

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA
CAMPUS SÃO GABRIEL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM CIÊNCIAS
BIOLÓGICAS

STEFÂNIA GUEDES DE GODOI

FLUXO DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM SOLOS DO PAMPA GAÚCHO SOB
SILVICULTURA

SÃO GABRIEL, RIO GRANDE DO SUL, BRASIL

2012

STEFÂNIA GUEDES DE GODOI

**FLUXO DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM SOLOS DO PAMPA GAÚCHO SOB
SILVICULTURA**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Ciências Biológicas da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Ciências Biológicas

Orientador: Prof. Dr. Frederico Costa Beber
Vieira

São Gabriel

2012

STEFÂNIA GUEDES DE GODOI

**FLUXO DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM SOLOS DO PAMPA GAÚCHO SOB
SILVICULTURA**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Ciências Biológicas da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Ciências Biológicas

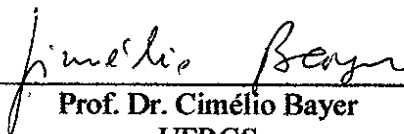
Área de Concentração: Qualidade Ambiental

Dissertação defendida e aprovada em 12 de dezembro de 2012.

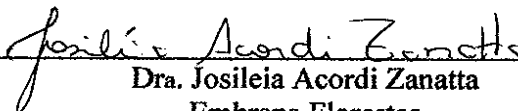
Banca examinadora:



Prof. Dr. Frederico Costa Beber Vieira
Orientador
UNIPAMPA



Prof. Dr. Cimélio Bayer
UFRGS



Dra. Josileia Acordi Zanatta
Embrapa Florestas



Profa. Dra. Mirla Andrade Weber
UNIPAMPA

Dedico essa dissertação ao meu esposo Luiz Fernando e meu filho Thiago pelo carinho, apoio, incentivo e paciência sempre.

AGRADECIMENTOS

À UNIPAMPA pela formação e a oportunidade da realização deste estudo.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Frederico Costa Beber Vieira, pela orientação, pelos ensinamentos, apoio e colaboração na realização deste estudo.

A Sra. Silvia de Assis Brasil Souto e ao Sr. Diego Borba Nedeff, proprietários da Estância Quero-quero em Vila Nova do Sul, pela colaboração em disponibilizar o local para a realização do estudo.

À Empresa Florestal Granflor do município de Cacequi, pela colaboração em conceder o local para a realização do estudo.

Ao CNPq e a FAPERGS pelo apoio financeiro.

À Ângela Neufeld, minha colega e grande amiga, que participou de todas as etapas deste estudo, além do grande auxílio na realização do trabalho, emprestou seu ombro nos momentos mais difíceis, foi companheira e amiga em todos os momentos.

Aos colaboradores do Laboratório de Biogeoquímica Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, pela colaboração na realização das análises.

Ao meu esposo, Luiz Fernando, pelo amor, apoio, carinho e incentivo sempre, além da disponibilidade de tempo para as viagens à Vila Nova do Sul.

Ao meu filho, Thiago, pelo amor, carinho e compreensão durante mais esta etapa da minha vida, mesmo quando dediquei pouco tempo para participar de suas brincadeiras.

Aos meus pais, Erivelto e Maria Cleusa, pelo apoio e compreensão, mesmo quando passei grandes períodos sem visitá-los devido ao envolvimento na realização das pesquisas.

A minha sogra, Maria Ledi, pelo carinho, apoio e empréstimo do carro para as viagens à Vila Nova do Sul.

Aos colegas do grupo de pesquisa de solos pela ajuda prestada nos experimentos e nas análises laboratoriais.

A todos, que apesar de não citados nominalmente, ajudaram no meu crescimento pessoal e profissional, e na realização desse trabalho.

RESUMO

FLUXO DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM SOLOS DO PAMPA GAÚCHO SOB SILVICULTURA

AUTORA: Stefânia Guedes de Godoi

ORIENTADOR: Prof. Dr. Frederico Costa Beber Vieira

A região do Pampa Gaúcho está passando por modificação do tipo de uso do solo, com a inserção da silvicultura em solos de pastagens ou agricultura. No entanto, pouco se conhece sobre o impacto que tal mudança implica no fluxo dos Gases de Efeito Estufa (GEE) nessa região, especialmente em relação aos fluxos de metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) do solo. Este estudo teve como objetivo principal avaliar a inserção da silvicultura, com *Acacia mearnsii* De Wild e *Eucalyptus saligna*, em áreas de campo nativo e o seu efeito no fluxo CH₄ e N₂O do solo, e determinar os principais fatores de solo que governam os fluxos destes gases. Dois experimentos foram realizados durante o período de um ano, em povoamentos de *Acacia mearnsii* De Wild avaliando quatro tratamentos: Acácia (AM), Acácia com retirada manual de serrapilheira (A-s), Acácia recém colhida (AC) e campo nativo (CN); e de *Eucalyptus saligna* avaliando cinco tratamentos: Eucalipto com quatro anos (E4), Eucalipto com quatro anos com retirada manual da serrapilheira (E4-s), Eucalipto com dois anos (E2), Mata Nativa (MN) e Campo Nativo (CN), utilizando o campo nativo como tratamento de referência. As amostras de ar foram coletadas quinzenalmente pelo método de câmaras estáticas e os teores dos gases foram determinados por cromatografia gasosa. Em cada evento de amostragem de ar, foram avaliados a umidade e os teores de nitrogênio mineral do solo, coletada a serrapilheira e monitorada a temperatura do solo e do ar dentro da câmara. A inserção tanto do eucalipto como de acácia não alterou significativamente os fluxos de CH₄ e N₂O do solo em relação ao campo nativo adjacente a cada floresta. Os fluxos de N₂O foram geralmente baixos, com a maioria dos valores entre -5 e 30 µg N m⁻² h⁻¹, provavelmente favorecidas pela baixa precipitação do período avaliado e dos baixos teores de nitrogênio mineral do solo. Houve predomínio de oxidação de CH₄ nos solos sob silvicultura no período avaliado, em magnitude similar ao campo nativo. O solo sob eucalipto com dois anos tendeu a emitir mais N₂O do que com quatro anos. A colheita da acácia promoveu aumento da emissão de N₂O, provavelmente decorrente da maior disponibilidade de nitrogênio mineral no solo para os processos de nitrificação e desnitrificação. Em relação ao CH₄, a maior emissão coincidiu com os períodos de temperatura do solo mais elevada, o que é coerente com o aumento da atividade biológica, principalmente em áreas com menor cobertura vegetal. Os teores de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) do solo sob eucalipto e acácia não diferiram significativamente do campo nativo para a ampla maioria das camadas avaliadas. Somado aos baixos fluxos de CH₄ e N₂O da silvicultura, o sequestro de carbono via biomassa vegetal e produtos madeireiros sugerem que a mudança de uso do solo com inserção de silvicultura seja uma opção efetiva para a mitigação dos GEE e aumento do sequestro de carbono em áreas da região do Pampa Gaúcho.

Palavras-chave: Eucalipto, Acácia, Metano, Óxido Nitroso, Florestamento

ABSTRACT

FLUXES OF GREENHOUSE GASES IN THE SOIL OF PAMPA GAÚCHO WITH FORESTRY

AUTHORESS: Stefânia Guedes de Godoi

ADVISER: Prof. Dr. Frederico Costa Beber Vieira

The soil use in the region of the Pampa Gaúcho has been modified by of forestation in soils previously used for agriculture or grazing. However, little is known about the impact of this change on greenhouse gases (GHG) fluxes in the soil in that region, mainly regarded to the methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O). This study aimed to evaluate the effect of the conversion of native grassland to forestry, with *Acacia mearnsii* De Wild and *Eucalyptus saligna*, in the Pampa Gaúcho on the soil CH₄ and N₂O fluxes, besides determining the soil variables that govern these fluxes. Two experiments were conducted for one year, in plantations of *Acacia mearnsii* De Wild evaluating four treatments: Acacia (AM), Acacia with manual litter removal (A-s), Acacia recently harvested (AH) and native grassland (NG); and *Eucalyptus saligna* evaluating five treatments: four-year Eucalyptus plantation (E4), four-year Eucalyptus plantation with manual litter removal (E4-l), two-year Eucalyptus plantation (E2), Native forest (NF) and Native grassland (NG), using the native grassland as reference treatment. The air samples were taken biweekly by the method of static chambers and gas concentrations were determined by gas chromatography. In each sampling event, we evaluated the soil moisture and mineral nitrogen content, deposition of litter and monitored the soil and chamber air temperature. The forestation with both eucalyptus and acacia did not alter significantly the soils fluxes of CH₄ and N₂O in comparison to the native grassland adjacent to each forest. The N₂O flux are generally low, with most values ranging from -5 to 30 µg N m⁻² h⁻¹, probably favoured by the low rainfall and soil mineral nitrogen levels during the evaluated period. Similarly magnitude to the soil under native grassland, CH₄ oxidation predominated in forested soils in the period of the experiment. The soil with two-year old eucalyptus plantation tended to emit more N₂O than the four-year plantation. The harvest of acacia increased the soil N₂O emission, likely due to the larger availability of mineral N in the soil for the nitrification and denitrification processes. With respect to CH₄, the largest emission coincided with periods of higher soil temperature, which is coherent herewith increased of the biological activity, especially in areas with less vegetation cover. The contents of total organic carbon (TOC) and total nitrogen (TN) in soils with eucalyptus and acacia were not significantly different from those observed in native grassland soil for most layers. The low CH₄ and N₂O emissions from forestry added to the carbon sequestration in the plant biomass and wood products suggests that the change of land use for forestation is an effective option for mitigating the GHG emissions and for increasing the carbon sequestration in areas such as the Pampa Gaúcho.

Keywords: Eucalyptus, Acacia, Methane, Nitrous oxide, Afforestation

LISTA DE FIGURAS

MANUSCRITO 1

- Fig. 1. Fluxo de N_2O (a) e de CH_4 (b) em Cambissolo Háplico sob diferentes usos do solo no período de um ano. Vila Nova do Sul, 2012. AM: Acácia; A-s: Acácia com retirada da serrapilheira; AC: Acácia colhida; CN: campo nativo (área de referência). As barras verticais indicam a diferença mínima significativa pelo teste de Tukey ($P<0,05$) entre os tratamentos avaliados dentro da respectiva data de coleta. 28
- Fig. 2. Precipitação pluviométrica (a), temperatura do solo (b), espaço poroso preenchido por água (EPPA) (c), teores de $N-NH_4^+$ (d) e $N-NO_3^-$ (e) em Cambissolo Háplico sob diferentes usos do solo no período de um ano. Vila Nova do Sul, 2012. AM: Acácia; AC: Acácia colhida; CN: campo nativo (área de referência). 29
- Fig. 3. Análise multivariada de Componentes Principais entre o fluxo de gases do solo e as variáveis NH_4^+ , NO_3^- , $NH_4^+ + NO_3^-$, EPPA (espaço poroso preenchido por água), temperatura da câmara (Tcam) e temperatura do solo (Tsolo) em Cambissolo Háplico no período de um ano. Vila Nova do Sul, 2012. AM: Acácia; AC: Acácia colhida; CN: campo nativo (área de referência). 31
- Fig. 4. Aporte de serrapilheira em Cambissolo Háplico no período de um ano. Vila Nova do Sul, 2012. AM: Acácia. 34
- Fig. 5. Emissão acumulada de $N-N_2O$ (a) e $C-CH_4$ (b) em Cambissolo Háplico sob diferentes usos do solo no período de um ano. Vila Nova do Sul, 2012. AM: Acácia; AC: Acácia colhida; CN: campo nativo (área de referência); A, B: teste de Tukey ($P<0,05$); NS: diferença não significativa entre os tratamentos avaliados. 35
- Fig. 6. Teor de COT (a) e teor de NT (b) em Cambissolo Háplico sob diferentes usos do solo. Vila Nova do Sul, 2012. AM: Acácia; AC: Acácia colhida; CN: campo nativo (área de referência). As barras horizontais indicam a diferença mínima significativa pelo teste de Tukey ($P<0,05$) entre os tratamentos avaliados dentro da respectiva camada de solo. NS: diferença não significativa. 39
- Fig. 7. Estoque de COT (a) e NT (b) na profundidade 0 – 100 cm em Cambissolo Háplico sob diferentes usos do solo. Vila Nova do Sul, 2012. AM: Acácia; AC: Acácia colhida; CN: campo nativo (área de referência); NS: diferença não significativa pelo teste de Tukey ($P<0,05$) entre os tratamentos avaliados. 41

MANUSCRITO 2

- Fig. 1. Fluxo de N_2O (a) e de CH_4 (b) em um Argissolo Vermelho-Amarelo nos diferentes usos do solo no período de um ano. Cacequi (2012). E4: eucalipto com 4 anos de cultivo; E4-

s: eucalipto com 4 anos de cultivo com retirada da serrapilheira; E2: eucalipto com 2 anos de cultivo; CN: campo nativo (área de referência); MN: mata nativa. As barras verticais indicam a diferença mínima significativa pelo teste de Tukey ($P < 0,05$) entre os tratamentos avaliados dentro da respectiva data de coleta. 60

Fig. 2. Precipitação pluviométrica (a), temperatura do solo (b), espaço poroso preenchido por água (EPPA) (c), teores de $N-NH_4^+$ (d) e $N-NO_3^-$ (e) em um Argissolo Vermelho-Amarelo nos diferentes usos do solo no período de um ano. Cacequi (2012). E4: eucalipto com 4 anos de cultivo; E2: eucalipto com 2 anos de cultivo; CN: campo nativo (área de referência); MN: mata nativa. 61

Fig. 3. Aporte de serrapilheira em um Argissolo Vermelho-Amarelo nos diferentes usos do solo no período de um ano. Cacequi (2012). E4: eucalipto com 4 anos de cultivo; E2: eucalipto com 2 anos de cultivo; MN: mata nativa. 65

Fig. 4. Emissão acumulada de $N-N_2O$ (a) e $C-CH_4$ (b) em um Argissolo Vermelho-Amarelo nos diferentes usos do solo no período de um ano. Cacequi (2012). E4: eucalipto com 4 anos de cultivo; E2: eucalipto com 2 anos de cultivo; CN: campo nativo (área de referência); MN: mata nativa. A, B: teste de Tukey ($P < 0,05$); NS: diferença não significativa entre os tratamentos avaliados. 67

Fig. 5. Teor de COT (a), teor de COP (b) teor de NT (c) e relação COT:argila (d) no solo em um Argissolo Vermelho-Amarelo nos diferentes usos do solo. Cacequi (2012). E4: eucalipto com 4 anos de cultivo; E2: eucalipto com 2 anos de cultivo; CN: campo nativo (área de referência); MN: mata nativa. As barras horizontais indicam a diferença mínima significativa pelo teste de Tukey ($P < 0,05$) entre os tratamentos avaliados dentro da respectiva camada de solo. NS: diferença não significativa. 70

Fig. 6. Estoque de COT (a) e NT (b) no solo na profundidade 0 – 100 cm em um Argissolo Vermelho-Amarelo nos diferentes usos do solo. Cacequi (2012). E4: eucalipto com 4 anos de cultivo; E2: eucalipto com 2 anos de cultivo; CN: campo nativo (área de referência); MN: mata nativa; A, B, C: teste de Tukey ($P < 0,05$). 72

Fig. 7. Estimativa do Potencial de Aquecimento Global (PAG em $kg\ CE\ ha^{-1}\ ano^{-1}$) parcial em um Argissolo Vermelho-Amarelo nos diferentes usos do solo. Cacequi (2012). E4: eucalipto com 4 anos de cultivo; E2: eucalipto com 2 anos de cultivo; CN: campo nativo (área de referência); MN: mata nativa; A, B: teste de Tukey ($P < 0,05$); NS: diferença não significativa entre os tratamentos avaliados. 74

LISTA DE TABELAS

MANUSCRITO 1

Tabela 1. Teores de argila, silte e areia e densidade aparente do solo em um Cambissolo Háplico sob diferentes usos do solo. Vila Nova do Sul (2012).....	22
Tabela 2. Correlação de Pearson ($P < 0,05$) entre o fluxo de gases do solo e as variáveis NH_4^+ , NO_3^- , EPPA e temperatura do solo em Cambissolo Háplico. Vila Nova do Sul, 2012.	32
Tabela 3. Correlação de Pearson ($P < 0,05$) entre a emissão acumulada dos gases e os estoques de COT e NT em Cambissolo Háplico. Vila Nova do Sul, 2012.	36
Tabela 4. Carbono da matéria orgânica particulada (CMOP), carbono associado à fração mineral (CAM), labilidade (L), índice de labilidade (IL), índice de estoque de carbono (IEC) e índice de manejo do carbono (IMC) em Cambissolo Háplico sob diferentes usos do solo. Vila Nova do Sul, 2012.	42
Tabela 5. Estimativa do Potencial de Aquecimento Global (PAG) em Cambissolo Háplico sob diferentes usos do solo. Vila Nova do Sul, 2012.....	45

MANUSCRITO 2

Tabela 1. Teores de argila, silte e areia e densidade aparente do solo em um Argissolo Vermelho-Amarelo sob diferentes usos do solo. Cacequi (2012).....	55
Tabela 2. Correlação de Pearson ($P < 0,05$) entre o fluxo de gases do solo e as variáveis climáticas ($n= 125$) em um Argissolo Vermelho-Amarelo. Cacequi, 2012.	63
Tabela 3. Correlação de Pearson ($P < 0,05$) entre o fluxo acumulado de gases do solo e os estoques de COT, NT e COP no solo ($n= 5$) em um Argissolo Vermelho-Amarelo. Cacequi, 2012.	69

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABELAS	9
1. INTRODUÇÃO	12
2. HIPÓTESES	14
3. OBJETIVOS	15
4. APRESENTAÇÃO DOS MANUSCRITOS	15
5. MANUSCRITOS	17
5.1 MANUSCRITO 1: FLUXO DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM SOLO DO PAMPA GAÚCHO SOB PLANTIO DE <i>Acacia mearnsii</i> De Wild	17
RESUMO:	17
ABSTRACT:	18
1. Introdução	19
2. Materiais e métodos	21
2.1 Caracterização da região.....	21
2.2 Áreas de estudo.....	21
2.3 Amostragem e análise de ar.....	23
2.4 Amostragem e análise de solo	24
2.5 Amostragens de serrapilheira	25
2.6 Cálculo do Índice de Manejo do Carbono (IMC) e do Potencial de Aquecimento Global (PAG).....	25
2.7 Análise estatística	27
3. Resultados e Discussão	27
3.1 Fluxos de N ₂ O e CH ₄	27
3.2 Emissões acumuladas de N–N ₂ O e C–CH ₄	34
3.3 Carbono orgânico total e nitrogênio total no solo	38
3.4 Índice de manejo de Carbono (IMC).....	42
3.5 Potencial de Aquecimento Global (PAG)	43
4. Conclusões	45
Agradecimentos	46

Referências	46
5.2 MANUSCRITO 2: FLUXO DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM SOLO DO PAMPA GAÚCHO SOB PLANTIO DE <i>Eucalyptus saligna</i>	50
RESUMO:	50
ABSTRACT:	51
1. Introdução	52
2. Materiais e métodos	54
2.1 Local de estudo.....	54
2.2 Amostragem e análise de ar.....	56
2.3 Amostragem e análise de solo	57
2.4 Amostragem de serrapilheira.....	58
2.5 Cálculo do Potencial de Aquecimento Global (PAG) parcial.....	58
2.6 Análise estatística	59
3. Resultados e discussão	59
3.1 Fluxos de N ₂ O e CH ₄	59
3.2 Aporte de serrapilheira	65
3.3 Emissões acumuladas de N-N ₂ O e C-CH ₄	66
3.4 Carbono orgânico total e nitrogênio total no solo	69
3.5 Potencial de Aquecimento Global (PAG) parcial.....	73
4. Conclusões	74
Agradecimentos	75
Referências	75
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS	79
REFERÊNCIAS	81

1. INTRODUÇÃO

O aumento da emissão de gases de efeito estufa (GEE) pode ser considerado um dos maiores problemas que o Planeta enfrenta atualmente (LAL, 2004). A ação antrópica tem contribuído demasiadamente com o aquecimento global, através da queima de combustíveis fósseis em atividades industriais e de transporte, por atividades agrícolas e pela pecuária (IPCC, 2007; MOSIER, 1998). O dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O) são considerados os principais GEE responsáveis pelo aumento antrópico do aquecimento global. No Brasil, o aumento antrópico das emissões destes gases é decorrente principalmente de atividades do setor primário. A mudança de uso do solo é responsável por 77% das emissões de CO₂. As emissões indiretas do solo e de dejetos de animais contribuem com 40% e 28%, respectivamente, das emissões de N₂O. Quanto às emissões de CH₄, a pecuária e a mudança de uso do solo emitem 61% e 17%, respectivamente (BRASIL, 2012).

