissertação]. São Gabriel: Universidade Federal do Pampa; 2012.

Godoi EG, Neufeld ADH, Ibarra MA, Ferreto DOC, Bayer C, Lorentz LH, Vieira FCB. The conversion of grassland to acacia forest as an effective option for net reduction in greenhouse gas emissions. *Journal of Environmental Management*, 2016; 169:91-102.

Gregorich E, Janzen HH, Helgason B, Ellert B. Nitrogenous gas emissions from soil and greenhouse gas effects. *Advances in Agronomy*, 2015; 132:39-74.

Hambridge J. QuikChem method 12-107-04-1-J: determination of nitrate in 2M KCl soil extracts by flow injection analysis. Loveland: Lachat Instruments; 2007. [a]

Hambridge J. QuikChem method 12-107-06-2-F: determination of ammonia (salicylate) in 2 M KCl soil extracts by flow injection analysis (high throughput). Loveland: Lachat Instruments; 2007. [b]

Hiltbrunner D, Zimmermann S, Karbin S, Hagedorn F, Niklaus PA. Increasing soil methane sink along 120-year afforestation chronosequence is driven by soil moisture. *Global Change Biology*, 2012; 18:3664-3671.

Horz H, Rich V, Avrahami S, Bohannan BJM. Methane-oxidizing bacteria in a California upland grassland soil: diversity and response to simulated global change. *Applied and Environmental Microbiology*, 2005; 71:2642-2652.

IAPAR – Instituto Agrônomo do Paraná. Médias históricas em estações do IAPAR [internet]. Londrina, PR: IAPAR; 2016 [acesso em 27 jan. 2016]. Disponível em: <http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=1070>.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2014: synthesis report. In: Core Writing Team, Pachauri RK, Meyer L, editors. Fifth assesment report. Geneva, Switzerland; 2014. p. 1-151.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate change (contribution of working group I). Climate change 2013: the physical science basis. In: Stocker TF, Qin D, Plattner K, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM, editors. Fifth assesment report. Cambridge, Cambridge University Press; 2013. p. 1-1535.

Jandl R, Lindner M, Vesterdal L, Bauwens B, Baritz R, Hagedorn F, Johnson DW, Minkinen K, Byrne KA. How strongly can Forest management influence soil carbon sequestration? *Geoderma*, 2007; 137:253-268.

Livesley SJ, Kiese R, Miehle P, Weston CJ, Butterbach-Bahl K, Arndt SK. Soil-atmosphere Exchange of greenhouse gases in a *Eucalyptus marginata* woodland, a clover-grass pasture and *Pinus radiata* and *Eucalyptus globulus* plantations. *Global Change Biology*, 2009; 15:425-440.

Kaye JP, Hart SC. Competition for nitrogen between plants and soil microorganisms. *Tree*, 1997; 12:139-143.

Martins CSC, Nazaries ML, Macdonald CA, Anderson IC, Singh BK. Water availability and abundance of microbial groups are key determinants of greenhouse gas fluxes in a dryland forest ecosystem. *Soil Biology & Biochemistry*, 2015; 86:5-16.

McDaniel MD, Kaye JP, Kaye MW. Do “hot moments” become hotter under climate change? Soil nitrogen dynamics from a climate manipulation experiment in a post-harvest forest. *Biogeochemistry*, 2014; 121:339-354.

McDonald MA, Healey JR. Nutrient cycling in secondary forests in the Blue Mountains of Jamaica. *Forest Ecology and Management*, 2000; 139:257-278.

Merino A, Batallón PP, Macías F. Responses of soil organic matter and greenhouse gas fluxes to soil management and land use changes in a humid temperate region of Southern Europe. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004; 36:917-925.

Mochizuki Y, Koba K, Yoh M. Strong inhibitory effect of nitrate on atmospheric methane oxidation in forest soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 2012; 50:164-166.

Mohanty SR, Bodelier PLE, Conrad R. Effect of temperature on composition of the methanotrophic community in rice field and forest soil. *FEMS Microbiology Ecology*, 2007; 62:24-31.

Osaki F. Distribuição espacial de microrganismos e fertilidade em solos de dois ecossistemas florestais: Floresta Ombrófila Mista e povoamento florestal com *Pinus taeda* L. em Tijucas do Sul – PR [tese]. Curitiba: Universidade Federal do Paraná; 2008.