A economia da metade Sul do Rio Grande do Sul, inicialmente, baseava-se na pecuária extensiva, porém, com o crescimento econômico, áreas de mata ou campo nativo foram substituídas por áreas de pastagens plantadas e agricultura (IBGE, 2007). Na década de 1950, com a finalidade de movimentar a economia do Estado, o governo passa a incentivar o desenvolvimento da agricultura. Entre as décadas de 1960 e 1970 a agricultura atinge seu auge de modernização com a revolução verde. A partir da década de 1980, os incentivos governamentais reduzem e a agricultura começa a desacelerar (REDIN & FIALHO, 2010). Com redução do incentivo governamental para a agricultura, a silvicultura começa a ser inserida no Rio Grande do Sul e como consequência tem-se uma nova transformação do tipo de uso do solo. Na última década vem ocorrendo uma rápida expansão da silvicultura, com a inserção de espécies exóticas, como *Acacia* sp. e *Eucalyptus* sp. A área cultivada com silvicultura no Rio Grande do Sul ultrapassou 600 mil ha (ABRAF, 2011; FOELKEL, 2008), substituindo áreas que antes apresentavam-se sob cultivo agrícola ou vegetação nativa e colocando o RS como o sexto estado em relação à área de floresta plantada do Brasil.

A retirada da vegetação natural para a implantação de outro tipo de uso do solo causa alterações imediatas nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (MOSIER, 1998), modificando os fluxos de GEE até o restabelecimento do novo equilíbrio (MOSIER et al., 1997; MILLAR & BAGGS, 2004). A variação da emissão de GEE relaciona-se com a qualidade do solo, o clima da região (ALLEN et al., 2009) e o tipo de floresta (WERNER et al. 2006 e DALAL et al., 2008). O conteúdo de carbono (C) do solo é um importante

indicador da sua qualidade (VIEIRA et al., 2007). A mudança de uso do solo pode aumentar a atividade da população de microorganismos decompositores existentes na área, modificando o estoque de C e as emissões de gases para a atmosfera, principalmente CO₂, N₂O e CH₄ (DALAL et al., 2008; MOSIER, 1998). Estudos indicam que a retirada da vegetação nativa pode causar a redução da biodiversidade local, do C lábil no solo e da umidade deste pelo maior potencial de evapotranspiração da silvicultura em relação ao campo nativo, além de reduzir a fertilidade do solo pela exportação de nutrientes com a colheita (SANTIN & REIS, 2007; ABRAF, 2008; BLAIR, 2000; SCHUMACHER et al., 2003).

No caso da silvicultura, as espécies interferem de modo diferente no fluxo de GEE entre o solo e a atmosfera, bem como na quantidade de C acumulado (ULLAH et al., 2008). Plantas lenhosas armazenam C em madeira e outros tecidos (FERNANDES et al., 2007). Se estas plantas forem utilizadas em processos industriais, como confecção de móveis, residências e demais produtos derivados da madeira, esse C fixado pode ser mantido por décadas antes de retornar para a atmosfera. A silvicultura pode favorecer o acréscimo de matéria orgânica (MO) no solo em comparação ao cultivo agrícola, pelo aporte de serrapilheira e um ciclo de cultivo mais longo, mas a magnitude desse acúmulo de C é dependente das condições edafoclimáticas e da espécie plantada (LAL, 2004). O cultivo de espécies leguminosas possui grande potencial para o melhoramento da qualidade do solo, contribuindo com a formação da cobertura vegetal, a manutenção produtiva, a reposição de nitrogênio (N) e a incorporação de MO ao solo (SCHUMACHER et al., 2003; VIEIRA et al., 2007). No entanto, o maior estoque de N no solo pode favorecer a ocorrência dos processos de nitrificação e desnitrificação, os quais são responsáveis pela emissão de N₂O para a atmosfera (INAGAKI & ISHIZUKA, 2011; KONDA et al., 2010; MARTENS et al., 2005).

As emissões de CH₄ e N₂O em geral são afetadas pelas características edafoclimáticas locais, principalmente a variação de precipitação, de temperatura e de aeração do solo (DALAL et al., 2008; WESLIEN et al., 2009; KONDA et al., 2010). Estudos indicam que solos florestais podem apresentar condições favoráveis ao influxo de CH₄ (BOECKX et al., 1997; TATE et al., 2007) e a redução na emissão de N₂O em comparação a solos sob cultivo agrícola (ALLEN et al., 2009; WERNER et al., 2006). Em regiões de clima subtropical os processos de nitrificação e desnitrificação podem ser menos intensos, quando o solo apresenta baixos teores de amônio (NH₄⁺) e nitrato (NO₃⁻) no solo (ALLEN et al., 2009; WERNER et al., 2006; MALJANEN et al., 2003). O fluxo de GEE também sofre influência da textura (BOECKX et al., 1997; DALAL et al., 2008), solos argilosos facilitam a retenção de água, nutrientes e MO, porém dificultam a difusão do CH₄ e a sobrevivência da população de

bactérias metanotróficas. Já os solos arenosos possuem aeração favorecida o que beneficia a oxidação de CH₄ (BOECKX et al., 1997).

A inserção da silvicultura pode representar uma alternativa de mitigação dos GEE, porém não se conhece claramente o verdadeiro efeito desta mudança de uso do solo sobre estes fluxos, e sobre como eles se comportam no período pós-plantio até o amadurecimento e colheita. Atualmente, aspectos da dinâmica do CO₂ no solo com inserção de silvicultura são melhor conhecidos, porém pouco se sabe sobre a influência desta mudança de uso nos fluxos de CH₄ e N₂O. O estudo destes aspectos favorecerá as futuras tomadas de decisões sobre a inserção de silvicultura no Rio Grande do Sul. Os resultados poderão ser utilizados em inventários regionais e nacionais sobre os fluxos de GEE e, por serem ajustados regionalmente, poderão ser utilizados para nortear futuros projetos dentro do mercado de créditos de carbono internacional. Os dados utilizados atualmente são valores médios que podem não representar a realidade dos plantios florestais no Estado.

Para este estudo foram escolhidas duas áreas na região Centro Ocidental do Estado do Rio Grande do Sul, sul do Brasil, com cultivo de *Acacia mearnsii* De Wild e *Eucalyptus saligna* em região de clima subtropical. O estudo com cultivo de *A. mearnsii* localiza-se na propriedade Estância Quero-quero, no município de Vila Nova do Sul. Neste local foram analisados quatro tratamentos em locais adjacentes: *A. mearnsii* com seis anos no início do estudo; *A. mearnsii* com retirada manual da serrapilheira antes de cada evento de coleta; *A. mearnsii* colhida trinta dias antes do começo do experimento; e campo nativo utilizado como referência para os demais tratamentos. O estudo com cultivo de *Eucalyptus saligna* foi desenvolvido na propriedade da Empresa Florestal Granflor, no município de Cacequi. Neste local foram analisados cinco tratamentos em locais adjacentes: *E. saligna* (2864) com quatro anos no início do estudo; *E. saligna* (2864) com retirada manual da serrapilheira antes de cada evento de coleta; *E. saligna* (44039) com dois anos no início do estudo; mata nativa; e campo nativo utilizado como referência para os demais tratamentos.

2. HIPÓTESES

A mudança de uso do solo, através da inserção da silvicultura, com espécies de Acácia e Eucalipto, em áreas de vegetação nativa do Pampa Gaúcho altera os estoques de carbono do solo e os fluxos de GEE, promovendo aumento na emissão destes gases do solo se comparado

a áreas de campo nativo ou mata nativa, alterando o potencial de aquecimento global do sistema de produção empregado.

As espécies florestais cultivadas interferem em magnitudes diferentes nos fluxos dos principais GEE e na quantidade de carbono armazenado no solo.

Solos cultivados com Acácia-negra apresentam maior teor de nitrogênio mineral e maior emissão de N₂O para a atmosfera se comparados a áreas de campo nativo devido à característica de fixação de nitrogênio que estas árvores leguminosas apresentam.

A presença de serrapilheira no solo proporciona maior mitigação das emissões de CH₄ e N₂O do que a ausência de serrapilheira.

3. OBJETIVOS

Avaliar a inserção da silvicultura, com *Acacia mearnsii* De Wild e *Eucalyptus saligna*, e os efeitos decorrentes nos fluxos de GEE (CH₄ e N₂O) do solo em áreas de campo nativo no Pampa Gaúcho.

Determinar os fatores de solo que governam os fluxos de GEE em área de campo nativo, mata nativa e silvicultura cultivada com acácia ou eucalipto.

Avaliar o efeito da inserção da silvicultura nos estoques de carbono orgânico total (COT) e de nitrogênio total (NT) e na labilidade do COT do solo, utilizando como parâmetro o índice de manejo do carbono (IMC).

Estimar o potencial de aquecimento global (PAG) nos sistemas de produção com cultivos de silvicultura com *A. mearnsii* e *E. saligna* no Pampa Gaúcho em comparação aos solos sob campo nativo.

4. APRESENTAÇÃO DOS MANUSCRITOS

Este trabalho encontra-se estruturado em dois manuscritos apresentados como se segue:

MANUSCRITO 1: Fluxo de Gases de Efeito Estufa em solo do Pampa Gaúcho sob plantio de *Acacia mearnsii* De Wild.

Este estudo foi realizado na propriedade Estância Quero-quero com o cultivo de *Acacia mearnsii* De Wild, no município de Vila Nova do Sul.

MANUSCRITO 2: Fluxo de Gases de Efeito Estufa em solo do Pampa Gaúcho sob plantio de *Eucalyptus saligna*.

Este estudo foi desenvolvido na propriedade da Empresa Florestal Granflor com cultivo de *Eucalyptus saligna*, no município de Cacequi.

MANUSCRITOS

5.1 MANUSCRITO 1:

FLUXO DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM SOLO DO PAMPA GAÚCHO SOB PLANTIO DE *Acacia mearnsii* De Wild

Autores:

RESUMO: A região do Pampa Gaúcho, sul do Brasil, está passando por mudança no uso do solo, com a expansão da silvicultura em solos com cultivo agrícola ou vegetação nativa. No entanto, pouco se conhece sobre o impacto que esta mudança no uso do solo implica no fluxo dos Gases de Efeito Estufa (GEE) nos solos da região, principalmente metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O), tanto no período de cultivo quanto de pós-colheita. Este estudo teve como objetivo principal avaliar a inserção da silvicultura, com *Acacia mearnsii* De Wild, em áreas de campo nativo no Pampa Gaúcho e os efeitos decorrentes disto em relação aos fluxos de GEE (CH₄ e N₂O) do solo, e determinar os principais fatores de solo que governam os fluxos destes gases. O experimento foi realizado no período de um ano, em um povoamento de acácia com seis anos, avaliando quatro tratamentos: Acácia com serrapilheira (AM), Acácia com retirada manual de serrapilheira (A-s), Acácia recém colhida (AC) e campo nativo (CN) (tratamento de referência). As amostras de ar foram coletadas pelo método de câmaras estáticas e os teores dos gases foram determinados por cromatografia gasosa. Em cada evento de amostragem de ar, foram avaliados a umidade e os teores de nitrogênio mineral do solo, coletada a serrapilheira e monitorada a temperatura do solo (5 cm) e do ar dentro da câmara. O solo sob AM apresentou tendência à oxidação de CH₄ ($-1445 \text{ g C-CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e à baixa emissão de N₂O ($242 \text{ g N-N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), provavelmente em decorrência da baixa precipitação no período avaliado e dos baixos teores de nitrogênio mineral no solo. O solo sob acácia colhida apresentou maiores emissões acumuladas de CH₄ e de N₂O, totalizando $1889 \text{ g C-CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ e $1250 \text{ g N-N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. A colheita da acácia promoveu tendência a maiores teores de nitrogênio mineral do solo, o que favoreceu, por sua vez, o aumento nas taxas de emissão de N₂O. Em relação ao CH₄, as maiores taxas de emissão coincidiram com os períodos de temperatura do solo mais elevada. A inserção da silvicultura em áreas de CN

indicou tendência à redução do carbono do material orgânico particulado (CMOP) na camada superficial (0 – 5 cm), embora o mesmo não tenha sido observado nas camadas subsuperficiais, mantendo o índice de manejo do carbono (IMC) das áreas de silvicultura similar ao do CN. No entanto, a mudança de uso do CN para o florestamento com acácia não alterou significativamente a magnitude dos fluxos de CH₄ e N₂O e tampouco os estoques de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT). Somado a isto, a silvicultura apresentou potencial para mitigação do aquecimento global, principalmente pelo sequestro de carbono via produtos madeireiros, fazendo com que tal mudança no uso do solo seja uma opção efetiva para a mitigação dos GEE em áreas da região do Pampa Gaúcho.

Palavras-chave: Acácia-Negra, Metano, Óxido Nitroso, Silvicultura, Aquecimento Global

ABSTRACT: The region of Pampa of Rio Grande do Sul, southern Brazil, is undergoing change in land use, with the expansion of forestation in soils with agricultural crops or native vegetation. However, little is known about the impact that this change in soil use implies in the soil greenhouse gases (GHG) fluxes of the region, mainly methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O), for both cultivation and post-harvest periods. This study aimed to evaluate the effect of forestation with *Acacia mearnsii* De Wild in areas with native grassland in Pampa Gaúcho on the soil GHG fluxes (CH₄ and N₂O), as well as to determine the main driving factors related to these fluxes. The experiment was accomplished in the period of one year, in a population of Acacia with six years, evaluating four treatments: Acacia with leaf litter (AM), Acacia with leaf litter manual removal (A-l), recently Acacia harvested (AH) and native grassland (NG) (reference treatment). The air samples were sampled by the static chamber method and gas concentrations were evaluated by gas chromatography. In each sampling event, we evaluated the soil moisture and soil mineral nitrogen content, leaf litter deposition rate and we monitored the temperature in the soil (0.05 m) and within the chamber. The soil with AM tended to oxidation of CH₄ ($-1445 \text{ g C-CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) and low emission of N₂O ($242 \text{ g N-N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$), probably due to the low rainfall of evaluated period and low contents of mineral nitrogen in the soil. The soil under Acacia harvested presented larger emissions of CH₄ and N₂O, totality $1889 \text{ g C-CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ and $1250 \text{ g N-N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$. Acacia harvesting promoted trend to higher levels of mineral nitrogen contents, which favored, in turn, the increase in N₂O emission rates. With respect to CH₄, the highest emission rates coincided with the periods of greatest soil temperature. Afforestation of native grassland with Acacia have a tendency to promoted the decrease of particulate organic carbon (POC)

content in the surface layer (0 – 0.05 m), although it has not been observed in the sub-surface layers, keeping the carbon management index (CMI) forestation areas similar to NG. However, the change of use from NG to the afforestation with *Acacia* neither altered significantly the magnitude of CH₄ and N₂O fluxes nor the soil total organic carbon (TOC) and total nitrogen (TN) stocks. Added to this, forestry introduced mitigation potential of global warming, mainly by carbon sequestration via wood products, causing such a change in land use of soil an effective option for mitigating GHG in the region of Pampa Gaúcho.

Keywords: Black wattle, Methane, Nitrous oxide, Afforestation, Global warming

1. Introdução

O solo da região do Pampa riograndense inicialmente tinha como uso predominante a pecuária extensiva, mas próximo a década de 1950 houve a transformação do tipo de uso solo de campo nativo para cultivo de pastagens e agricultura, principalmente arroz e soja. Nas últimas décadas, novas mudanças de uso do solo estão ocorrendo no Sul do Brasil, áreas de campo nativo e agricultura estão sendo transformadas em áreas com silvicultura. Segundo a ABRAF (2011), no Rio Grande do Sul a área cultivada com silvicultura aumentou cerca de 21% nos últimos cinco anos, sendo inseridas espécies exóticas, como *Acacia* sp., devido a importância econômica dos cultivos florestais. Dentre os principais usos da acácia destacam-se a extração de tanino e o uso da madeira para energia e fabricação de celulose e papel (BARICHELO et al., 2005).

A *Acacia mearnsii* De Wild (Acácia-negra) pertencente à família Leguminosae subfamília Mimosoideae ocorre em regiões tropicais e subtropicais, sendo cultivada no Brasil há aproximadamente 80 anos (SCHUMACHER et al., 2003; FOELKEL, 2008). Segundo Foelkel (2008) a área com cultivo de Acácia-negra no Rio Grande do Sul varia entre 220 e 250 mil ha. Essa espécie possui grande potencial para o melhoramento da qualidade do solo, contribuindo com a formação da cobertura vegetal, a manutenção produtiva, a reposição de nitrogênio (N) e a incorporação de matéria orgânica (MO) ao solo (SCHUMACHER et al., 2003). A Acácia-negra fixa aproximadamente 200 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de nitrogênio atmosférico (N₂) (AUER & SILVA, 1992). No entanto o desenvolvimento dessa planta depende das condições edafoclimáticas regionais (CALDEIRA et al., 2001).

A mudança de uso do solo causa alterações imediatas nas propriedades químicas, físicas e biológicas do solo (MOSIER, 1998), modificando os fluxos de Gases de Efeito Estufa (GEE) até o restabelecimento do novo equilíbrio, principalmente dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O) (DALAL et al., 2008; MOSIER et al., 1997). As emissões de CH_4 e N_2O em geral são afetadas pelas características edafoclimáticas locais (DALAL et al., 2008; WESLIEN et al., 2009; KONDA et al., 2010). Estudos indicam que florestas plantadas melhoram as condições físicas, químicas e biológicas do solo, obtendo maior aeração, aumento dos estoques de carbono (C) e N, favorecendo a atividade biológica aeróbica, que é favorável ao influxo de CH_4 (ALLEN et al., 2009; WERNER et al., 2006; BOECKX et al., 1997; TATE et al., 2007).

A utilização de espécies leguminosas, como a acácia, favorece a fixação de N no solo, no entanto, o aumento da quantidade de N favorece a ocorrência dos processos de nitrificação e desnitrificação, os quais são responsáveis pela emissão de N_2O para a atmosfera (INAGAKI & ISHIZUKA, 2011; KONDA et al., 2010). As variações da precipitação e da temperatura do solo influenciam diretamente os fluxos de N_2O , em solos sob silvicultura (KONDA et al., 2010). Solos bem drenados e temperaturas baixas favorecem o influxo desse gás (WERNER et al., 2006; MALJANEN et al., 2003), que em solos sob clima subtropical pode ser favorecido quando o solo apresenta baixos teores de N mineral (ALLEN et al., 2009). No entanto, pouco se conhece sobre a dinâmica dos GEE sob plantios florestais de acácia em solos subtropicais, como os do Pampa Gaúcho, que apresentam baixos teores de N mineral e alta variação anual de temperatura e precipitação.

Embora a silvicultura seja uma atividade antiga no Rio Grande do Sul, sua rápida expansão e o incentivo governamental são recentes. Não se conhece o impacto da mudança de campo nativo para florestas plantadas sobre o fluxo dos GEE no Pampa gaúcho, e sobre seu comportamento no período de cultivo e pós-colheita. Estudos alertam para os impactos relacionados à redução da biodiversidade local, retenção de água nestas culturas, redução do C lábil no solo, exportação de nutrientes com a colheita e aspectos da dinâmica do CO_2 no solo (SANTIN & REIS, 2007; ABRAF, 2008; BLAIR, 2000; SCHUMACHER et al., 2003), porém pouco ou nenhum estudo aponta o efeito desta mudança sobre os fluxos de CH_4 e N_2O desta prática. O entendimento sobre o fluxo de GEE em sistemas de silvicultura pode contribuir na elaboração de projetos para a mitigação do aquecimento global, pois estes podem atuar como drenos, minimizando assim os impactos decorrentes do manejo inadequado do solo.

Os objetivos deste estudo foram: (i) avaliar a inserção da silvicultura e os efeitos decorrentes nos fluxos de CH₄ e N₂O do solo, com *Acacia mearnsii* De Wild, em áreas de campo nativo no Pampa gaúcho; (ii) determinar os fatores de solo que mais interferem nos fluxos de CH₄ e N₂O em área de campo nativo e silvicultura com acácia; (iii) avaliar o efeito da inserção da silvicultura nos estoques de carbono orgânico total (COT) e de nitrogênio total (NT) e na labilidade do COT do solo utilizando como parâmetro o índice de manejo do carbono (IMC); e (iv) estimar o Potencial de Aquecimento Global (PAG) nos sistemas de silvicultura com *A. mearnsii* no Pampa Gaúcho em comparação aos solos sob campo nativo.

2. Materiais e métodos

2.1 Caracterização da região

O estudo foi desenvolvido na propriedade Estância Quero-quero (30°22'37" S, 53°48'16" O, 167 m), no município de Vila Nova do Sul, região Centro Ocidental do Estado do Rio Grande do Sul, sul do Brasil, durante o período de setembro de 2011 a setembro de 2012, em locais com diferentes usos do solo. A região possui clima subtropical com invernos frios e verões quentes, classificado como Cfa de acordo com o sistema de classificação de Köppen. A temperatura alcança máximas de 40°C no verão e mínimas de -3°C no inverno. O município possui regime de chuvas bem distribuídas durante o ano com precipitação média anual de 1500 mm e média mensal próxima a 130 mm. O solo é classificado como Cambissolo Háplico de textura franco arenosa.

2.2 Áreas de estudo

O estudo foi desenvolvido em quatro locais adjacentes, sob diferentes usos do solo, com topografias semelhantes entre si. As áreas escolhidas para o estudo são cultivadas com silvicultura de *A. mearnsii*. As áreas com silvicultura receberam o mesmo procedimento de preparo do solo para o plantio. O solo de campo nativo foi preparado para o plantio com uma passagem de grade aradora, duas passagens de grade niveladora e subsolagem de aproximadamente 40 cm. Essa área recebeu 200 kg ha⁻¹ de fosfato natural reativo (9% P₂O₅ solúvel em água). As mudas foram plantadas com espaçamento 3 por 1,5 m. Um tratamento foi instalado em uma área com silvicultura de *A. mearnsii* com seis anos, no início do estudo (AM). Neste local, também foi analisada uma área adjacente com retirada manual da

serrapilheira 30 minutos antes de cada evento de coleta (A-s), com a finalidade de verificar a influência desta nos fluxos de GEE. O terceiro tratamento foi implantado em sítio lateral adjacente ao da AM e A-s, onde a *A. mearnsii* foi colhida trinta dias antes do começo do experimento (AC), sendo que este local ficou sem cobertura vegetal até o restabelecimento da vegetação nativa em novembro de 2011. Uma área de campo nativo (CN) adjacente ao sítio AC foi utilizada como referência para os demais tratamentos.

Os teores de argila, silte e areia e densidade aparente do solo para os diferentes locais estudados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1

Teores de argila, silte e areia e densidade aparente do solo em um Cambissolo Háplico sob diferentes usos do solo. Vila Nova do Sul (2012).

Atributos do solo	Profundidade (m)	Local		
		Acácia	Acácia colhida	Campo nativo
Argila (g kg ⁻¹)	0,00 – 0,05	97 ± 28 ^a	83 ± 6 ^a	53 ± 8 ^a
	0,05 – 0,10	116 ± 40	90 ± 6	70 ± 12
	0,10 – 0,20	151 ± 10	102 ± 5	91 ± 15
	0,20 – 0,40	245 ± 43	114 ± 6	118 ± 1
	0,40 – 0,60	303 ± 141	309 ± 185	148 ± 51
	0,60 – 0,80	169 ± 68	227 ± 17	165 ± 63
	0,80 – 1,00	101 ± 51	83 ± 66	87 ± 47
Silte (g kg ⁻¹)	0,00 – 0,05	369 ± 33	318 ± 12	338 ± 15
	0,05 – 0,10	321 ± 9	276 ± 23	247 ± 27
	0,10 – 0,20	299 ± 22	252 ± 29	237 ± 10
	0,20 – 0,40	354 ± 60	236 ± 20	223 ± 17
	0,40 – 0,60	413 ± 90	279 ± 49	314 ± 61
	0,60 – 0,80	413 ± 89	386 ± 69	334 ± 75
	0,80 – 1,00	427 ± 205	331 ± 38	278 ± 42
Areia (g kg ⁻¹)	0,00 – 0,05	535 ± 49	599 ± 14	609 ± 8
	0,05 – 0,10	563 ± 36	634 ± 17	683 ± 18
	0,10 – 0,20	550 ± 30	646 ± 25	673 ± 18
	0,20 – 0,40	401 ± 103	650 ± 25	658 ± 15
	0,40 – 0,60	284 ± 92	413 ± 136	538 ± 111
	0,60 – 0,80	418 ± 145	387 ± 78	501 ± 136
	0,80 – 1,00	472 ± 254	586 ± 68	635 ± 50
Densidade do solo (g cm ⁻³)	0,00 – 0,10	1,06 ± 0,13	1,35 ± 0,11	1,36 ± 0,02
	0,10 – 0,20	1,41 ± 0,07	1,49 ± 0,12	1,44 ± 0,06
	0,20 – 0,40	1,41 ± 0,16	1,47 ± 0,08	1,47 ± 0,17
	0,40 – 0,60	1,17 ± 0,01	1,43 ± 0,04	1,26 ± 0,10
	0,60 – 0,80	1,33 ± 0,16	1,44 ± 0,13	1,37 ± 0,26
	0,80 – 1,00	1,45 ± 0,14	1,64 ± 0,07	1,64 ± 0,05

^a Média ± desvio padrão (n = 3)

Os dados pluviométricos locais para determinação da precipitação do período avaliado foram obtidos da Agência Nacional de Águas (ANA) da estação pluviométrica Vila Nova (03053024), distante cerca de 8 km do local de coleta.

2.3 Amostragem e análise de ar

A amostragem de ar para a quantificação de CH₄ e N₂O foi realizada em coletas quinzenais pelo sistema de câmaras estáticas, com três repetições (COSTA et al., 2006) durante o período de um ano. As câmaras foram confeccionadas em PVC, com 25 cm de diâmetro por 25 cm de altura. As bases para colocação das câmaras confeccionadas em aço galvanizado consistem em um anel interno, cravado no solo a 5 cm de profundidade, e uma canaleta interna preenchida com água a fim de vedar as trocas de gases entre o interior e o exterior da câmara, as quais permaneceram no solo durante todo o período estudado. A homogeneização do ar antes da coleta foi realizada por um "cooler" acoplado no interior das câmaras.

As coletas de ar foram realizadas com início às nove horas da manhã, nos tempos 0, 20 e 40 minutos após o fechamento das câmaras. O ar foi coletado com seringas de polipropileno de 20 mL e válvulas de três vias com conexão tipo "Luer Lock", acopladas na parte superior da câmara. O ar coletado foi armazenado em frascos Exetainer[®] de 12 mL (Labco Ltd, High Wycombe, United Kingdom), até a análise. A quantificação dos gases CH₄ e N₂O foi realizada por cromatografia gasosa no laboratório de Biogeoquímica Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS através de cromatógrafo gasoso Shimadzu GC2014 Modelo "Greenhouse". O cromatógrafo possui três colunas de separação funcionando a 70 °C. O gás nitrogênio é utilizado para formar um fluxo de 26 mL min⁻¹, com entrada para análise em conjunto de 1 mL de amostra a temperatura de 250 °C, detector de chama de ionização a 250 °C para o CH₄ e detector de captura eletrônica a 325 °C para detecção de N₂O. Os fluxos de CH₄ e N₂O foram estimados com base na seguinte equação:

$$f = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \frac{PV}{RT} \frac{1}{A} \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde, f é o fluxo de CH₄ ou N₂O ($\mu\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ CH₄ ou N₂O), Q é a quantidade de cada gás na câmara no momento da amostragem ($\mu\text{g CH}_4$ ou N₂O), P é a pressão atmosférica na câmara (1 atm), V é o volume da câmara (L), t é o tempo (h), R é a constante dos gases ideais

(0,08205 atm. L mol⁻¹ K⁻¹), T é a temperatura interna da câmara no instante da amostragem (°K) e A é a área da câmara (m²). A taxa de aumento da concentração de gás no interior da câmara é estimada utilizando o coeficiente angular obtido da relação entre a concentração de gás e o tempo após fechamento da câmara. As emissões diárias de CH₄ e de N₂O, expressos em µg C-CH₄ m⁻² h⁻¹ e µg N-N₂O m⁻² h⁻¹, foram calculados a partir da variação da concentração de CH₄ ou N₂O e a emissão total do período foi calculada integrando as emissões diárias (ZANATTA et al., 2010; GOMES et al., 2009).

As taxas de emissão de CH₄ e N₂O foram obtidas pelo valor médio das três câmaras colocadas em cada área de estudo e a partir deste valor foi calculado o erro padrão da média. Paralelamente às coletas das amostras de gases foi realizado o monitoramento da temperatura do ar no interior das câmaras e do solo (a 5 cm de profundidade) nas áreas de estudo.

2.4 Amostragem e análise de solo

Coletas de solo em camadas superficiais e subsuperficiais foram realizadas na implantação dos experimentos, com amostragem de 0 – 5, 5 – 10, 10 – 20, 20 – 40, 40 – 60, 60 – 80, 80 – 100 cm com três repetições, em cada área de estudo. A densidade do solo foi determinada pelo método dos anéis volumétricos, com o solo seco em estufa a 105 °C até massa constante. O solo para avaliação da textura, análise do estoque e teor de carbono orgânico total (COT), nitrogênio total (NT), carbono de material orgânico particulado (CMOP) e carbono associado à fração mineral (CAM) (amostragem de 0 – 40 cm) foi seco em temperatura ambiente, moído em moinho de martelo e peneirado (peneira de 2 mm, fração terra fina seca ao ar). As amostras de solo para análise de CMOP foram separadas através do método de fracionamento físico granulométrico, seguindo a metodologia descrita por Vieira et al. (2007) e moídas em almofariz de cerâmica com auxílio de pistilo. O solo para determinação do teor de COT foi moído em almofariz de cerâmica com auxílio de pistilo. As análises do teor de COT e de CMOP do solo foram realizadas através de combustão seca com analisador de CO Shimadzu TOC-VCSH, Shimadzu Corp. no laboratório de Biogeoquímica Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. O CAM foi calculado pela diferença entre os estoques de COT e de CMOP.

O teor de NT do solo foi determinado por digestão úmida e destilador de arraste semi-micro Kjeldahl, conforme a metodologia descrita por Tedesco et al. (1995). Os estoques de COT, CMOP e NT foram calculados empregando o método de massa equivalente, utilizando massa de solo sob campo nativo como referência (ELLERT & BETTANY, 1995). A textura

do solo foi determinada pelo método do densímetro após dispersão com NaOH 1M (conforme metodologia da EMBRAPA, 1997 e de TEDESCO et al., 1995) no laboratório da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), Campus São Gabriel.

Amostras de solo para as análises de nitrogênio mineral (amônio (NH_4^+) e nitrato (NO_3^-)), umidade gravimétrica e determinação do espaço poroso preenchido por água (EPPA) foram coletadas quinzenalmente, em cada evento de coleta de gases. O solo foi coletado com auxílio de trado calador retirando-se amostras de 0 – 10 cm de profundidade, em três repetições durante o período de um ano. As amostras coletadas para as análises de nitrogênio mineral (aproximadamente 5 g de solo) foram colocadas em *snap-cap* contendo 40 mL de cloreto de potássio (KCl) 1M. Após agitação, 20 mL do sobrenadante foram analisados no laboratório da UNIPAMPA através de destilador de arraste semi-micro Kjeldahl para separar amostras NH_4^+ e NO_3^- , conforme a metodologia descrita por Tedesco et al. (1995). Para determinação da umidade gravimétrica e do EPPA as amostras coletadas foram secas em estufa a 105°C até massa constante, sendo expressas em base de peso seco, conforme a metodologia de Tedesco et al. (1995). O EPPA foi estimado utilizando os valores de umidade gravimétrica e densidade do solo, assumindo densidade da partícula (D_p) = 2,65 g cm⁻³ (GOMES, 2006).

2.5 Amostras de serrapilheira

As amostras de serrapilheira foram coletadas, quinzenalmente em cada evento de coleta de gases, utilizando cestos com 60 cm de diâmetro por 60 cm de altura. Os cestos foram colocados aleatoriamente, em três repetições, nas linhas e entrelinhas da área de acácia. Os cestos foram fixados ao solo por tripés de 80 cm no início do estudo, permanecendo no local até o término do experimento. As amostras foram secas em estufa a 60 °C até massa constante para estimar a taxa de aporte de serrapilheira.

2.6 Cálculo do Índice de Manejo do Carbono (IMC) e do Potencial de Aquecimento Global (PAG)

O IMC foi obtido através da relação entre os conteúdos de CMOP e CAM, conforme métodos descritos por Blair et al. (1995) e Vieira et al. (2007). Para tanto, assumiu-se os teores de CMOP e CAM como sendo lábeis e não lábeis (VIEIRA et al., 2007), respectivamente. Os cálculos foram realizados com o uso da seguinte fórmula:

$$\text{IMC} = \text{IL} \times \text{IEC} \times 100 \quad (\text{Eq. 2})$$

O IL (índice de labilidade) e o IEC (índice de estoque de carbono) são calculados conforme segue:

$$\text{IEC} = \frac{\text{estoque de COT do tratamento}}{\text{estoque de COT da referência}} \quad (\text{Eq. 3})$$

$$\text{IL} = \frac{\text{L do tratamento}}{\text{L da referência}} \quad (\text{Eq. 4})$$

A L (labilidade) é assim calculada:

$$L = \frac{\text{conteúdo de CMOP}}{\text{conteúdo de CAM}} \quad (\text{Eq. 5})$$

O campo nativo foi utilizado como referência para o cálculo do IMC (IMC = 100) e do PAG.

O PAG é calculado transformando as emissões dos gases N₂O e CH₄ para carbono equivalente (CE), utilizando como referência 298 e 25 kg de CO₂, para cada kg de N₂O e CH₄, respectivamente (IPCC, 2007). Além desses fatores, serão levados em conta para o cálculo do PAG os gastos, estimados em CE, com preparo e cultivo do solo e uso de fertilização nitrogenada, conforme Zanatta et al. (2007) e Lal (2004):

$$\text{CH}_4 \text{ (kg CE - C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}\text{)} = \text{CH}_4 \text{ (kgCH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}\text{)} \times 25 \times \frac{12}{44} \quad (\text{Eq. 6})$$

$$\text{N}_2\text{O (kg CE - C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}\text{)} = \text{N}_2\text{O (kg N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}\text{)} \times 298 \times \frac{12}{44} \quad (\text{Eq. 7})$$

$$\begin{aligned} \text{PAG (kg CE ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}\text{)} = & \Delta \text{ (variação) estoques de COT} \quad (\text{Eq. 8}) \\ & + \Delta \text{ CH}_4 \\ & + \Delta \text{ N}_2\text{O} \\ & + \text{acúmulo C em PM} \\ & + \text{CP} \end{aligned}$$

Para os cálculos de acúmulo anual de C no solo em comparação ao tratamento controle, acúmulo anual de C em produtos madeireiros (PM) e custos energéticos anuais das operações de produção (CP) em CE foram utilizados coeficientes de conversão (LAL 2004; BARICHELLO et al., 2005; SAIDELLES et al., 2009), adotando-se para este estudo o valor médio da massa específica da madeira de acácia ($0,705 \text{ g cm}^{-3}$).

O cálculo dos PM foi realizado com base na produção média da área de acácia colhida ($185 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de madeira + casca). A biomassa da fração madeira foi estimada segundo a porcentagem de distribuição de biomassa determinada por Barichello et al. (2005), 62,34% do total de biomassa vegetal. A conversão da biomassa da fração madeira para kg C ha^{-1} foi realizada conforme estimativas de Saidelles et al. (2009), $421,34 \text{ g C kg}^{-1}$ de madeira seca, para os teores médios de carbono orgânico presentes em cada compartimento da acácia.

A determinação dos CP foi realizada com base nos coeficientes propostos por Lal (2004) para o gasto em CE com fertilização nitrogenada ($0,1 \text{ kg CE kg}^{-1}$) e combustível fóssil consumido em preparo do solo ($30,30 \text{ kg CE ha}^{-1}$), colheita e transporte da madeira ($0,94 \text{ kg CE L}^{-1}$), admitindo-se para este estudo o gasto médio da região, nesta atividade, de 450 L ha^{-1} de diesel.

2.7 Análise estatística

A relação entre fluxos e variáveis foi realizada por análise multivariada PCA (principal components analysis) e correlação de Pearson ($P < 0,05$), e a variabilidade através do desvio padrão da média ($n = 3$). A significância do efeito dos tratamentos foi analisada utilizando análise de variância one-way ANOVA através do software SAS e a comparação entre as médias foi realizada pelo teste de Tukey ao nível de 5%.

3. Resultados e Discussão

3.1 Fluxos de N_2O e CH_4

Os fluxos de N_2O (Fig. 1a) mantiveram-se relativamente baixos em todos os tratamentos no período avaliado, com valor médio de $8,2 \mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Os valores amostrados foram próximos a zero, mas geralmente positivos na maioria das avaliações. Os fluxos baixos de N_2O avaliados nos tratamentos AM e A-s podem ser consequência dos baixos teores de N mineral (Fig. 2d e 2e) e da precipitação próxima a 78 mm, inferior a

normal climatológica da região, 130 mm ao mês (Fig. 2a), que resultou em valores menores de EPPA (Fig. 2c), inferiores a 60% na maioria dos dias avaliados. A reciclagem de nutrientes pode ter favorecido os baixos valores de N mineral no solo. A serrapilheira e os resíduos vegetais são decompostos ou humificados, e os nutrientes que foram mineralizados neste processo podem ser absorvidos pelo sistema radicular das plantas antes da ocorrência dos processos de nitrificação e desnitrificação (SCHUMACHER et al., 2003; UGALDE et al., 2007).

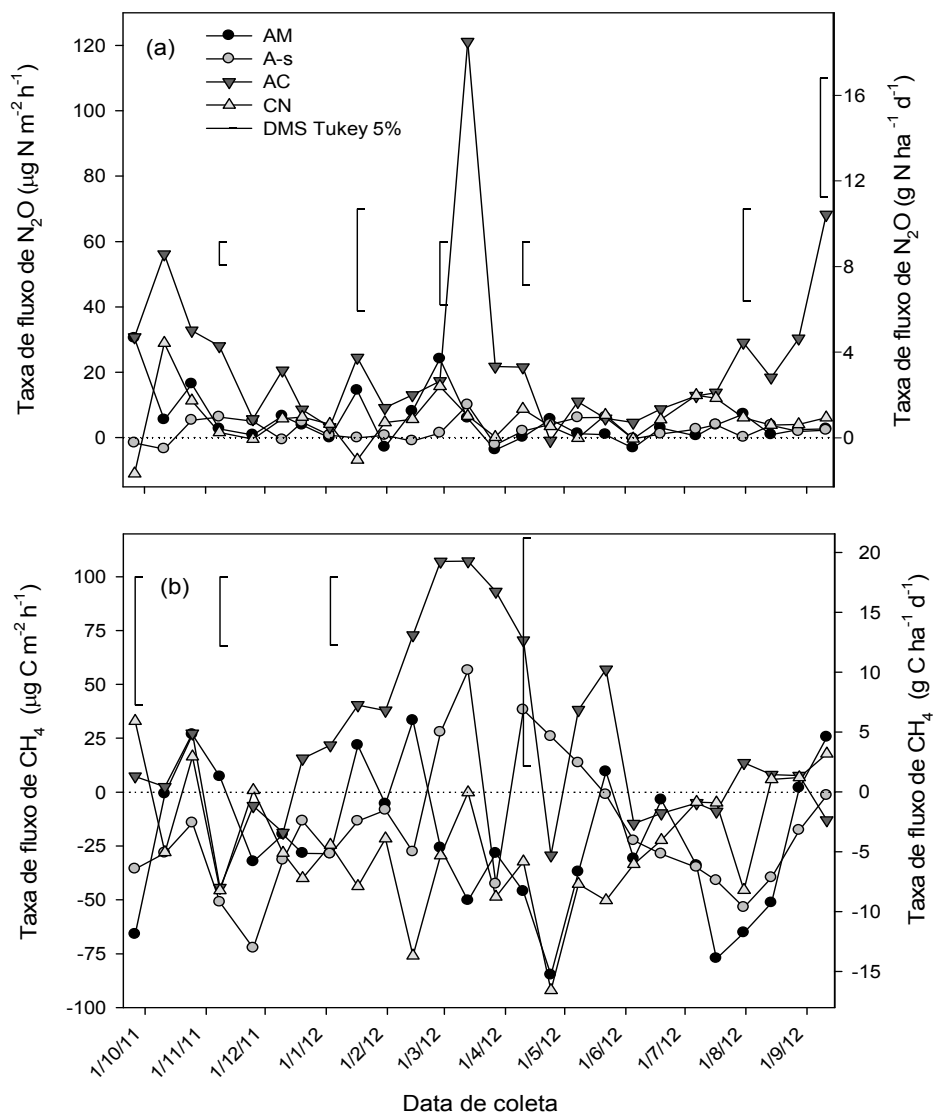


Fig. 1. Fluxo de N_2O (a) e de CH_4 (b) em Cambissolo Háplico sob diferentes usos do solo no período de um ano. Vila Nova do Sul, 2012. AM: Acácia; A-s: Acácia com retirada da serrapilheira; AC: Acácia colhida; CN: campo nativo (área de referência). As barras verticais indicam a diferença mínima significativa pelo teste de Tukey ($P < 0,05$) entre os tratamentos avaliados dentro da respectiva data de coleta.