Pinto SIC, Martins SV, Barros NF, Dias HCT. Ciclagem de nutrientes em dois trechos de Floresta Estacional Semidecidual na Reserva Florestal Mata do Paraíso em Viçosa, MG, Brasil. *Árvore*, 2009; 33:653-663.

Reissman CB. Morfologia dos horizontes de húmus em florestas de coníferas do sul do Brasil. *Revista do Setor de Ciências Agrárias*, 1983; 5:11-16.

Seitz RA. Estudo da variação da radiação solar, temperatura e umidade relativa do ar no interior de uma mata de *Araucaria angustifolia* em relação ao terreno livre. *Floresta*, 1976; 7:36-45.

Shrestha RK, Strahm BD, Sucre EB. Greenhouse gas emissions in response to nitrogen fertilization in managed forest ecosystems. *New Forests*, 2015; 46:167-193.

Silva LS, Griebeler G, Moterle DF, Bayer C, Zschornack T, Pocojeski E. Dinâmica da emissão de metano em solos sob cultivo de arroz irrigado no Sul do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 2011; 35:473-481.

Singh BK, Bardgett Rd, Smith P, Reay DS. Microorganisms and climate change: terrestrial feedbacks and mitigation options. *Nature*, 2010; 8:779-790.

Smith KA, Ball T, Conen F, Dobbie KE, Massheder J, Rey A. Exchange of greenhouse gases between soil and atmosphere: interactions of soil physical factors and biological processes. *European Journal of Soil Science*, 2003; 54:779-791.

Smith KA, Dobbie KE, Ball BC, Bakken LR, Sitaula BK, Hansen S, Brumme R, Borken W, Christensen S, Priemê A, Fowler D, Macdonald JA, Skiba U, Klemetsson L, Kasimir-Klemetsson A, Degórska A, Orlanski P. Oxidation of atmospheric methane in Northern European soils, comparison with other ecosystems, and uncertainties in the global terrestrial sink. *Global Change Biology*, 2000; 6:791-803.

Shvaleva A, Costa e Silva F, Costa JM, Correia A, Anderson M, Lobo-do-Vale R, Figueiro D, Bicho C, Pereira JS, Chaves MM, Skiba U, Cruz C. Comparison of methane, nitrous oxide fluxes and CO<sub>2</sub> respiration rates from a Mediterranean cork oak ecosystem and improved pasture. *Plant Soil*, 2014; 374:883-898.

Tian S, Ning T, Zhao H, Wang B, Li N, Han H, Li Z, Chi S. Response of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions and wheat yields to tillage method changes in the North China Plain. *PlosOne*, 2012; 7:1-10.

Valverde FC. Estudo dos horizontes orgânicos do solo de matas, no arenito Bauru. *Bragantia*, 1951; 11:195-210.

Veloso-Gomes M. Estoque de carbono e emissão de gases de efeito estufa em Cambissolo sob plantações de *Pinus taeda* [dissertação]. Curitiba: Universidade Federal do Paraná; 2014.

Wang H, Liu S, Wang J, Shi Z, Lu L, Zeng J, Ming A, Tang J, Yu H. Effects of tree species mixture on soil organic carbon stocks and greenhouse gas fluxes in subtropical plantation in China. *Forest Ecology and Management*, 2013; 300:4-13.

Wang Z, Ineson P. Methane oxidation in a temperate coniferous forest soil: effects of inorganic N. *Soil Biology & Biochemistry*. 2003; 35:427-433.

Wrage N, Velthof GL, van Beusichem ML, Oenema O. Role of nitrifier denitrification in the production of nitrous oxide. *Soil Biology & Biochemistry*, 2001; 33:1723-1732.

Xu X, Shi Z, Li D, Rey A, Ruan H, Craine JM, Liang J, Zhou J, Luo Y. Soil properties control decomposition of soil organic carbon: results from data-assimilation analysis. *Geoderma*, 2016; 262:235-242.

Zanatta JA, Alves BJR, Bayer C, Tomazi M, Fernandes AHBM, Costa FS, Carvalho AM. Protocolo para medição de fluxos de gases de efeito estufa do solo. Ed 1a. Colombo: Embrapa Florestas; 2014 (Documentos, 265).

Zanatta JA. Emissão de óxido nitroso afetada por sistemas de manejo do solo e fontes de nitrogênio [tese]. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2009.

Zhao HF, Yao XJ, Wang Q, Chen YS, Xu XN. Nitrogen deposition and soil nitrogen dynamics in subtropical evergreen broad-leaved stands along an age-sequence. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2013; 13:237-250.