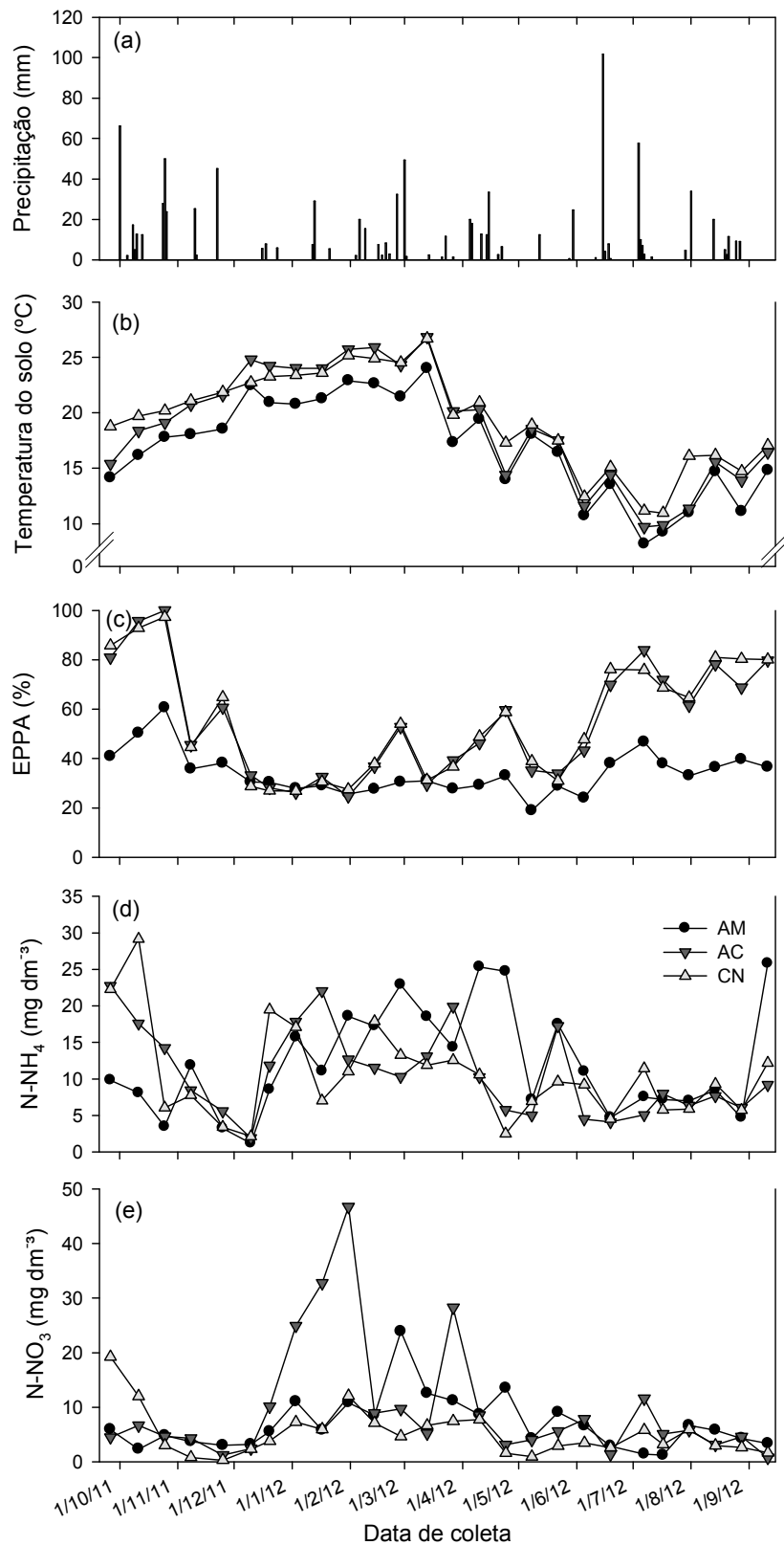


Fig. 2. Precipitação pluviométrica (a), temperatura do solo (b), espaço poroso preenchido por água (EPPA) (c), teores de N-NH₄⁺ (d) e N-NO₃⁻ (e) em Cambissolo Háplico sob diferentes usos do solo no período de um ano. Vila Nova do Sul, 2012. AM: Acácia; AC: Acácia colhida; CN: campo nativo (área de referência).

O tratamento CN obteve fluxo de N_2O (Fig. 1a) baixo, próximo de $5,4 \mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, com uma pequena elevação na emissão no início de outubro de 2011 ($28,9 \mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Essa emissão pode ser resultado do aumento no valor de EPPA, superior a 80% neste período, juntamente com os maiores teores de nitrogênio mineral (NH_4^+ e NO_3^- próximos a 29 e 19 mg dm^{-3} , respectivamente), fatores que favorecem a ocorrência dos processos de nitrificação e desnitrificação. Taxas baixas de N_2O também são observadas em outros estudos florestais no Brasil, na China e na Austrália. Werner et al. (2006) observaram valores próximos a $7,0 \mu\text{g N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ com reflorestamentos em clima tropical, Verchot et al. (2008) com cultivo de acácia na Amazônia e Allen et al. (2009) com eucalipto em solos subtropicais avaliaram fluxos inferiores a $20,0 \mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$.

O tratamento AC apresentou emissão média de N_2O de $23,7 \mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ (Fig. 1a), maior que a registrada nos demais tratamentos. Os maiores registros deste tratamento ocorreram no início do estudo entre os meses de setembro e novembro de 2011 e no final do estudo entre os meses de julho e setembro de 2012. As emissões do começo do experimento se devem provavelmente às mudanças ocorridas no solo com a colheita da acácia, proporcionando maiores teores de NH_4^+ (Fig. 2d) no solo (próximos a $20,0 \text{ mg dm}^{-3}$) coincidindo com o EPPA superior a 80% (Fig. 2c). O solo ficou sem vegetação em desenvolvimento neste período, ficando mais vulnerável às variações climáticas de temperatura e umidade, o que pode ter favorecido o aumento da atividade microbiana no local, resultando na mineralização dos resíduos das árvores cortadas, e subsequente processo de nitrificação, identificado pela redução do teor de NH_4^+ e aumento do teor de NO_3^- (Fig. 2e), que resultou em maior emissão de N_2O . Estudando os processos que ocorrem no solo e as mudanças globais Mosier (1998) verificou que a mudança de uso do solo com retirada da floresta aumenta em torno de 70% a produção de N_2O no solo.

A AC obteve um pico isolado de emissão de $121,2 \mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ na metade de março, que pode ser resultado do processo de desnitrificação, visto que o teor de NO_3^- reduziu de $46,7 \text{ mg dm}^{-3}$ para $5,2 \text{ mg dm}^{-3}$, juntamente com o aumento do valor de EPPA ocasionado por chuvas ocorridas no período (Fig. 2a). Esse conjunto de fatores pode ter proporcionado a formação de microsítios anaeróbios, que favorecem o desenvolvimento de bactérias desnitrificantes. Após esse período o fluxo de N_2O na AC se estabilizou com valores entre $-0,9$ e $21,7 \mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, semelhantes aos demais tratamentos avaliados, com fluxos entre $-11,0$ e $25,0 \mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. A emissão de N_2O na AC voltou a aumentar a partir do final de julho com valores próximos a $68,0 \mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Esse aumento de emissão pode ter ocorrido em consequência do aumento dos valores de EPPA (superior a 60%), que oferece

condições favoráveis à formação de microsítios anaeróbicos podendo ocorrer o processo de desnitrificação. As emissões de N_2O registrados na AC foram geralmente superiores as avaliadas por Allen et al. (2009) com cultivo de eucalipto na Austrália e Verchot et al. (2008) com cultivo de acácia no Brasil, consequência provavelmente da colheita da acácia neste estudo.

A análise multivariada de Componentes Principais (Fig. 3) demonstrou que os dois eixos de ordenação representaram 100% da variabilidade dos fatores utilizados na análise do presente estudo. O componente principal 2 (CP2) apresentou maior relação com as emissões de N_2O e CH_4 e com os teores de NO_3^- do solo. Este resultado sugere que o maior teor de NO_3^- , dentre os fatores avaliados, foi o principal para a ocorrência de maior emissão de gases na AC. O corte da acácia favoreceu o aumento do teor de NO_3^- , que sem vegetação para absorvê-lo, acumulou-se no solo favorecendo a emissão de N_2O por desnitrificação em sítios anaeróbicos. Os fluxos de N_2O apresentaram correlação com o EPPA ($P = 0,001$; Tabela 2), sugerindo que o processo de desnitrificação pode ter sido um dos principais responsável pela emissão deste gás no tratamento AC (KONDA et al., 2010), visto que esse processo ocorre quando o solo apresenta EPPA próximo a 80%.

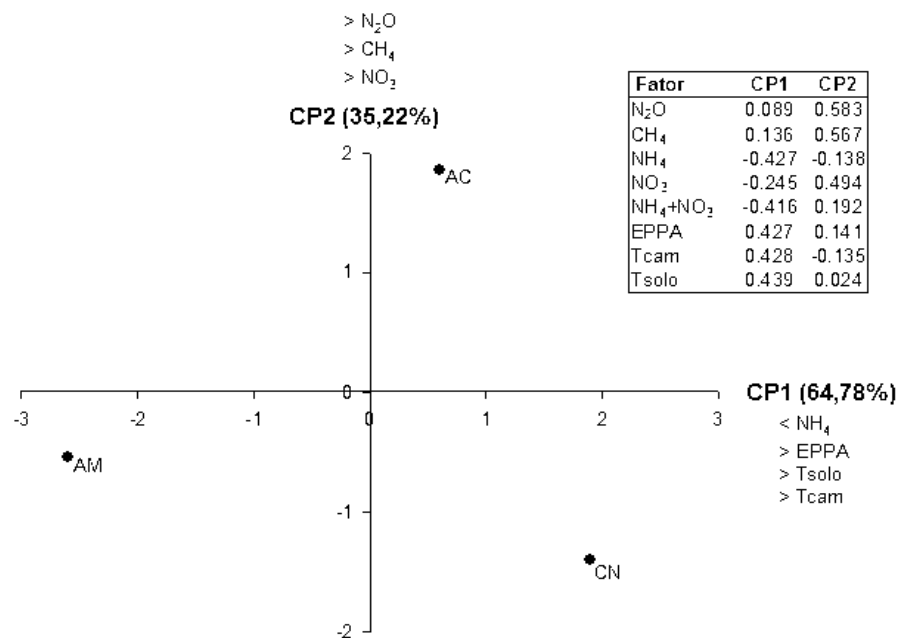


Fig. 3. Análise multivariada de Componentes Principais entre o fluxo de gases do solo e as variáveis NH_4^+ , NO_3^- , $NH_4^+ + NO_3^-$, EPPA (espaço poroso preenchido por água), temperatura da câmara (T_{cam}) e temperatura do solo (T_{solo}) em Cambissolo Háplico no período de um ano. Vila Nova do Sul, 2012. AM: Acácia; AC: Acácia colhida; CN: campo nativo (área de referência).

Tabela 2

Correlação de Pearson ($P < 0,05$) entre o fluxo de gases do solo e as variáveis NH_4^+ , NO_3^- , EPPA e temperatura do solo em Cambissolo Háplico. Vila Nova do Sul, 2012.

Fluxo de gases		NH_4^+	NO_3^-	EPPA ¹	Temperatura do solo
N_2O	r	0,034	-0,02	0,315	0,102
	P	0,735	0,840	0,001	0,304
CH_4	r	0,123	0,261	0,105	0,301
	P	0,212	0,007	0,290	0,002

¹ Espaço poroso preenchido por água.

Os fluxos de CH_4 (Fig. 1b) neste estudo variaram entre $-92,0 \mu\text{g C-CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ e $107,2 \mu\text{g C-CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, apresentando correlação com os teores de NO_3^- ($P = 0,007$) e com as medidas de temperatura do solo ($P = 0,002$) (Fig. 2b). Os tratamentos AM, A-s, e CN apresentaram fluxo negativo de CH_4 para a maioria dos dias avaliados com médias de $-22,7$, $-17,2$ e $-24,4 \mu\text{g C-CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, respectivamente. Esses resultados são esperados devido ao baixo EPPA (valores próximos a 40%) no período avaliado, condições que favorecem a oxidação do CH_4 (KHALIL & BAGGS, 2005; MOSIER, 1998). A análise multivariada de Componentes Principais (Fig. 3), por sua vez, sugere através do eixo do componente principal 1 (PC1) que o solo sob AM tendeu a apresentar maior teor de NH_4^+ , mas provavelmente este maior teor não atingiu níveis críticos que possibilitassem a inibição da oxidação de CH_4 , visto que o solo sob AM apresentou emissão de gases quase tão baixo quanto o sob CN. Essa análise também evidenciou que o solo sob CN fica mais exposto às variações de temperatura e ao menor EPPA do que a área de acácia.

A AC, embora, apresente EPPA semelhante ao CN, o fato do solo ficar sem biomassa viva com a colheita da acácia permitiu que outros fatores que favorecem a emissão do CH_4 , como temperaturas mais altas no solo, favorecessem o desenvolvimento de bactérias metanogênicas. Os fluxos baixos de CH_4 obtidos neste estudo são esperados em cultivo florestal com baixa precipitação, visto que a oxidação do CH_4 é favorecida em solos com baixa umidade e boa aeração. Allen et al. (2009) e Dalal et al. (2008) com cultivo de eucalipto

e pinus na Austrália e Verchot et al. (2008) com acácia na Amazônia mediram fluxo de CH₄ semelhantes às deste estudo, com variação entre -5,7 e -48,0 μg C-CH₄ m⁻² h⁻¹.

O tratamento AC apresentou emissão líquida de CH₄ para a maioria dos dias avaliados, com valores maiores entre fevereiro e abril de 2012, período em que a precipitação aumentou na região. Essas emissões podem ter ocorrido, também, em consequência do aumento dos teores de NH₄⁺ no solo, indicando a competição do NH₄⁺ com o CH₄ e das temperaturas mais altas registradas no período. Estudos realizados por Konda et al. (2010) e Baggs & Blum (2004) indicam que o aumento do teor de NH₄⁺ pode inibir a oxidação do CH₄ devido à competição do NH₄⁺ com o CH₄ pela enzima monooxigenase, pois o processo de oxidação do CH₄ está fortemente relacionado com os processos ocorridos durante o ciclo do N no solo (BOECKX et al., 1997; MOSIER et al., 1997). Quanto à variação da temperatura, estudos indicam que aumentos na temperatura do solo associados à maior precipitação favorecem a emissão do CH₄ devido ao aumento da atividade microbiana no solo (KONDA et al., 2010; DALAL et al., 2008; DUNFIELD & KNOWLES, 1995).

Os fluxos de N₂O e CH₄ avaliados neste estudo não foram alterados significativamente pela retirada da serrapilheira, sugerindo que a ação dos microorganismos presentes na serrapilheira sobre os fluxos de N₂O e CH₄ foi imperceptível em relação aos fluxos do solo. A taxa de aporte de serrapilheira (Fig. 4) foi maior durante o período de outubro de 2011 a janeiro de 2012, período de florescimento e formação das vagens da acácia. O fluxo de N₂O na AM apresentou valores maiores no início do estudo, coincidindo com o período de maior taxa de aporte de serrapilheira. O fluxo de N₂O na A-s foi levemente inferior ao da AM no período avaliado. Estes resultados indicam que os resíduos vegetais adicionados ao solo pela acácia, por aumentarem o aporte anual de N via fixação simbiótica ao sistema solo-planta, podem elevar os teores de N mineral no solo, favorecendo a emissão de N₂O (MARTENS et al., 2005). Quanto ao fluxo de CH₄, o tratamento A-s indicou tendência em emitir mais CH₄ que a AM no período de final de fevereiro até o começo de maio de 2012, período em que o solo apresentou temperaturas mais elevadas, enquanto nas demais épocas do ano os tratamentos indicaram valores semelhantes entre si. O solo descoberto no tratamento A-s pode ter ficado mais vulnerável às variações ambientais de temperatura, indicando tendência em aumento da atividade microbiana no local, resultando no acréscimo da emissão de CH₄ entre fevereiro e maio de 2012 (DALAL et al., 2008; DUNFIELD & KNOWLES, 1995).

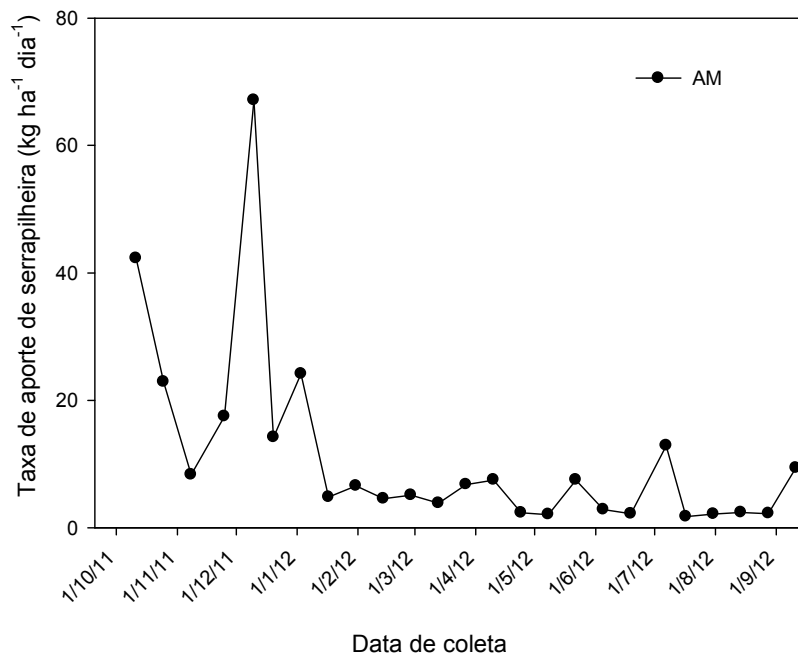


Fig. 4. Aporte de sarrapilheira em Cambissolo Háplico no período de um ano. Vila Nova do Sul, 2012. AM: Acácia.

3.2 Emissões acumuladas de N–N₂O e C–CH₄

A emissão acumulada de N–N₂O (Fig. 5a) variou de 242 g N–N₂O ha⁻¹ ano⁻¹ na AM para 1250 g N–N₂O ha⁻¹ ano⁻¹ na AC. A AM, nas condições do presente estudo, apresentou baixa emissão de N–N₂O em kg CE-C ha⁻¹ ano⁻¹, emissão inferior a 35 kg CE-C ha⁻¹ ano⁻¹. Os tratamentos AM e CN não apresentaram diferença significativa na emissão acumulada de N–N₂O, com emissão de 242 e 316 g N–N₂O ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente. A emissão acumulada de N–N₂O no tratamento AM, inferior aos demais tratamentos, pode ser explicada pelo baixo EPPA registrado no período (inferior a 40%, na maioria dos dias avaliados), relação demonstrada no estudo de Khalil & Baggs (2005). As emissões de N–N₂O medidas neste estudo foram resultado dos processos de nitrificação e desnitrificação, destacando-se o processo de nitrificação evidenciado pelos valores mais elevados dos teores de NH₄⁺ somado aos períodos de solo seco e consequente emissão de N–N₂O observada.

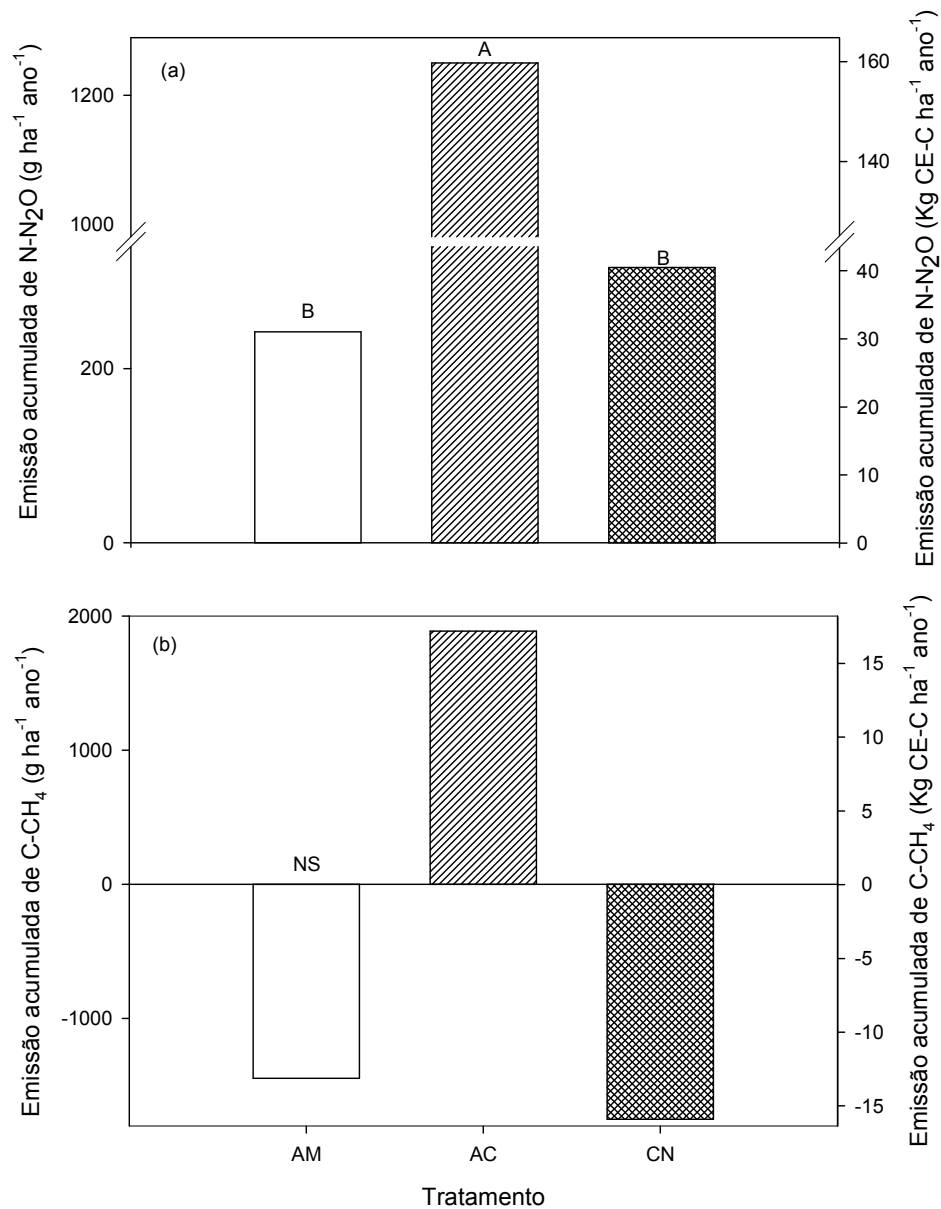


Fig. 5. Emissão acumulada de N-N₂O (a) e C-CH₄ (b) em Cambissolo Háplico sob diferentes usos do solo no período de um ano. Vila Nova do Sul, 2012. AM: Acácia; AC: Acácia colhida; CN: campo nativo (área de referência); A, B: teste de Tukey ($P < 0,05$); NS: diferença não significativa entre os tratamentos avaliados.

O tratamento AC apresentou maior emissão de N-N₂O (1250 g N-N₂O ha⁻¹ ano⁻¹), resultado que comprova a importância da cobertura vegetal no solo para garantir sua estabilidade (BAYER et al., 2005; DIEKOW et al., 2005) e uma ciclagem de N mais eficiente no sistema solo-planta, o que pode reduzir a emissão de N-N₂O. O corte da acácia pode ter contribuído para o aumento da decomposição dos resíduos no solo e a falta de cobertura vegetal possibilitou que o N mineral produzido por parte dos resíduos mineralizados não fosse

reciclado no solo, permitindo a ocorrência dos processos de nitrificação e desnitrificação responsáveis pela emissão deste gás. Os valores obtidos neste estudo foram inferiores aos obtidos por Verchot et al. (2008), $2000 \text{ g ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ na Amazônia com cultivo de acácia. A maior emissão registrada por Verchot et al. (2008) pode ser consequência do clima mais úmido na região Amazônica, caracterizada com precipitação anual maior que a da região do Pampa Gaúcho.

As emissões acumuladas de $\text{N-N}_2\text{O}$ (Fig. 5a) apresentaram correlação negativa com os estoques de COT nas camadas subsuperficiais (0 – 40 cm, $P < 0,001$ e 0 – 100 cm, $P = 0,032$; Tabela 3), no entanto os fatores que proporcionaram esta correlação não são totalmente esclarecidos com as análises realizadas neste estudo. Não foi encontrada correlação significativa com o estoque de COT nas camadas superficiais do solo, em contraste aos estudos de Weslien et al. (2009), que obteve correlação com o COT nas camadas superficiais. Embora a camada superficial seja a mais ativa biologicamente, este resultado em área florestal questiona a forma como o monitoramento dos parâmetros de solo vem sendo tradicionalmente realizado nos estudos de fluxos de GEE no solo. A maioria dos estudos monitora apenas EPPA, teor de N mineral, umidade e temperatura do solo nas camadas 0 – 5 ou 0 – 10 cm (WERNER et al., 2006), o monitoramento destas variáveis em camadas subsuperficiais próxima aos 40 cm pode auxiliar na compreensão das variações ocorridas nos fluxos de GEE no solo. A emissão de $\text{N-N}_2\text{O}$ não se correlacionou significativamente com os estoques de NT em nenhuma das camadas consideradas.

Tabela 3

Correlação de Pearson ($P < 0,05$) entre a emissão acumulada dos gases e os estoques de COT e NT em Cambissolo Háplico. Vila Nova do Sul, 2012.

GEE	COT ¹ (0 – 5)	COT (0 – 10)	COT (0 – 20)	COT (0 – 40)	Estoque COT	NT ² (0 – 5)	NT (0 – 10)	NT (0 – 20)	NT (0 – 40)	
N_2O	r	0,249	0,093	-0,421	-0,892	-0,618	0,118	-0,058	-0,131	-0,461
	P	0,435	0,774	0,173	<0,001	0,032	0,715	0,858	0,684	0,132
CH_4	r	-0,240	-0,441	-0,616	-0,685	-0,459	-0,166	-0,251	-0,526	-0,681
	P	0,452	0,151	0,033	0,014	0,133	0,606	0,431	0,079	0,015

¹ Carbono orgânico total.

² Nitrogênio total.

O fluxo acumulado de C-CH₄ (Fig. 5b) não apresentou diferença significativa entre os tratamentos avaliados. O fluxo acumulado de C-CH₄ da acácia, embora baixo, indica seu potencial para a mitigação das emissões de CH₄ em kg CE-C ha⁻¹ ano⁻¹, com valor de -13 kg CE-C ha⁻¹ ano⁻¹. Os tratamentos AM e CN apresentaram oxidação de C-CH₄ com valores variando de -1446 g C-CH₄ ha⁻¹ ano⁻¹ na AM e -1752 g C-CH₄ ha⁻¹ ano⁻¹ no CN. Estes resultados são consequência da baixa precipitação do período analisado, inferior a média registrada na região em anos anteriores, resultando em um baixo EPPA (KONDA et al., 2010; KHALIL & BAGGS, 2005), inferior a 60% para a maioria dos dias avaliados. Em adição, as temperaturas mais elevadas do solo provavelmente favoreceram o desenvolvimento de bactérias metanotróficas, aumentando a oxidação de C-CH₄ (DALAL et al., 2008; CASTRO et al., 1994; BORKEN et al., 2005). A oxidação de C-CH₄ na AM e no CN medida neste estudo foi maior que os valores obtidos por Weslien et al. (2009) em solos florestais da Suécia (-700 g C-CH₄ ha⁻¹ ano⁻¹). A oxidação inferior nos estudos de Weslien et al. (2009) pode estar relacionada com maior precipitação registrada em seus estudos em comparação à registrada neste estudo. O fluxo acumulado de CH₄ apresentou correlação negativa com os estoques de COT $P = 0,033$ e $P = 0,014$ nas camadas 0 – 20 cm e 0 – 40 cm, respectivamente; Tabela 3) e NT ($P = 0,015$ na camada 0 – 40 cm; Tabela 3).

O tratamento AC obteve emissão de C-CH₄ acumulando 1889 g C-CH₄ ha⁻¹ ano⁻¹. Essa emissão de C-CH₄ se deve principalmente às transformações que ocorreram no solo com o corte da acácia. O solo descoberto fica mais exposto às variações de temperatura e umidade (DALAL et al., 2008), podendo aumentar a atividade de bactérias metanogênicas favorecendo a emissão de C-CH₄ em relação aos demais tratamentos. A competição do NH₄⁺ com o CH₄ pela enzima monooxigenase foi outro fator que pode ter contribuído para a emissão acumulada de CH₄ no tratamento AC, observada com o período de teores mais altos de NH₄⁺ coincidindo com maiores emissões de C-CH₄ (BOECKX et al., 1997; MOSIER et al., 1997). A emissão acumulada de C-CH₄ no tratamento AC foi inferior aos medidos em cultivo de acácia na Amazônia, valores entre 2500 e 4000 g C-CH₄ ha⁻¹ ano⁻¹ (VERCHOT et al., 2008). Comparando estes estudos, percebemos que as variações climáticas regionais, como a maior precipitação na Amazônia, podem interferir mais na emissão de C-CH₄ do que a alteração ocasionada no solo pela colheita da acácia.

3.3 Carbono orgânico total e nitrogênio total no solo

Os teores de COT e NT (Fig. 6a e 6b) do solo foram semelhantes entre os tratamentos avaliados. Os teores de COT variaram entre 31,7 g kg⁻¹solo na AM e 38,2 g kg⁻¹solo no CN e os de NT estiveram entre 3,3 g kg⁻¹solo na AM e 4,1 g kg⁻¹solo no CN, na camada superficial. Apenas na camada 20 – 40 cm os teores de COT e NT apresentaram diferença significativa entre os tratamentos. Estes teores diminuíram significativamente nas camadas mais profundas em todos os tratamentos, chegando próximo a 2,5 g kg⁻¹solo para o COT e 0,3 g kg⁻¹solo para o NT na camada 80 – 100 cm. O CN indicou valores levemente superiores aos demais tratamentos na camada superficial (38,2 g kg⁻¹solo de COT e 4,1 g kg⁻¹solo de NT na camada 0 – 5 cm). Esse resultado pode ser consequência da cobertura vegetal variada somada a estabilidade do sistema solo-planta na área de CN, que favorece o aporte de resíduos vegetais no solo aumentando os teores de COT e NT. Nas camadas inferiores estes resultados não são percebidos, provavelmente devido ao sistema radicular da vegetação de CN alcançar pouca profundidade (GATTO et al., 2010).

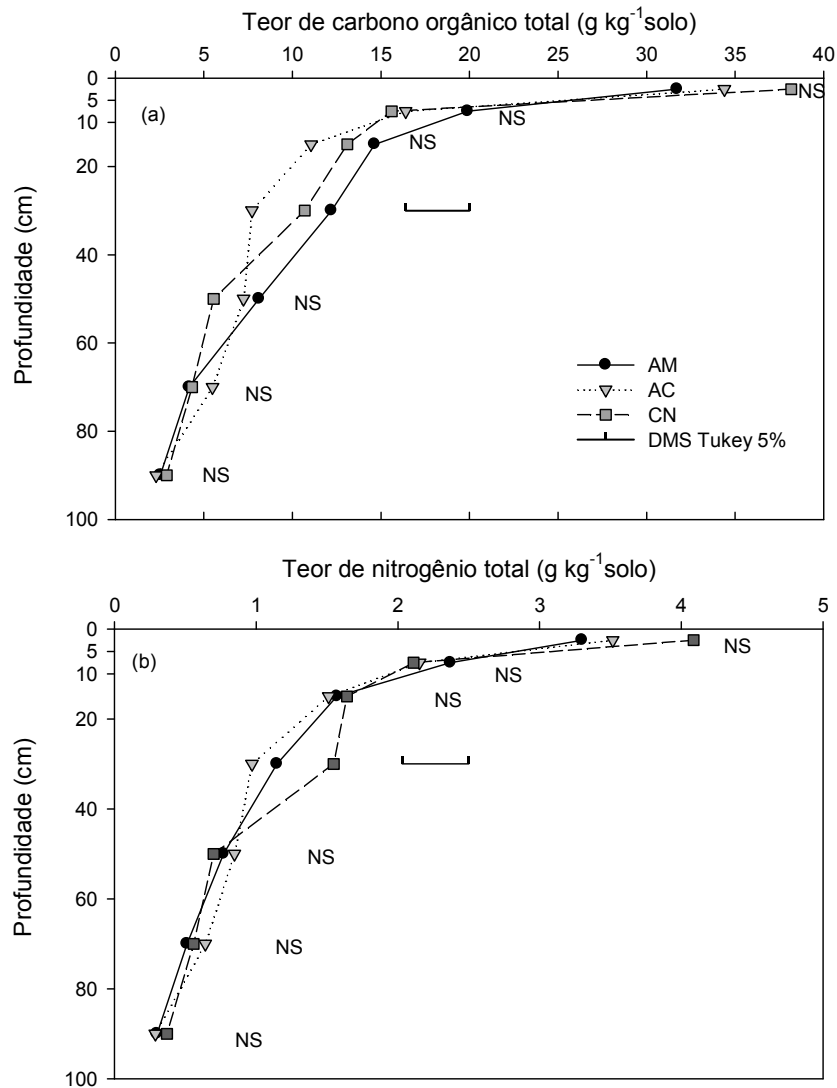


Fig. 6. Teor de COT (a) e teor de NT (b) em Cambissolo Háplico sob diferentes usos do solo. Vila Nova do Sul, 2012. AM: Acácia; AC: Acácia colhida; CN: campo nativo (área de referência). As barras horizontais indicam a diferença mínima significativa pelo teste de Tukey ($P < 0,05$) entre os tratamentos avaliados dentro da respectiva camada de solo. NS: diferença não significativa.

O tratamento AM indicou tendência à menores teores de COT e NT na camada superficial ($31,7 \text{ g kg}^{-1}$ solo de COT e $3,3 \text{ g kg}^{-1}$ solo de NT na camada 0 – 5 cm). Porém, o tratamento AM indicou redução mais suave no teor de COT que os demais tratamentos nas camadas subsuperficiais a partir dos 10 cm (valores entre $14,6$ e $2,5 \text{ g kg}^{-1}$ solo). Esse teor de COT nas camadas mais profundas pode ser consequência do sistema radicular mais desenvolvido na acácia, que alcança maiores profundidades no solo podendo contribuir para a

manutenção do conteúdo de COT (GATTO et al., 2010). Esse resultado indica que a silvicultura com acácia cultivada a 6 anos não causou prejuízos ao solo em relação à vegetação nativa. Os teores de COT medidos neste estudo são superiores aos avaliados por Caldeira et al. (2003) com cultivo de *A. mearnsii* no Rio Grande do Sul, valores entre 10,0 e 5,1 g kg⁻¹soil. Essa variação nos teores de COT entre os estudos pode ser consequência das condições edafoclimáticas regionais, indicando que nas condições do presente estudo a inserção de silvicultura com acácia pode favorecer a manutenção dos teores de COT no solo, principalmente em camadas subsuperficiais.

O estoque de COT (Fig. 7a) do solo não apresentou diferença significativa, com valores muito próximos entre os tratamentos. A AM apresentou tendência em maior estoque de COT (132,3 Mg ha⁻¹) em relação aos demais tratamentos, resultado provavelmente do maior aporte de serrapilheira proporcionada pela acácia (LAL, 2004; GATTO et al., 2010). A textura levemente mais argilosa nas camadas superficiais no solo da AM foi outro fator que pode ter favorecido a tendência de maior estoque de COT na AM em relação aos demais tratamentos (LIMA et al., 2008). A AC apresentou tendência em menor estoque de COT (114,0 Mg ha⁻¹), provavelmente em consequência de características particulares de solo, que proporcionaram esse menor conteúdo de COT no solo deste tratamento. Os estoques de COT registrados neste estudo foram maiores que os obtidos por Lima et al. (2008) com cultivo de eucalipto em Virginópolis (70,0 Mg ha⁻¹) e Caldeira et al. (2003) com cultivo de *A. mearnsii* no Rio Grande do Sul (101,4 Mg ha⁻¹), mas inferiores ao obtido por Gatto et al. (2010) com cultivo de eucalipto em Cambissolo Háplico (168,4 Mg ha⁻¹). Essa variação nos estoques de COT entre os estudos mencionados indica que as condições edafoclimáticas regionais podem interferir mais na adição de C ao solo do que a variedade florestal cultivada. No entanto, os estoques de COT registrados neste estudo indicam que a inserção de silvicultura com acácia na região do Pampa Gaúcho, nas condições deste estudo, pode favorecer a manutenção do COT no solo.

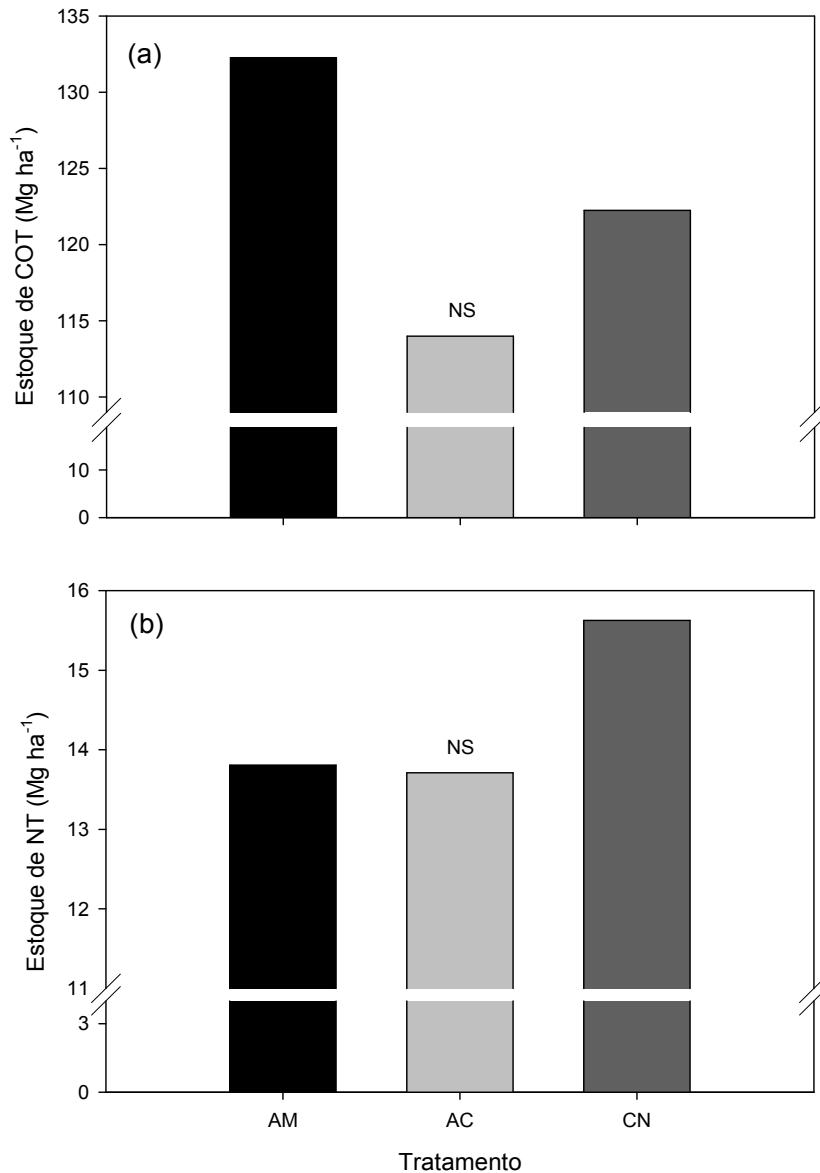


Fig. 7. Estoque de COT (a) e NT (b) na profundidade 0 – 100 cm em Cambissolo Háplico sob diferentes usos do solo. Vila Nova do Sul, 2012. AM: Acácia; AC: Acácia colhida; CN: campo nativo (área de referência); NS: diferença não significativa pelo teste de Tukey ($P < 0,05$) entre os tratamentos avaliados.

Os estoques de NT (Fig. 7b) no solo foram estatisticamente semelhantes entre os tratamentos estudados. O tratamento CN obteve tendência a maior estoque de NT no solo, 15,6 Mg ha⁻¹, resultado provavelmente da vegetação nativa variada na área de CN com espécies de leguminosas, resultando em maior fixação de NT no solo. As áreas de AM e AC tiveram estoques de NT semelhantes, com valores de 13,8 Mg ha⁻¹ e 13,7 Mg ha⁻¹, respectivamente. Os valores obtidos neste estudo indicam o potencial de melhoramento do solo ocasionado com o cultivo de acácia em comparação com outros usos do solo e a

importância do cultivo de plantas leguminosas para a adição de COT e NT ao solo. Visto que, os estoques de NT medidos neste estudo foram semelhantes aos obtidos em vegetação nativa por Sisti et al. (2004) no sul do Brasil (14,2 Mg ha⁻¹) e superiores aos registrados por Bayer et al. (2005) no sul do Brasil e Jantalia et al. (2006) no Cerrado brasileiro, valores entre 1,6 e 10,0 Mg ha⁻¹.

3.4 Índice de manejo de Carbono (IMC)

A inserção da silvicultura em áreas de CN, neste estudo, apresentou tendência em reduzir o CMOP na camada superficial (Tabela 4). Essa redução no CMOP pode ser consequência da mudança de uso do solo, causando aumento da atividade microbiana no solo e consequente aceleração na decomposição dos resíduos orgânicos, principalmente da fração lábil (BLAIR, 2000; DIEKOW et al., 2005). No entanto, o CAM não apresentou diferença significativa entre os tratamentos, indicando que a inserção da silvicultura não causou alterações severas no solo em relação à vegetação nativa.