## CONCLUSÃO GERAL

Nas condições edafoclimáticas deste estudo, os sistemas florestais constituídos por plantios de *Pinus taeda* L. foram eficientes no sequestro de carbono, depositando-o na forma de biomassa vegetal. As taxas de sequestro de carbono na biomassa arbórea foram superiores a 6 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> para plantios consolidados, sendo que aos 18 anos, o plantio de pinus apresentou o mesmo conteúdo de carbono que o ecossistema nativo.

A conversão da floresta nativa para plantios de pinus reduziu o conteúdo de carbono do solo em aproximadamente 30 %, já no primeiro ciclo de cultivo. Porém, o uso continuado de floresta plantada por mais de 20 anos não alterou os estoques de carbono do solo, sugerindo um novo equilíbrio para o sistema. Nesta condição, as taxas de sequestro de carbono na biomassa vegetal superam as taxas de perda de carbono do solo, e pode-se inferir que os plantios contribuem para a mitigação da emissão de dióxido de carbono atmosférico.

Com relação ao fluxo de óxido nitroso nos plantios de pinus, estes foram equivalentes ao medido no sistema nativo, exceto para a idade mais jovem, onde as emissões foram maiores. Este comportamento das emissões no solo do plantio mais jovem merece maior acompanhamento, buscando entender melhor os fatores que determinam a maior emissão, bem como monitorar as alterações da emissão ao longo do ciclo da cultura. A absorção de metano do solo foi três vezes maior na mata nativa do que nos plantios de pinus. Porém, a emissão líquida de N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub> foi favorável ao plantio florestal com 18 anos, pois o elevado potencial de aquecimento global do N<sub>2</sub>O é minimizado pelo efeito benéfico da absorção de CH<sub>4</sub>, apresentando comportamento similar ao sistema nativo.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Embora a conversão da floresta nativa para plantios de pinus tenha diminuído o estoque de COT do solo, e que a quantidade de carbono necessária para mitigar a emissão de N<sub>2</sub>O tenha sido elevada, estes sistemas apresentam elevado potencial de mitigação dos gases de efeito estufa, principalmente com o aumento da idade.

O envelhecimento dos plantios de pinus promoveu o aumento do sequestro de carbono na biomassa e a redução da emissão de N<sub>2</sub>O e aumento do consumo de CH<sub>4</sub>. Considerando os resultados obtidos e o manejo florestal adotado nos povoamentos avaliados, algumas medidas poderiam ser tomadas, a fim de aumentar o potencial de mitigação dos gases de efeito estufa destes plantios. O aumento do tempo do ciclo de rotação contribuiria para a redução da emissão de N<sub>2</sub>O, aumento do consumo de CH<sub>4</sub> e aumento do estoque de carbono do solo, sendo este também favorecido pela permanência do resíduo da colheita florestal sobre o solo, no período de transição entre rotações.

## APÊNDICES

**APÊNDICE 1.** Concentração de carbono orgânico total (COT) do solo em Floresta Estacional Semidecidual (MN), plantações de *Pinus taeda* com 29 (P29) e 38 anos (P38) em primeira rotação e plantações de *Pinus taeda* com 1 (P34+1), 9 (P29+9) e 18 (P31+18) anos em segunda rotação. Telêmaco Borba – PR.

Camada (cm)	Tratamento					
	MN	P29	P38	P34+1	P29+9	P31+18
0-5	64,42 a	30,46 b	28,62 b	28,05 b	25,25 b	35,71 b
5-10	42,60 a	20,28 b	15,88 b	19,70 b	18,46 b	18,34 b
10-20	39,90 a	18,62 b	17,16 b	18,23 b	16,26 b	16,08 b
20-30	29,19 a	16,27 b	12,10 b	14,72 b	13,23 b	14,85 b
30-45	21,51 a	13,32 bc	9,87 c	14,29 b	12,42 bc	13,35 bc
45-60	14,87 a	11,54 bc	8,78 c	12,96 ab	10,67 bc	12,94 ab
60-80	13,46 a	9,82 bc	8,46 c	11,26 b	9,60 bc	11,60 ab
80-100	11,53 ab	8,24 c	8,02 c	12,88 a	7,69 c	9,31 bc

Médias seguidas pela mesma letra na linha indicam não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,10$ ).

**APÊNDICE 2.** Densidade do solo em Floresta Estacional Semidecidual (MN), plantações de *Pinus taeda* com 29 (P29) e 38 anos (P38) em primeira rotação e plantações de *Pinus taeda* com 1 (P34+1), 9 (P29+9) e 18 anos (P31+18) em segunda rotação. Telêmaco Borba – PR.