Tabela 4

Carbono da matéria orgânica particulada (CMOP), carbono associado à fração mineral (CAM), labilidade (L), índice de labilidade (IL), índice de estoque de carbono (IEC) e índice de manejo do carbono (IMC) em Cambissolo Háplico sob diferentes usos do solo. Vila Nova do Sul, 2012.

Tratamento	Profundidade	CMOP g kg ⁻¹ solo	CAM g kg ⁻¹ solo	L	IL	IEC	IMC
CN	0 – 5	15,36 ^{NS}	22,81 ^{NS}	0,68	1,00	1,00	100
	5 – 10	2,18	13,42	0,11	1,00	1,00	100
	10 – 20	1,35	11,75	0,11	1,00	1,00	100
	20 – 40	0,81	9,89	0,08	1,00	1,00	100
Média	0 – 40	2,93	12,41	0,17	1,00	1,00	100
AM	0 – 5	9,54	22,18	0,42	0,63	0,83	52,03
	5 – 10	2,79	17,11	0,16	1,50	1,28	191,29
	10 – 20	1,39	13,26	0,10	0,92	1,12	103,31
	20 – 40	0,67	11,53	0,06	0,74	1,14	84,40
Média	0 – 40	2,23	13,99	0,13	0,87	1,11	98,44
AC	0 – 5	9,12	25,27	0,41	0,61	0,90	54,64
	5 – 10	2,25	14,14	0,16	1,47	1,05	154,73
	10 – 20	1,15	9,91	0,12	1,03	0,84	87,12
	20 – 40	0,63	7,08	0,09	1,11	0,72	80,41
Média	0 – 40	2,03	10,94	0,14	1,08	0,82	88,15

NS: Tukey ($P < 0,05$). AM: Acácia; AC: Acácia colhida; CN: Campo nativo (referência).

Os tratamentos AM e AC obtiveram IMC 52,03 e 54,64 na camada superficial (0 – 5 cm), respectivamente. Esses IMC foram inferiores ao do CN, indicando que o solo apresenta efeito da mudança de uso do solo, percebido na redução do índice de labilidade destes tratamentos, causada provavelmente pela retirada da vegetação nativa para a implantação da silvicultura (BLAIR, 2000; DIEKOW et al., 2005; BLAIR et al., 1995). O sistema radicular mais volumoso na camada superficial do CN em relação a acácia é outro fator que pode ter contribuído para o aumento do C nesta camada, contribuindo para o maior IMC neste tratamento. O IMC da AM foi superior ao do CN nas camadas subsuperficiais, 191,29 e 103,31, nas camadas 5 – 10 e 10 – 20 cm respectivamente. O IMC superior a 100 obtido na AM indica que o solo apresenta sinais de recuperação das alterações geradas pela mudança de uso do solo com a implantação da silvicultura, sugerindo que nas condições do presente estudo, a silvicultura com acácia pode favorecer a adição de COT ao solo, percebida nos maiores valores de IEC, e conseqüente manutenção do IMC similar ao do CN.

A acácia apresenta potencial para melhoramento do solo, principalmente pela adição de N ao solo se comparada a outros usos do solo (SCHUMACHER et al., 2003; FOELKEL, 2008). A agricultura no sul do Brasil, para manter no solo as condições iniciais e obter valores semelhantes aos obtidos pela acácia neste estudo, necessita de manejo que inclua rotação de cultura com leguminosas e adubação nitrogenada. Campos et al. (2011) mediram resultados semelhantes ao deste estudo com agricultura no sul do Brasil, IMC entre 130 a 158. O tratamento AC obteve IMC 154,73 na camada 5 – 10 cm, mas nas demais camadas seu IMC foi inferior a 100 (variando de 54,6 a 87,0). Estes resultados indicam que a colheita da acácia, deixando o solo descoberto, pode ter causado alterações imediatas no conteúdo de C do solo, reduzindo seu conteúdo pelo aumento da atividade microbiana no solo, resultados obtidos também por Diekow et al. (2005) analisando solos descobertos em clima subtropical.

3.5 Potencial de Aquecimento Global (PAG)

A floresta de acácia possui grande potencial econômico, sua madeira é utilizada principalmente para celulose e fornecimento de energia e a casca para a extração de tanino (FOELKEL, 2008). Para o cálculo do PAG utilizamos apenas a parcela dos produtos madeireiros que possuem potencial para sequestro de carbono a médio e longo prazo. Logo, para este estudo utilizamos somente o C sequestrado na parcela madeira, comercializado para a produção de celulose. Segundo Foelkel (2008) a exportação de cavacos de Acácia-negra,

para a produção de celulose corresponde a 50% do total de madeira disponibilizado pela acacicultura no estado do Rio Grande do Sul.

A silvicultura apresentou potencial de mitigação do aquecimento global, com valor de $-5614 \text{ kg CE-C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (Tabela 5). Esse resultado se deve principalmente ao conteúdo de COT adicionado ao solo com o cultivo da silvicultura e o C armazenado nos produtos madeireiros, contribuindo para aumentar o sequestro de C da atmosfera. Este estudo indica, também, que os fluxos de N_2O e CH_4 não são determinantes para o resultado final do PAG na silvicultura, mas sim o conteúdo COT aportado ao solo com o cultivo da silvicultura e o sequestro de C proveniente dos produtos madeireiros. Destacando o sequestro de C através dos produtos madeireiros, a silvicultura com *A. mearnsii* neste estudo acumulou em 6 anos de cultivo $77,5 \text{ Mg C ha}^{-1}$ (divididos em $48,5 \text{ Mg C ha}^{-1}$ na madeira, $6,2 \text{ Mg C ha}^{-1}$ na casca, $10,6 \text{ Mg C ha}^{-1}$ nos galhos, $2,5 \text{ Mg C ha}^{-1}$ nas folhas e $9,6 \text{ Mg C ha}^{-1}$ nas raízes (BARICHELLO et al., 2005; SAIDELLES et al., 2009), comprovando o potencial para adição de C ao solo e sequestro de C em produtos madeireiros da silvicultura em solos do Pampa Gaúcho. O potencial de mitigação da silvicultura neste estudo foi superior aos obtidos por Gomes (2006) em sistemas agrícola com leguminosas no Brasil (valores entre -88 e $-517 \text{ kg CE-C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$).

Tabela 5

Estimativa do Potencial de Aquecimento Global (PAG) em Cambissolo Háptico sob diferentes usos do solo. Vila Nova do Sul, 2012.

Componentes do PAG	Local	
	Acácia	Campo Nativo
	----- kg CE ha ⁻¹ ano ⁻¹ * -----	
Varição anual de COT ¹	- 1669,00	0,00
Produtos madeireiros	- 4041,97	0,00
Custo de produção	78,88	0,00
Varição de N ₂ O	30,93	40,36
Varição de CH ₄	- 13,14	- 15,93
PAG	- 5613,84	24,43

Valores positivos indicam contribuição com o aquecimento global e valores negativos indicam potencial de mitigação do aquecimento global.

* Carbono equivalente

¹ Carbono orgânico total

4. Conclusões

A inserção da silvicultura no Pampa Gaúcho com espécies de acácia não alterou significativamente a magnitude dos fluxos de CH₄ e N₂O do solo. Os fluxos de N₂O foram positivos na maioria das avaliações, mas sempre próximos a zero. O fluxo de CH₄ apresentou-se negativo ou levemente positivo nos tratamentos AM e CN no período avaliado. A retirada da serrapilheira não alterou significativamente os fluxos de CH₄ e N₂O na acácia.

A colheita da acácia promoveu tendência de aumento nas taxas de emissão de N₂O e CH₄ do solo. Tal aumento se manifestou mais rapidamente nas taxas de N₂O do que de CH₄.

Os fatores de solo que mais afetaram os fluxos de CH₄ e N₂O neste estudo foram a variação de temperatura e de umidade do solo, representada pela variação do EPPA. Os teores de NH₄⁺ e NO₃⁻ foram baixos na maioria dos dias avaliados.

A mudança de uso do solo de campo nativo para florestamento com Acácia não alterou significativamente o estoque de NT, COT, CMOP e CAM, indicando manutenção do IMC da silvicultura similar ao do CN.

A silvicultura com florestas de acácia na região do Pampa Gaúcho possui potencial para mitigar a emissão de CH₄ e N₂O e aumentar o sequestro de C em comparação a áreas de CN, principalmente pelo elevado sequestro de C via produtos madeireiros.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Sra. Silvia de Assis Brasil Souto e ao seu esposo Sr. Diego Borba Nedeff, proprietários da Estância Quero-quero pela concessão do local para a realização do estudo. Este trabalho foi desenvolvido com apoio financeiro do CNPq (481305/2010-6) e FAPERGS (1013351/2010).

Referências

- ABRAF – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico da ABRAF 2011, ano base 2010 / ABRAF**. Brasília: 2011. 130 p.
- ABRAF – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico**. Ano base, 2007. Brasília: 2008. 90 p.
- ALLEN, D. E., MENDHAM, D. S., BHUPINDERPAL-SINGH, COWIE, A., WANG, W., DALAL, R. C. & RAISON, R. J. Nitrous oxide and methane emissions from soil are reduced following afforestation of pasture lands in three contrasting climatic zones. **Australian Journal of Soil Research**, v. 47, p. 443–458, 2009.
- AUER, C. G.; SILVA, R. Fixação de nitrogênio em espécies arbóreas. **In: CARDOSO, E. J. B. N.; TSAI, S. M.; NEVES, M. C. P. Microbiologia do solo**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.157-172, 1992.
- BAGGS, E. M. & BLUM, H. CH₄ oxidation and emissions of CH₄ and N₂O from Lolium perenne swards under elevated atmospheric CO₂. **Soil Biology & Biochemistry**, 36, 713–7, 2004.
- BARICHELLO, L. R., SCHUMACHER, M. V. & VOGEL, H. L. M. Quantificação da biomassa de um povoamento de *Acacia mearnsii* de Wild. na região sul do Brasil. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 15, n. 2, p. 129-135, 2005.
- BAYER, C., MARTIN-NETO, L., MIELNICZUK, J., DIECKOW, J. & AMADO, T. J. C. C and N stocks and the role of molecular recalcitrance and organomineral interaction in stabilizing soil organic matter in a subtropical Acrisol managed under no-tillage. **Geoderma**, 2005.

- BLAIR, N. Impact of cultivation and sugar-cane green trash management on carbon fractions and aggregate stability for a Chromic Luvisol in Queensland, Australia. **Soil & Tillage Research**, 55, p. 183-191, 2000.
- BLAIR, G. J., LEFROY, R. D. B. & LISLE, L. Soil Carbon Fractions Based on their Degree of Oxidation, and the Development of a Carbon Management Index, for Agricultural Systems. **Aust. J. Agric. Res.** 46, p.1459-1466, 1995.
- BOECKX, P., VAN CLEEMPUT & VILLARALVO, I. Methane oxidation in soils with different textures and land use. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 49, n. 1-3, p. 91-95, 1997.
- BORKEN, W., DAVIDSON, E. A., SAVAGE, K., SUNDQUIST, E. T., STEUDLER, P. Effect of summer throughfall exclusion, summer drought, and winter snow cover on methane fluxes in a temperate forest soil. **Soil Biology & Biochemistry [S.I.]**, v. 38, p. 1388-1395, 2005.
- CALDEIRA, M. V. W., SCHUMACHER, M. V., BARICHELLO, L. R., SANTOS, E. M. dos, TEDESCO, N. & PEREIRA, J. C. Acúmulo de biomassa aérea em um povoamento de *Acacia mearnsii*. **Bol. Pesq. Fl., Colombo**, n. 42, jan./jun./2001, p.95-104, 2001.
- CALDEIRA, M. V. W., SCHUMACHER, M. V., BARICHELLO, L. R. & VOGEL, H. L. M. Determinação de carbono orgânico em povoamentos de *Acacia mearnsii* de Wild. plantados no Rio Grande do Sul. **Revista Acadêmica: ciências agrárias e ambientais**, Curitiba, v.1, n.2, p. 47-54, abr./jun. 2003.
- CAMPOS, B. C. de, AMADO, T. J. C., BAYER, C., NICOLOSO, R. da S. & FIORIN, J. E. Carbon stock and its compartments in a subtropical oxisol under long-term tillage and crop rotation systems. **R. Bras. Ci. Solo**, 35, p. 805-817, 2011.
- CASTRO, M. S., MELILLO, J. M., STEUDLER, P. A., CHAPMAN, J. W. Soil moisture as a predictor of methane uptake by temperate forest soils. **Journal of Forest Research [S.I.]**, v. 24, p. 1805-1810, 1994.
- COSTA, F. de S., GOMES, J., BAYER, C. & MIELNICZUK, J. Métodos para avaliação das emissões de gases do efeito estufa no sistema solo-atmosfera. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n. 2, p. 693-700, mar-abr, 2006.
- DALAL, R. C., ALLEN, D. E., LIVESLEY, S. J. & RICHARDS, G. Magnitude and biophysical regulators of methane emission and consumption in the Australian agricultural, forest, and submerged landscapes: a review. **Plant and Soil**, v. 309, p. 43-76, 2008.
- DIEKOW, J., MIELNICZUK, J., KNICKER, H., BAYER, C., DICK, D. P. & KÖGEL-KNABNER, I. Carbon and nitrogen stocks in physical fractions of a subtropical Acrisol as influenced by long-term no-till cropping systems and N fertilization. **Plant and Soil**, 268, p. 319-328, 2005.
- DUNFIELD, P. & KNOWLES, R. Kinetics of Inhibition of Methane Oxidation by Nitrate, Nitrite, and Ammonium in a Humisol. **Applied and environmental microbiology**, Aug., p. 3129-3135, 1995.
- ELLERT, B. H. & BETTANY, J. R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. **Can. J. Soil Sci.** 75, 529-538, 1995.
- EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solo / Centro Nacional de Pesquisa de Solos**. 2 ed. rev. atual. Rio de Janeiro: 1997. 212 p.

- FOELKEL, C. Os eucaliptos e as leguminosas – Parte 01: *Acacia mearnsii*. Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel – ABTCP. **Eucalyptus Online Book & Newsletter**, fevereiro de 2008.
- GATTO, A. et al. Estoques de carbono no solo e na biomassa em plantações de eucalipto. **R. Bras. Ci. Solo**, 34, p. 1069-1079, 2010.
- GOMES, J. **Emissão de Gases de Efeito Estufa e Mitigação do Potencial de Aquecimento Global por Sistemas Conservacionistas de Manejo do Solo**. 2006. 129p. Tese (Doutorado) – Curso de Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2006.
- GOMES, J., BAYER, C., COSTA, F. S., PICCOLO, M. C., ZANATTA, J. A., VIEIRA, F. C. B. & SIX J. Soil nitrous oxide emissions in long-term cover crops-based rotations under subtropical climate. **Soil and Tillage Research**, 106, p. 36-44, 2009.
- INAGAKI, M. & ISHIZUKA, S. Ecological Impact on Nitrogen and Phosphorus Cycling of a Widespread Fast-growing Leguminous Tropical Forest Plantation Tree Species, *Acacia mangium*. **Diversity**, 3, p. 712-720; doi: 10.3390/d3040712, 2011.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**, 2007.
- JANTALIA, C. P., RESCK, D. V. S., ALVES, B. J.R., ZOTARELLI, L., URQUIAGA, S. & BODDEY, R. M. Tillage effect on C stocks of a clayey Oxisol under a soybean-based crop rotation in the Brazilian Cerrado region. **Soil & Tillage Research**, 2006.
- KHALIL, M. I. & BAGGS, E.M. CH₄ oxidation and N₂O emissions at varied soil water-filled pore spaces and headspace CH₄ concentrations. **Soil Biology & Biochemistry**, 37, p. 1785–1794, 2005.
- KONDA, R., OHTA, S., ISHIZUKA, S., HERIYANTO, J. & WICAKSONO, A. Seasonal changes in the spatial structures of N₂O, CO₂, and CH₄ fluxes from *Acacia mangium* plantation soils in Indonesia. **Soil Biology & Biochemistry**, 42, p. 1512 – 1522, 2010.
- LAL, R. Carbon emission from farm operations. **Environment International**, New York, v. 30, n. 8, p. 981- 990, 2004.
- LIMA, A. M. N. et al. Frações da matéria orgânica do solo após três décadas de cultivo de eucalipto no vale do Rio Doce-MG. **R. Bras. Ci. Solo**, 32: 1053-1063, 2008.
- MARTENS, D. A., EMMERICH, W., MCLAIN, J. E. T. & JOHNSEN, T. N. Atmospheric carbon mitigation potential of agricultural management in the southwestern USA. **Soil & Tillage Research**, v. 83, p. 95–119, 2005.
- MALJANEN, M., LIIKANEN, A., SILVOLA, J. & MARTIKAINEN, P. J. Nitrous oxide emissions from boreal organic soil under different land-use. **Soil Biology & Biochemistry**, 35, p. 1–12, 2003.
- MOSIER, A. R. Soil processes and global change. **Biol Fertil Soils [S.I.]**, v. 27, p. 221-229, 1998.
- MOSIER, A. R., DELGADO, J. A., COHRAN, V. L., VALENTINE, D. W. & PARTON, W. J. Impact of agriculture on soil consumption of atmospheric CH₄ and a comparison of CH₄ and N₂O flux in subarctic, temperate and tropical grasslands. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 49, n. 1, p. 73-83, 1997.

- SAIDELLES, F. L. F., CALDEIRA, M. V. W., SCHUMACHER, M. V. & BALBINOT, R. Uso de equações para estimar carbono orgânico em plantações de *Acacia mearnsii* de Wild. no Rio Grande do Sul –Brasil. **R. Árvore**, Viçosa-MG, v.33, n.5, p.907-915, 2009.
- SANTIN, M. F. C. de L. & REIS, A. A silvicultura como veículo do desenvolvimento econômico e ambientalmente sustentável na metade sul do Rio Grande do Sul. **VII Encontro da Sociedade Brasileira de Economia Ecológica**. Fortaleza, 28 a 30 de novembro de 2007.
- SCHUMACHER, M. V., BRUM, E. J., RODRIGUES, L. M. & SANTOS, E. M. dos. Retorno de nutrientes via deposição de serapilheira em um povoamento de Acácia-negra (*Acácia mearnsii* de Wild.) no estado do Rio Grande do Sul. **Revista Árvore**, Viçosa, novembro-dezembro, ano/vol. 27, n. 006, p. 791-798, 2003.
- SISTI, C. P. J., SANTOS, H. P. dos, KOHHANN, R., ALVES, B. J. R., URQUIAGA, S. & BODDEY, R. M. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, 76, p. 39–58, 2004.
- TATE, K. R., ROSS, D. J., SAGGAR, S., HEDLEY, C. B., DANDO, J., SINGH, B. K. & LAMBIE, S. M. Methane uptake in soils from *Pinus radiata* plantations, a reverting shrubland and adjacent pastures: Effects of land-use change, and soil texture, water and mineral nitrogen. **Soil Biology & Biochemistry**. V. 39, p. 1437–1449, 2007.
- TEDESCO, M. J. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2 ed. ver. Porto Alegre: Departamento de Solos da UFRGS, 1995. 174 p.
- UGALDE, D., BRUNGS, A., KAEBERNICK, M., MCGREGOR, A. & SLATTERY, B. Implications of climate change for tillage practice in Australia. **Soil & Tillage Research**, 97, p. 318–330, 2007.
- VERCHOT, L. V., BRIENZA JÚNIOR, S., OLIVEIRA, V. C. de, MUTEGI, J. K., CATTÂNIO, J. H. & DAVIDSON, E. A. Fluxes of CH₄, CO₂, NO, and N₂O in an improved fallow agroforestry system in eastern Amazonia. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, 126, p. 113–121, 2008.
- VIEIRA, F. C. B., BAYER, C., ZANATTA, J. A., DIECKOW, J., MIELNICZUK J. & HE, Z. L. Carbon management index based on physical fractionation of soil organic matter in an Acrisol under long-term no-till cropping systems. **Soil & Tillage Research**, 96, p. 195–204, 2007.
- WERNER, C., ZHENG, X., TANG, J., XIE, B., LIU, C., KIESE, R. & BUTTERBACH, K. N₂O, CH₄ and CO₂ emissions from seasonal tropical rainforests and a rubber plantation in Southwest China. **Plant Soil**, 289, p. 335–353, 2006.
- WESLIEN, P., KLEMEDTSSON, A. K., BORJESSON, G. & KLEMEDTSSON, L. Strong pH influence on N₂O and CH₄ fluxes from forested organic soils. **European Journal of Soil Science**, June 2009, 60, p. 311–320, 2009.
- ZANATTA, J. A., BAYER, C., DIECKOW, J., VIEIRA, F. C. B. & MIELNICZUK, J. Soil organic carbon accumulation and carbon costs related to tillage, cropping systems and nitrogen fertilization in a subtropical Acrisol. **Soil & Tillage Research**, v. 94, p. 510–519, 2007.
- ZANATTA, J. A., BAYER, C., VIEIRA, F. C. B., GOMES, J. & TOMAZI, M. Nitrous oxide and methane fluxes in south Brazilian gleysol as affected by nitrogen fertilizers. **R. Bras. Ci. Solo**, 34, p. 1653-1665, 2010.

5.2 MANUSCRITO 2:

FLUXO DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM SOLO DO PAMPA GAÚCHO SOB PLANTIO DE *Eucalyptus saligna*

Autores:

RESUMO: A expansão da silvicultura na região do Pampa Gaúcho tem acontecido de forma intensa nos últimos anos, principalmente através do cultivo de eucalipto. Apesar do potencial para o sequestro de carbono em biomassa vegetal ser elevado, pouco se conhece sobre como esta alteração no uso do solo influencia os fluxos dos Gases de Efeito Estufa (GEE) no solo, principalmente o metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O), tanto no período de cultivo quanto no início do desenvolvimento da planta. Este estudo teve como objetivo principal avaliar a inserção da silvicultura, com *Eucalyptus saligna*, e os efeitos decorrentes disto em relação aos fluxos de CH₄ e N₂O do solo em áreas de campo nativo no Pampa Gaúcho, e identificar fatores de solo que mais interferem nos fluxos destes gases. O estudo foi desenvolvido durante o período de um ano, na área da Empresa Florestal Granflor, no município de Cacequi, RS, sul do Brasil. O estudo foi desenvolvido em um povoamento de *E. saligna*, avaliando cinco tratamentos: Eucalipto com quatro anos com serrapilheira (E4), Eucalipto com quatro anos com retirada manual da serrapilheira (E4-s), Eucalipto com dois anos (E2), Mata Nativa (MN) e Campo Nativo (CN) (tratamento de referência). As coletas de ar foram realizadas quinzenalmente pelo método de câmaras estáticas e a determinação dos fluxos de CH₄ e N₂O foi realizada por cromatografia gasosa. A cada evento de coleta do ar, foram realizadas coletas de solo para análise do teor de nitrogênio (N) mineral e umidade gravimétrica do solo, coleta de serrapilheira e monitoramento da temperatura do ar dentro da câmara e do solo (0,05 m). O solo com E4 apresentou fluxos baixos de CH₄ e N₂O, com oxidação acumulada de -596,47 g C-CH₄ ha⁻¹ ano⁻¹ e emissão acumulada de 99,13 g N-N₂O ha⁻¹ ano⁻¹, não diferindo significativamente do solo sob E2 e CN. Os fluxos baixos de CH₄ e N₂O podem ser consequência da baixa precipitação e dos baixos teores de N mineral no período avaliado. Apesar de não haver diferença estatística, o solo sob E2 apresentou emissão de N₂O cerca de três vezes maior do que o E4 e a MN, e cerca de 1,5 vezes maior do que o CN. Estes valores mais altos no E2 podem estar relacionados com a sua recente implantação e o solo estar em processo de reestruturação, apresentando maior emissão de N₂O e menor absorção de CH₄, quando comparado com a silvicultura em idade mais avançada. Nenhum

fator edafoclimático apresentou correlação significativa com os fluxos diários de CH₄ e N₂O, enquanto as emissões acumuladas apresentaram relação inversa e significativa ($P < 0,05$) com os estoques de C e N do solo. A inserção da silvicultura em áreas de CN não alterou significativamente os estoques de carbono orgânico total (COT), nitrogênio total (NT) e carbono orgânico particulado (COP) em relação ao solo sob CN. Estes resultados reforçam a silvicultura como uma opção efetiva na mitigação dos GEE no Pampa Gaúcho, uma vez que o florestamento parece não alterar os fluxos de GEE e os estoques de C do solo sob CN, além de apresentar elevado potencial para sequestro de C na biomassa vegetal.

Palavras-chave: Metano, Óxido Nitroso, Silvicultura, Aquecimento Global

ABSTRACT: The expansion of forestry in the region of Brazilian Pampa has been intense in recent years, mainly through the plantation of Eucalyptus. Despite of its large potential for carbon sequestration in vegetal biomass, little is known about how this change in land use influences the flux of Greenhouse Gases (GHG) in the soil, mainly methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O) along the time of post-forestation. This study aimed to evaluate the effects of forestation with *Eucalyptus saligna* in relation to the CH₄ and N₂O emissions from soil in areas of native grassland in Pampa Gaúcho and to identify the main soil and climate factors that interfere in these gases. The study was carried out during the period of one year, in the area of Granflor Forest Company in the city of Cacequi, Rio Grande do Sul, southern Brazil, in plantations of *E. saligna*, evaluating five treatments: four-year Eucalyptus plantation (E4), four-year Eucalyptus plantation with manual litter removal (E4-l), two-year Eucalyptus plantation (E2), Native forest (NF) and Native grassland (NG) (reference treatment). Air samples were accomplished biweekly by the method of static chambers and the CH₄ and N₂O analysis was performed by gas chromatography. Every air sampling event, soil samples were taken for analysis of content of mineral nitrogen (N) and soil gravimetric moisture, litter input and monitoring the within the chamber and soil (0.05 m) air temperature. The soil with E4 had low CH₄ and N₂O emissions, with accumulated oxidation $-596.47 \text{ g C-CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ and accumulated emission of $99.13 \text{ g N-N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, which was not significantly different from E2 and NG soils. The low fluxes of CH₄ and N₂O can be a result of low rainfall and low levels of mineral N in the evaluated period. Although they were not statistically different, the soil with E2 had N₂O emission of about three times larger than E4 and MN and about 1.5 times larger than NG. These higher values on E2 may be related to their recent disturb, showing greater emission of N₂O and minor absorption of CH₄, when compared with more developed

forestry. The diary flux of CH₄ and N₂O had no significant relation with soil and climate factors, but their accumulated emission were inversely related ($P < 0,05$) to the soil C and N stocks. The adoption of forestry in areas of NG did not alter significantly the stocks of total organic carbon (TOC), total nitrogen (TN) and particulate organic carbon (POC) in relation to soil under NG. Such results emphasize the forestation as an interesting option for mitigating GHG in the Pampa Gaúcho, as the forestation seems to promote no changes in the soil GHG fluxes and soil C and N stocks, in addition to their great potential of C sequestration in their vegetal biomass.

Keywords: Methane, Nitrous oxide, Afforestation, Global warming

1. Introdução

O solo do Pampa Gaúcho, sul do Brasil, inicialmente tinha como uso predominante a pecuária, mas próximo a década de 1950 esse uso se transformou com a inserção da agricultura. Recentemente, novas mudanças de uso do solo estão ocorrendo devido à rápida expansão da silvicultura. Espécies exóticas, como *Eucalyptus* sp., estão sendo inseridas em solos com vegetação nativa de campos ou em solos já convertidos ao uso agrícola. A área cultivada com *Eucalyptus* sp. no Estado do Rio Grande do Sul aumentou cerca de 52% nos últimos 5 anos, chegando a 273 mil ha em 2010 (ABRAF, 2011). O eucalipto possui boa adaptação a climas subtropicais, apresentando produção média de 50 m³ ha⁻¹ ao ano na região Sul do Brasil (PAVAN et al., 2010). Tem como usos principais a extração de celulose e óleo e uso da madeira em produção de móveis, construção civil e energia.

Mudanças de uso do solo modificam as características naturais do ecossistema, causando alterações no fluxo dos Gases de Efeito Estufa (GEE) entre o solo e a atmosfera, com destaque para o dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O). Além disso, a retirada da vegetação nativa pode diminuir a biodiversidade local e o conteúdo de C lábil no solo, a fertilidade deste também pode ser reduzida pela exportação de nutrientes com a colheita e a umidade do solo ser alterada pelo maior potencial de evapotranspiração da silvicultura em relação ao campo nativo (SANTIN & REIS, 2007; ABRAF, 2008; BLAIR, 2000; SCHUMACHER et al., 2003).

Atualmente, aspectos da dinâmica do C no solo com inserção de silvicultura são melhor conhecidos, porém pouco se sabe sobre a influência desta mudança de uso nos fluxos

de CH₄ e N₂O. Assim, apesar da inserção da silvicultura representar uma alternativa de mitigação dos GEE pela fixação de C, não se conhece claramente o verdadeiro efeito desta mudança de uso do solo sobre a participação relativa dos três gases ao longo do ciclo das florestas plantadas de eucalipto no Sul do Brasil. De forma similar, os principais fatores que afetam a dinâmica dos fluxos de CH₄ e N₂O em solos de florestas plantadas também são pouco conhecidos.

A silvicultura com eucalipto apresenta maior potencial para adição de C ao solo, em comparação ao uso para fins agrícolas (GATTO et al., 2010), podendo fixar entre 100 e 400 Mg ha⁻¹ de CO₂ durante a fase de crescimento (ECOAR, 2003). No Brasil o cultivo de eucaliptos participa com 75% do cenário de mitigação de GEE (CERRI, 2010). No entanto, a inserção de eucalipto em áreas de vegetação nativa, em primeiro momento pode causar a diminuição nos estoques de matéria orgânica (MO) (DALAL et al., 2008) e aumento na emissão de GEE do solo, resultante da baixa taxa de aporte dos resíduos de serrapilheira no solo (ALLEN et al., 2009). Esse desequilíbrio tende a desaparecer com o crescimento da planta, dependendo das condições edafoclimáticas locais (DALAL et al., 2008; WESLIEN et al., 2009). Estudos indicam que solos de florestas adultas apresentam condições mais favoráveis ao influxo de CH₄ e à redução da emissão de N₂O, em comparação a solos de florestas jovens, principalmente pela estabilidade química, física e biológica que a floresta pode proporcionar ao solo com o passar do tempo (ALLEN et al., 2009).

O maior aporte de serrapilheira da silvicultura favorece a adição de MO ao solo, podendo aumentar a disponibilidade de C lábil, porém pode favorecer o aumento da atividade biológica no solo, que implica em maior consumo de oxigênio. O conteúdo de C do solo é um importante indicador da sua qualidade, e alterações nos seus estoques e na sua labilidade modificam as características físicas, químicas e biológicas do solo (GATTO et al., 2010; VIEIRA et al., 2007). Assim, mudanças no estoque e/ou na labilidade da MO do solo podem afetar não apenas a qualidade do solo em virtude do tipo de uso ou manejo (BLAIR et al., 1995; LOU et al., 2011; SOUZA et al., 2009), como também os fluxos de GEE entre o solo e a atmosfera.

Florestas plantadas podem apresentar microclima mais estável, proporcionando maior estabilidade da estrutura, infiltração e retenção de água, aeração e menores variações de temperatura no solo em comparação a áreas de campo nativo (GATTO et al., 2010). Em solos subtropicais, as variações de precipitação e temperatura parecem ser os fatores que mais influenciam os fluxos de N₂O, na silvicultura, já que nestes solos os processos de nitrificação e desnitrificação são menos intensos devido aos baixos teores de amônio (NH₄⁺) e nitrato

(NO₃⁻) (ALLEN et al., 2009; WERNER et al., 2006; MALJANEN et al., 2003). O fluxo de GEE também pode sofrer influência da textura (BOECKX et al., 1997; DALAL et al., 2008), uma vez que solos argilosos facilitam a retenção de água, nutrientes e MO, porém limitam a atividade da população de bactérias metanogênicas. Os solos arenosos possuem maior aeração podendo favorecer a oxidação de CH₄ (BOECKX et al., 1997).

Os objetivos deste estudo foram: (i) avaliar a inserção da silvicultura e os efeitos decorrentes disto em relação aos fluxos de CH₄ e N₂O do solo, com espécies de eucalipto, em áreas de campo nativo no Pampa Gaúcho; (ii) identificar e avaliar os fatores de solo que mais interferem nos fluxos de CH₄ e N₂O em área de mata nativa, campo nativo e silvicultura cultivada com eucalipto com diferentes idades; e (iii) avaliar o efeito da inserção da silvicultura nos estoques de carbono orgânico total e nitrogênio total e na labilidade do carbono orgânico total.

2. Materiais e métodos

2.1 Local de estudo

O estudo foi desenvolvido na propriedade da Empresa Florestal Granflor (29°51'07" S, 54°51'47" O, 132 m), no município de Cacequi, região Centro Ocidental do Estado do Rio Grande do Sul, sul do Brasil, durante o período de setembro de 2011 a agosto de 2012, em locais com diferentes usos do solo. A região possui clima subtropical com estações bem definidas, precipitação média anual de 1400 mm e mensal de 115 mm, com chuvas bem distribuídas durante o ano, classificado como Cfa de acordo com o sistema de classificação de Köppen. O solo é classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo de textura franco arenosa.

O estudo foi desenvolvido em cinco locais adjacentes, sob diferentes usos do solo, com três repetições por tratamento. Um dos tratamentos consistiu em uma área de *Eucalyptus saligna* (2864) com quatro anos no início do estudo (E4). Neste local, também foi analisada uma área adjacente com retirada manual da serapilheira antes de cada evento de coleta (E4-s), com a finalidade de verificar a influência desta nos fluxos de GEE. O terceiro tratamento consistiu de um local cultivado com *Eucalyptus saligna* (44039) com dois anos no início do estudo (E2) em um sítio florestal adjacente ao do E4 e E4-s. O quarto e o quinto tratamento consistiram de áreas de mata nativa (MN) e de campo nativo (CN), sendo que o CN foi utilizado como referência em nosso estudo. As áreas de MN e CN eram adjacentes entre si, porém ocupavam posição mais baixa na paisagem em relação aos demais locais. Tanto o solo

sob MN quanto o sob CN apresentavam características de solo alóctone, com formação aluvial. Os plantios de eucalipto das áreas analisadas foram realizados com sistema de cultivo mínimo, através de subsolagem (0,40 m de profundidade) e gradagem leve apenas na linha de plantio das árvores. O espaçamento utilizado foi de 5 x 2,5 m.

Os teores de argila, silte e areia e densidade aparente do solo para os diferentes locais estudados, estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1

Teores de argila, silte e areia e densidade aparente do solo em um Argissolo Vermelho-Amarelo sob diferentes usos do solo. Cacequi (2012).

Atributos do solo	Profundidade (m)	Local			
		Eucalipto 4 anos	Eucalipto 2 anos	Campo nativo ¹	Mata nativa
Argila (g kg ⁻¹)	0,00 – 0,05	54 ± 6 ^a	74 ± 29 ^a	58 ± 7 ^a	174 ± 53 ^a
	0,05 – 0,10	78 ± 17	81 ± 29	57 ± 6	149 ± 38
	0,10 – 0,20	99 ± 10	61 ± 15	48 ± 7	127 ± 50
	0,20 – 0,40	114 ± 6	101 ± 6	55 ± 16	131 ± 18
	0,40 – 0,60	144 ± 12	128 ± 10	48 ± 7	67 ± 40
	0,60 – 0,80	164 ± 12	158 ± 0	48 ± 12	53 ± 50
	0,80 – 1,00	168 ± 10	154 ± 21	42 ± 11	40 ± 42
Silte (g kg ⁻¹)	0,00 – 0,05	136 ± 8	142 ± 23	111 ± 13	368 ± 111
	0,05 – 0,10	152 ± 16	130 ± 24	104 ± 17	295 ± 28
	0,10 – 0,20	154 ± 10	147 ± 10	102 ± 18	230 ± 50
	0,20 – 0,40	194 ± 16	157 ± 7	106 ± 5	192 ± 26
	0,40 – 0,60	214 ± 21	172 ± 3	123 ± 24	138 ± 19
	0,60 – 0,80	217 ± 15	179 ± 28	116 ± 19	123 ± 27
	0,80 – 1,00	214 ± 6	188 ± 13	106 ± 20	129 ± 61
Areia (g kg ⁻¹)	0,00 – 0,05	809 ± 7	784 ± 50	831 ± 20	458 ± 96
	0,05 – 0,10	770 ± 24	790 ± 36	839 ± 23	556 ± 60
	0,10 – 0,20	747 ± 10	792 ± 24	850 ± 25	644 ± 53
	0,20 – 0,40	691 ± 15	742 ± 8	839 ± 19	677 ± 44
	0,40 – 0,60	642 ± 24	700 ± 13	829 ± 26	795 ± 59
	0,60 – 0,80	619 ± 20	664 ± 28	836 ± 31	824 ± 76
	0,80 – 1,00	618 ± 14	658 ± 33	852 ± 30	831 ± 103
Densidade do solo (g cm ⁻³)	0,00 – 0,10	1,55 ± 0,07	1,49 ± 0,1	1,56 ± 0,02	0,96 ± 0,22
	0,10 – 0,20	1,68 ± 0,05	1,64 ± 0,04	1,60 ± 0,03	1,30 ± 0,14
	0,20 – 0,40	1,64 ± 0,07	1,61 ± 0,08	1,51 ± 0,05	1,41 ± 0,06
	0,40 – 0,60	1,62 ± 0,05	1,64 ± 0,05	1,50 ± 0,07	1,51 ± 0,12
	0,60 – 0,80	1,64 ± 0,06	1,60 ± 0,05	1,52 ± 0,07	1,54 ± 0,16
	0,80 – 1,00	1,55 ± 0,11	1,65 ± 0,04	1,54 ± 0,05	1,66 ± 0,06

^a Média ± desvio padrão (n = 3)

¹ área de referência

2.2 Amostragem e análise de ar

A amostragem de ar para a quantificação de CH₄ e N₂O foi realizada pelo sistema de câmaras estáticas, com três repetições (COSTA et al., 2006). As câmaras foram confeccionadas em PVC, com 25 cm de diâmetro por 25 cm de altura. As bases para colocação das câmaras, confeccionadas em aço galvanizado, consistem em um anel interno, cravado no solo a 5 cm de profundidade, e uma canaleta externa preenchida com água a fim de vedar as trocas de gases entre o interior e o exterior da câmara. As câmaras possuem um “cooler” acoplado em seu interior para proporcionar a homogeneização do ar antes da coleta.

As câmaras dos tratamentos E4, E-s e E2 foram posicionadas de forma aleatória nas entrelinhas do plantio do eucalipto. Após a implantação do estudo, as coletas de ar foram realizadas quinzenalmente, durante o período de um ano, com início às nove horas da manhã e com coletas nos tempos 0, 20 e 40 minutos após o fechamento das câmaras. O ar foi coletado utilizando seringas de polipropileno de 20 mL e válvulas de três vias com conexão tipo “Luer Lock”, acopladas na parte superior da câmara. O ar coletado foi armazenado em frascos Exetainer[®] de 12 mL (Labco Ltd, High Wycombe, United Kingdom), até a análise. A quantificação dos gases CH₄ e N₂O foi realizada por cromatografia gasosa no laboratório de Biogeoquímica Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS através de cromatógrafo gasoso Shimadzu GC2014 Modelo “Greenhouse”. O cromatógrafo é equipado com três colunas de separação trabalhando a 70 °C. O gás nitrogênio é utilizado para formar um fluxo de 26 mL min⁻¹, com entrada para análise em conjunto de 1 mL de amostra a temperatura de 250 °C, detector de captura eletrônica a 325 °C para detecção de N₂O e detector de chama de ionização a 250 °C para o CH₄. Os fluxos de N₂O e CH₄ foram estimados com base na seguinte equação:

$$f = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \frac{PV}{RT} \frac{1}{A} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde, f é o fluxo de N₂O ou CH₄ ($\mu\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ N₂O ou CH₄), Q é a quantidade de cada gás na câmara no momento da amostragem ($\mu\text{g N}_2\text{O}$ ou CH₄), P é a pressão atmosférica na câmara (1 atm), V é o volume da câmara (L), t é o tempo (h), R é a constante dos gases ideais (0,08205 atm. L mol⁻¹ K⁻¹), T é a temperatura interna da câmara no momento da amostragem (°K) e A é a área da câmara (m²). A taxa de aumento da concentração de gás no interior da câmara é estimada utilizando o coeficiente angular obtido da relação entre a concentração de

gás e o tempo após o fechamento da câmara. As emissões de N_2O e CH_4 , expressas em $\mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ e $\mu\text{g C-CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, foram calculadas a partir da variação da concentração de N_2O e CH_4 nos tempos 0, 20 e 40 minutos dentro da câmara e a emissão total do período foi calculada integrando as emissões diárias (GOMES et al., 2009; ZANATTA et al., 2010).

As taxas de emissão de N_2O e CH_4 foram obtidas pelo valor médio das três câmaras colocadas em cada área de estudo. Complementarmente às coletas de gases foi realizado o monitoramento da temperatura do ar no interior das câmaras e do solo (a 5 cm de profundidade) nas áreas de estudo.