Camada (cm)	Densidade (kg dm <sup>-3</sup> )					
	MN	P29	P38	P34+1	P29+9	P31+18
0-5	0,56 b	0,91 a	1,04 a	1,07 a	1,05 a	0,78 ab
5-10	0,89 b	1,16 a	1,11 a	1,10 a	1,12 a	1,13 a
10-20	1,02 b	1,19 ab	1,26 ab	1,29 ab	1,30 a	1,26 ab
20-30	1,05 b	1,24 ab	1,30 a	1,10 b	1,30 a	1,31 a
30-45	0,86 c	1,18 ab	1,24 a	1,10 b	1,22 a	1,17 ab
45-60	0,90 b	1,26 a	1,19 a	1,11 ab	1,14 a	1,08 ab
60-80	0,92 b	1,27 a	1,15 ab	1,06 b	1,16 ab	0,97 b
80-100	0,96 b	1,27 a	1,17 ab	1,00 b	1,11 ab	1,00 b

Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,10$ ).

**APÊNDICE 3.** Características químicas do solo em Floresta Estacional Semidecidual (MN), plantações de *Pinus taeda* com 29 (P29) e 38 anos (P38) em primeira rotação e plantações de *Pinus taeda* com 1 (P34+1), 9 (P29+9) e 18 anos (P31+18) em segunda rotação. Telêmaco Borba – PR.

Tratamento	Camada (cm)	pH		Al <sup>+3</sup>	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	K <sup>+</sup>	SB	P	m
		CaCl <sub>2</sub>	SMP							
MN	0-5	4,22	5,01	1,58	2,70	0,78	0,31	3,79	0,84	37,73
	5-10	4,23	5,36	1,83	0,38	0,12	0,12	0,62	0,27	70,83
	10-20	4,11	5,11	2,09	0,85	0,15	0,15	1,15	0,32	67,14
	20-30	4,11	5,24	1,94	0,35	0,02	0,07	0,44	0,09	81,33
	30-45	4,24	5,49	1,33	0,42	0,06	0,08	0,56	0,04	72,39
	45-60	4,35	5,77	0,86	0,15	0,00	0,05	0,19	0,01	74,74
	60-80	4,49	5,99	0,48	0,13	0,00	0,03	0,16	0,01	62,72
	80-100	4,61	6,02	0,27	0,95	0,28	0,07	1,30	0,15	47,24
P29	0-5	4,04	4,64	3,92	1,84	0,37	0,24	2,46	1,22	60,20
	5-10	4,06	4,89	3,42	1,70	0,43	0,20	2,32	0,64	59,27
	10-20	4,04	4,84	3,55	1,53	7,91	0,18	9,62	0,50	57,71
	20-30	4,12	4,93	3,58	1,12	0,31	0,15	1,58	0,46	69,93
	30-45	3,98	4,86	3,41	0,60	0,13	0,11	0,84	0,26	79,37
	45-60	4,12	5,06	3,27	0,51	0,06	0,09	0,66	0,21	82,75
	60-80	4,08	5,06	3,17	0,47	0,00	0,08	0,55	0,14	85,05
	80-100	4,16	5,21	2,79	0,40	0,00	0,08	0,48	0,13	84,95
P38	0-5	3,67	4,82	3,83	0,38	0,03	0,09	0,50	1,92	88,42
	5-10	3,95	5,29	2,76	0,19	0,00	0,05	0,24	1,04	91,88
	10-20	3,99	5,49	2,40	0,14	0,00	0,04	0,19	1,10	92,69
	20-30	4,05	5,70	2,04	0,13	0,00	0,03	0,15	0,68	92,94
	30-45	4,07	5,77	1,85	0,11	0,00	0,02	0,13	0,50	93,56
	45-60	4,11	5,90	1,64	0,11	0,00	0,01	0,12	0,43	92,98
	60-80	4,18	6,02	1,32	0,12	0,00	0,01	0,13	0,35	90,76
	80-100	4,24	6,13	0,97	0,12	0,00	0,01	0,13	0,35	88,04

Continua...

Continua..

Tratamento	Camada (cm)	pH		Al <sup>+3</sup>	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	K <sup>+</sup>	SB	P	m
		CaCl <sub>2</sub>	SMP							
P34+1	0-5	4,23	5,09	1,73	3,96	0,48	0,29	4,73	1,74	30,43
	5-10	4,34	5,22	1,73	4,08	0,36	0,20	4,64	1,05	35,91
	10-20	4,34	5,23	1,98	3,22	0,42	0,13	3,78	0,73	39,17
	20-30	4,58	5,51	1,65	3,48	0,30	0,07	3,85	0,39b	36,17
	30-45	4,31	5,41	1,76	2,10	0,26	0,14	2,50	0,14	44,49
	45-60	4,27	5,48	1,95	1,34	0,13	0,09	1,56	0,04	52,93
	60-80	4,41	5,72	2,05	1,13	0,10	0,06	1,29	0,01	51,35
	80-100	4,44	5,78	1,00	1,95	0,15	0,12	2,22	0,10	39,56
P29+9	0-5	3,90	4,67	4,96	1,36	0,22	0,15	1,73	1,87	73,12
	5-10	3,95	4,71	4,92	0,96	0,18	0,11	1,25	1,27	79,38
	10-20	3,92	4,70	5,12	0,39	0,04	0,08	0,51	0,69	91,28
	20-30	3,92	4,73	5,28	0,24	0,00	0,05	0,29	0,38	94,96
	30-45	3,94	4,71	5,32	0,22	0,00	0,05	0,27	0,22	95,28
	45-60	4,00	4,73	4,99	0,16	0,00	0,04	0,21	0,14	96,15
	60-80	4,07	5,41	4,33	0,12	0,00	0,04	0,16	0,13	96,46
	80-100	4,14	5,12	3,49	0,10	0,00	0,03	0,13	0,14	96,25
P31+18	0-5	3,75	4,59	5,24	0,29	0,00	0,09	0,38	2,04	93,05
	5-10	3,98	4,96	3,80	0,18	0,00	0,06	0,23	0,57	94,05
	10-20	4,05	5,17	3,16	0,13	0,00	0,04	0,17	0,49	95,00
	20-30	4,06	5,29	2,91	0,13	0,00	0,03	0,16	0,33	94,70
	30-45	4,13	5,44	2,43	0,11	0,00	0,02	0,13	0,19	94,76
	45-60	4,15	5,52	2,26	0,12	0,00	0,02	0,14	0,15	94,31
	60-80	4,20	5,69	1,91	0,11	0,00	0,01	0,12	0,11	94,12
	80-100	4,28	5,81	1,58	0,1	0,00	0,01	0,12	0,11	92,94

**APÊNDICE 4.** Valores do estoque de COT do solo nas camadas 0-30 e 0-100 cm em Floresta Estacional Semidecidual (MN), plantações de *Pinus taeda* com 29 (P29) e 38 anos (P38) em primeira rotação e plantações de *Pinus taeda* com 1 (P34+1), 9 (P29+9) e 18 anos (P31+18) em segunda rotação. Telêmaco Borba – PR.

Tratamento	Camada (cm)	
	0-30	0-100
MN	103,69 a	201,12 a
P29	57,22 b	134,30 b
P38	50,86 b	111,53 b
P34+1	55,49 b	139,12 b
P29+9	50,04 b	122,44 b
P31+18	52,91 b	133,94 b

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ( $p < 0,10$ ).

**APÊNDICE 5.** Valores médios de duas avaliações de massa seca, concentrações de carbono e nitrogênio e relação C:N das camadas da serapilheira depositada sobre o solo em Floresta Estacional Semidecidual (MN) e plantações de *Pinus taeda* com 9 (P29+9) e 18 anos (P31+18) em segunda rotação. Telêmaco Borba – PR.

Tratamento	Camada	Massa seca (Mg ha <sup>-1</sup> )	C N		C:N
			g kg <sup>-1</sup>		
MN	Ln	0,41 a	435,15 b	15,31 a	28 b
	Lf	2,33 b	452,92 b	15,38 a	30 b
	Lh	5,33 c	426,48 a	16,89 a	26 b
	Total	8,07 c	-	-	-
P29+9	Ln	1,23 a	483,68 ab	9,75 b	51 a
	Lf	2,95 b	482,70 a	11,79 b	42 a
	Lh	8,05 b	420,03 a	14,06 b	30 a
	Total	12,22 b	-	-	-
P31+18	Ln	0,88 a	485,36 a	9,38 b	53 a
	Lf	6,30 a	489,23 a	10,88 b	44 a
	Lh	14,11 a	450,13 a	13,83 b	33 a
	Total	21,29 a	-	-	-

Médias seguidas pela mesma letra para cada camada individual não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ( $p < 0,10$ ).