2.3 Amostragem e análise de solo

No início do estudo foi realizada uma coleta de solo em camadas superficiais e subsuperficiais (0 – 5, 5 – 10, 10 – 20, 20 – 40, 40 – 60, 60 – 80 e 80 – 100 cm) com três repetições em cada área de estudo. A densidade foi determinada pelo método dos anéis volumétricos, com as amostras de solo indeformadas secas em estufa a 105 °C até massa constante. As amostras de solo deformadas para determinação da textura do solo, análise do estoque e teor de carbono orgânico total (COT), nitrogênio total (NT), teor de carbono orgânico particulado (COP) e carbono associado à fração mineral (CAM) (com amostragem de 0 – 40 cm) foram secas em temperatura ambiente, moídas em moinho de martelo e peneiradas (peneira de 2 mm, fração terra fina seca ao ar). As amostras de solo para análise de COP foram separadas através do método de fracionamento físico granulométrico, seguindo a metodologia descrita por Vieira et al. (2007). As amostras de solo para análises do teor de COT e COP foram moídas em almofariz de cerâmica com auxílio de pistilo e analisadas através de combustão seca com analisador de COT Shimadzu TOC-VCSH, ShimadzuCorp. no laboratório de Biogeoquímica Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. O CAM foi calculado pela diferença entre os estoques de COT e de COP.

O teor de NT foi analisado por digestão úmida e destilador de arraste semi-micro Kjeldahl, conforme a metodologia descrita por Tedesco et al. (1995). Os estoques de COT, COP e NT foram calculados utilizando o método de massa equivalente, utilizando a densidade do campo nativo como referência (ELLERT & BETTANY, 1995). A textura do solo foi determinada pelo método do densímetro após dispersão com NaOH 1M, conforme metodologia da EMBRAPA (1997) e de Tedesco et al. (1995), no laboratório da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), Campus São Gabriel.

Após a instalação do experimento, em cada evento de coleta de gases, foram coletadas amostras de solo quinzenalmente durante o período de um ano, para análise de nitrogênio mineral (amônio (NH_4^+) e nitrato (NO_3^-)), umidade gravimétrica e espaço poroso preenchido por água (EPPA). Para as análises de nitrogênio mineral, umidade gravimétrica e EPPA, o solo foi coletado com o auxílio de trado calador, retirando-se amostras, em triplicata, de 0 – 10 cm de profundidade. O solo para análise de N mineral (amostras de aproximadamente 5 g) foi colocado em recipiente contendo 40 mL de cloreto de potássio (KCl) 1M, previamente mensurado quanto à massa, posteriormente, as amostras foram agitadas e 20 mL do sobrenadante foram analisados no laboratório da UNIPAMPA através de destilação de arraste semi-micro Kjeldahl quanto aos teores de NH_4^+ e NO_3^- , conforme metodologia de Tedesco et al. (1995). As amostras coletadas para determinação da umidade gravimétrica foram secas em estufa a 105°C até massa constante, sendo expressas em base de peso seco, conforme a metodologia descrita por Tedesco et al. (1995). O EPPA foi estimado utilizando os valores de umidade gravimétrica e densidade do solo (GOMES, 2006), assumindo densidade da partícula (D_p) = 2,65 g cm⁻³.

Os dados pluviométricos locais do período avaliado foram obtidos da Agência Nacional de Águas (ANA) da estação pluviométrica Cacequi (02954001), distante cerca de 5 km do local de coleta.

2.4 Amostragem de serrapilheira

As amostras de serrapilheira foram recolhidas quinzenalmente em cada evento de coleta de gases utilizando cestos de coleta com 60 cm de diâmetro por 60 cm de altura. Os cestos foram colocados nas linhas e entrelinhas das áreas de eucalipto com quatro e dois anos e na área de mata nativa, com três repetições por área de estudo. Os cestos foram instalados na implantação do estudo, presos por tripés de 0,80 m, permanecendo fixos no local durante todo o período avaliado. As amostras de serrapilheira foram secas em estufa a 60 °C até massa constante para estimar a taxa de aporte de serrapilheira.

2.5 Cálculo do Potencial de Aquecimento Global (PAG) parcial

O PAG parcial foi calculado transformando as emissões dos gases N_2O e CH_4 para carbono equivalente (CE), utilizando como referência 298 e 25 kg de CO_2 para cada kg de N_2O e CH_4 , respectivamente (IPCC, 2007), o PAG é dado pela adição das equações (2) e (3):

$$\text{CH}_4 \text{ (kg CE - C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}) = \text{CH}_4 \text{ (kg CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}) \times 25 \times \frac{12}{44} \quad \text{(Equação 2)}$$

$$\text{N}_2\text{O (kg CE - C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}) = \text{N}_2\text{O (kg N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}) \times 298 \times \frac{12}{44} \quad \text{(Equação 3)}$$

$$\text{PAG parcial (kg CE ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}) = \Delta \text{ (variação) CH}_4 + \Delta \text{ N}_2\text{O} \quad \text{(Equação 4)}$$

2.6 Análise estatística

A relação entre fluxos e variáveis foi realizada por correlação de Pearson ($P < 0,05$), e a variabilidade através do desvio padrão da média ($n = 3$).

A significância do efeito dos tratamentos foi analisada utilizando análise de variância one-way ANOVA através do software SAS e a comparação entre as médias foi realizada pelo teste de Tukey ao nível de 5%.

3. Resultados e discussão

3.1 Fluxos de N_2O e CH_4

Os fluxos de N_2O (Fig. 1a) apresentaram-se semelhantes para todos os tratamentos durante a maior parte dos eventos de coleta, uma vez que em apenas cinco das 25 datas de coleta verificou-se diferença estatística significativa entre os tratamentos. Tal constatação aponta que a inserção do eucalipto, neste caso, não promoveu alteração evidente nos fluxos de N_2O do solo no local avaliado. Em adição, não se verificou diferença nos fluxos de N_2O ao longo do ano avaliado, apesar da variação natural das condições climáticas de cada estação. Os fluxos de N_2O estiveram próximos a zero ou levemente positivos para a maioria das avaliações no período observado, variando entre $-40,80 \mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ e $27,57 \mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Esse resultado pode ser consequência dos baixos teores N mineral no solo (Fig. 2d e 2e) e do baixo EPPA (inferior a 40%; Fig. 2c) na maioria dos dias avaliados, favorecidos pela baixa precipitação do período avaliado, média de 80 mm mensais (Fig. 2a), sendo que a média esperada para a região é de 115 mm mensais.

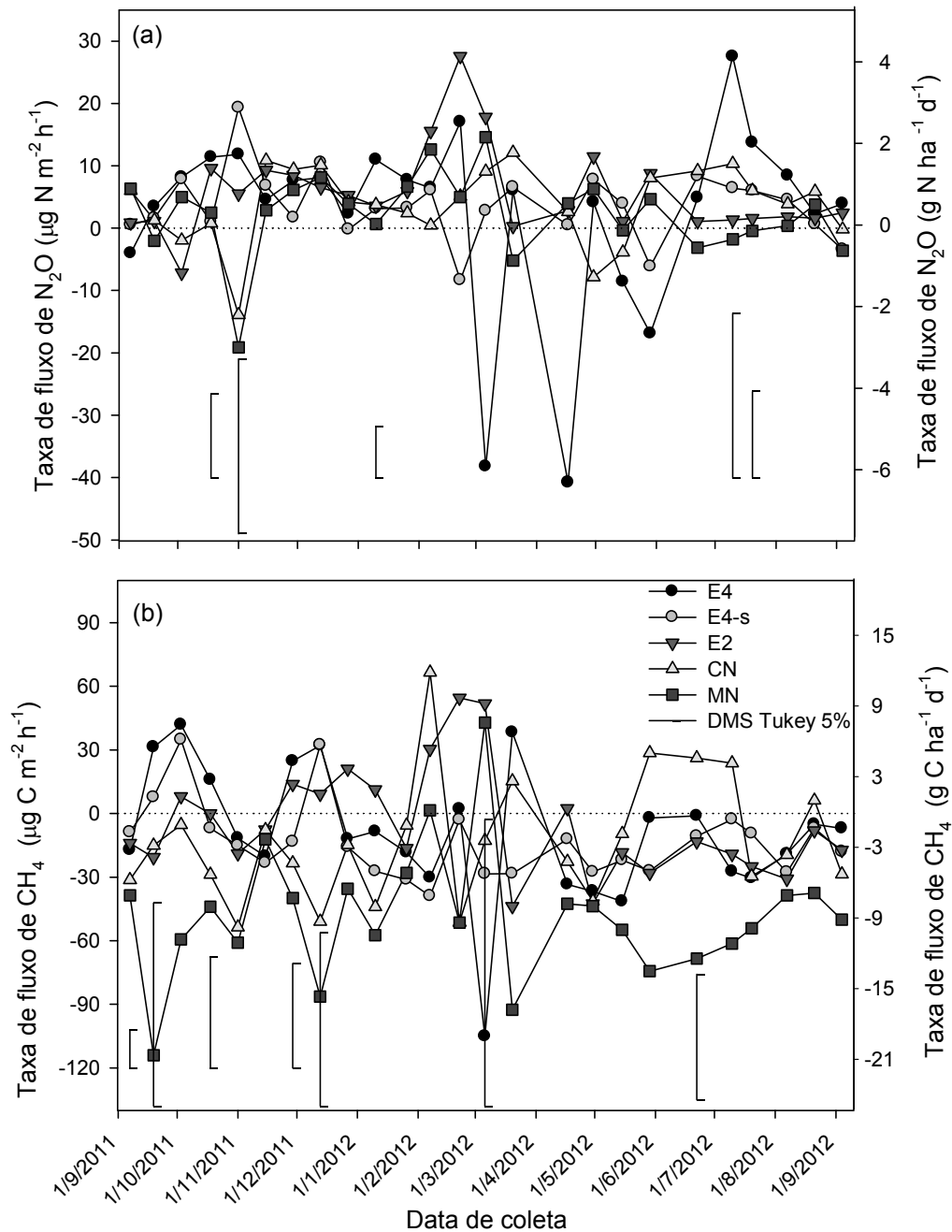


Fig. 1. Fluxo de N_2O (a) e de CH_4 (b) em um Argissolo Vermelho-Amarelo nos diferentes usos do solo no período de um ano. Cacequi (2012). E4: eucalipto com 4 anos de cultivo; E4-s: eucalipto com 4 anos de cultivo com retirada da serrapilheira; E2: eucalipto com 2 anos de cultivo; CN: campo nativo (área de referência); MN: mata nativa. As barras verticais indicam a diferença mínima significativa pelo teste de Tukey ($P < 0,05$) entre os tratamentos avaliados dentro da respectiva data de coleta.

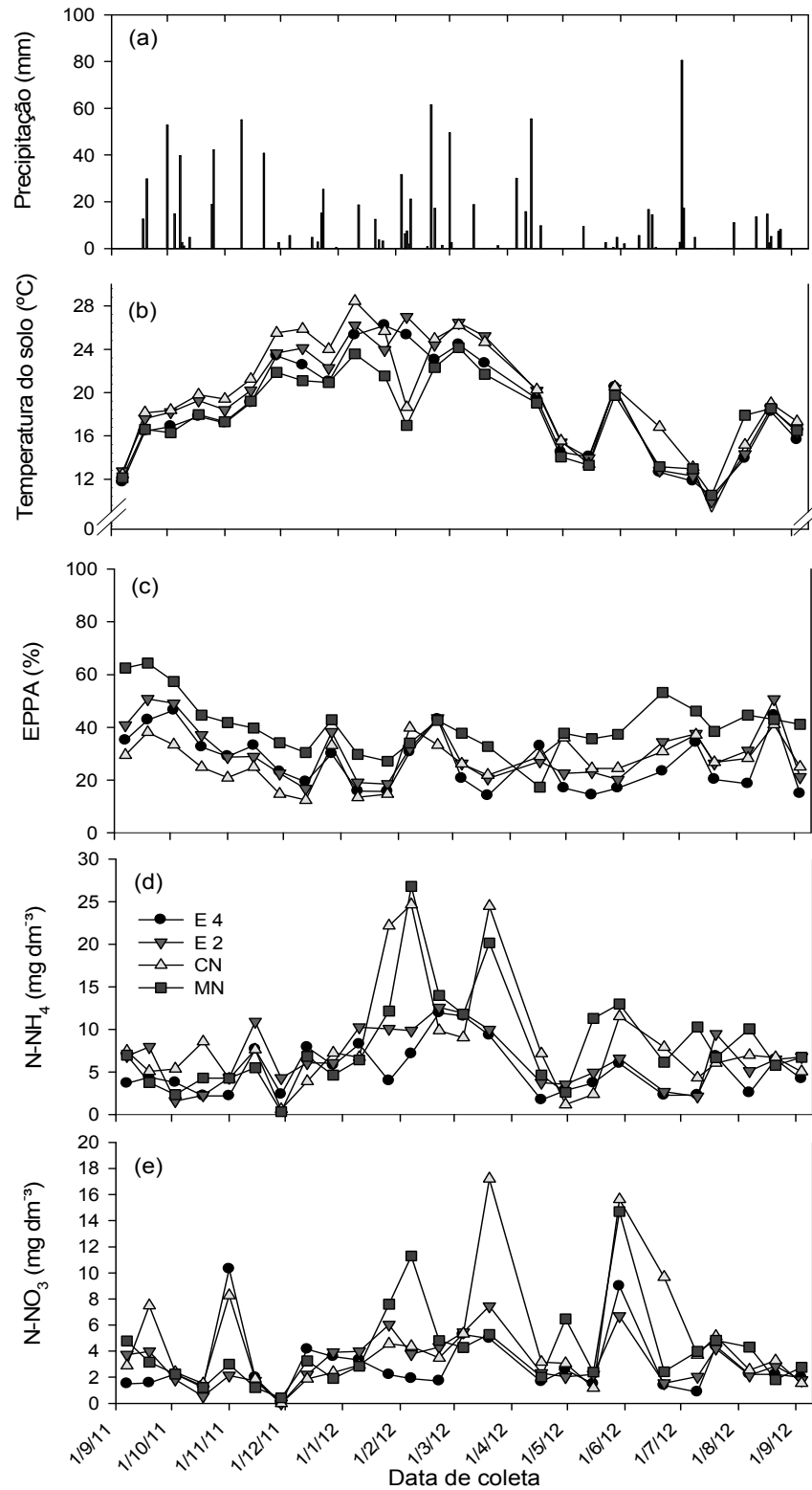


Fig. 2. Precipitação pluviométrica (a), temperatura do solo (b), espaço poroso preenchido por água (EPPA) (c), teores de N-NH_4^+ (d) e N-NO_3^- (e) em um Argissolo Vermelho-Amarelo nos diferentes usos do solo no período de um ano. Cacequi (2012). E4: eucalipto com 4 anos de cultivo; E2: eucalipto com 2 anos de cultivo; CN: campo nativo (área de referência); MN: mata nativa.

O tratamento E4 obteve picos de influxo de N_2O de $-38,22$ e $-40,80 \mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{h}^{-1}$ entre março e maio de 2012. Esse influxo pode ser resultado da redução da temperatura do solo (Fig. 2b) registrada neste período, somada ao baixo teor de N mineral do solo (Fig. 2d e 2e) (ZHU et al., 2005; SUN et al., 2002). Relações semelhantes entre a emissão de N_2O e a temperatura foram encontradas por Liu et al. (2011) na Antártica e Maljanen et al. (2002) em diversos tipos de uso do solo na Finlândia. Porém, em solos subtropicais, poucos estudos têm demonstrado influxo de N_2O e o mecanismo com que isto acontece ainda não está bem esclarecido. O E4 apresentou um pico de emissão de $27,52 \mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{h}^{-1}$ no começo de julho de 2012. Essa emissão pode ser atribuída ao processo de desnitrificação, visto que neste período observou-se uma forte chuva ocorrida poucos dias antes da coleta (Fig. 2a) (SIMEK et al., 2002). Os valores medidos no tratamento E4 foram semelhantes aos obtido por Allen et al. (2009) com cultivo de eucalipto em solos subtropicais, valores geralmente inferiores a $25 \mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{h}^{-1}$. O clima subtropical pode favorecer os baixos fluxos de N_2O no solo principalmente pelos baixos teores de N mineral observados nestas regiões.

Os tratamentos E4-s, E2, CN e MN apresentaram fluxo de N_2O (Fig. 1a) semelhantes entre si ao longo do período amostrado. O E2 obteve um pico de emissão de $27,57 \mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{h}^{-1}$ no final de fevereiro de 2012. Essa emissão pode ser resultado do aumento dos teores de N mineral coincidindo com a precipitação mais frequente no período, fatores que podem favorecer a ocorrência dos processos de nitrificação e desnitrificação (SIMEK et al., 2002). O CN e a MN apresentaram apenas um pico de influxo de $-19,1$ e $-13,9 \mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{h}^{-1}$, respectivamente, no início de novembro de 2011. A estabilidade do solo de CN e MN e a reciclagem de nutrientes podem ter favorecido estes resultados. Os resíduos vegetais são decompostos e a parte dos nutrientes mineralizada no solo pode ser absorvida pelo sistema radicular das plantas antes da ocorrência dos processos de nitrificação e desnitrificação (SCHUMACHER et al., 2003; UGALDE et al., 2007). Os fluxos de N_2O , neste estudo, não apresentaram correlação significativa com as variáveis ambientais N mineral, EPPA e temperatura do solo (Tabela 2).

Tabela 2

Correlação de Pearson ($P < 0,05$) entre o fluxo de gases do solo e as variáveis climáticas ($n = 125$) em um Argissolo Vermelho-Amarelo. Cacequi, 2012.

Fluxo de gases		NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	EPPA ¹	Temperatura do solo
N ₂ O	r	0,045	0,063	- 0,019	0,006
	P	0,619	0,487	0,831	0,951
CH ₄	r	- 0,065	- 0,099	- 0,066	0,094
	P	0,471	0,274	0,462	0,297

¹ Espaço poroso preenchido por água.

De forma similar aos fluxos de N₂O, os fluxos de CH₄ não apresentaram diferença significativa entre os tratamentos para a maioria das datas de coleta (Fig. 1b), os quais variaram de -114 µg C-CH₄ m⁻² h⁻¹ a 67 µg C-CH₄ m⁻² h⁻¹. Entretanto, percebe-se uma tendência do solo de MN apresentar maiores taxas de oxidação (influxo) de CH₄ que os demais tratamentos em quase todos os eventos de coleta. Para os tratamentos com eucalipto e CN, entretanto, não há uma tendência clara quanto à hierarquia dos seus fluxos de CH₄, ocorrendo oxidação de CH₄ para a maioria dos dias avaliados. O E4 apresentou emissão de CH₄ da última semana de setembro até metade de dezembro de 2011, com máxima de 41,88 µg C-CH₄ m⁻² h⁻¹. Essa emissão pode estar associada à precipitação ocorrida no período (Fig. 2a) coincidindo com o aumento da temperatura do solo (Fig. 2b). Após esse período, o tratamento E4 passou a oxidar CH₄ com taxa de oxidação máxima de -105,12 µg C-CH₄ m⁻² h⁻¹ no começo de março de 2012, apresentando apenas um pico de emissão de 38,30 µg C-CH₄ m⁻² h⁻¹ na metade de março de 2012. Essa emissão pode ser resultado da competição do NH₄⁺ (Fig. 2d) com o CH₄ pela enzima monooxigenase, observada com o aumento dos teores de NH₄⁺ coincidindo com o período de maior emissão de CH₄ (BOECKX et al., 1997; MOSIER et al., 1997).

O tratamento E2 oxidou CH₄ na maioria das avaliações, apresentando emissão de CH₄ no final de novembro de 2011 até o início de março de 2012, período em que a temperatura no solo foi mais elevada (superiores a 20 °C; Fig. 2b). Esse aumento de temperatura favorece as condições necessárias para o desenvolvimento de bactérias metanogênicas aumentando a

emissão de CH₄ para a atmosfera (DALAL et al., 2008; ZHU et al., 2007). A emissão de CH₄ no E2 é favorecida pela menor cobertura vegetal e menor aporte de MO proporcionada pela floresta jovem, em comparação às plantas mais desenvolvidas (DALAL et al., 2008; ALLEN et al., 2009).

O CN apresentou oxidação de CH₄ na maioria dos dias avaliados, com um pico de emissão de 66,59 $\mu\text{g C-CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ no começo de fevereiro de 2012 e um período de emissão média de 26 $\mu\text{g C-CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ durante o mês de junho de 2012. Essas emissões podem estar relacionadas às suaves alterações edafoclimáticas locais, como temperaturas mais altas, frequência de precipitação e aumento dos teores de NH₄⁺, que somados favorecem as condições para a ocorrência de emissão do CH₄. A oxidação obtida nos tratamentos E4, E4-s, E2 e CN foram menores que as observada por Werner et al. (2006) em plantios florestais na China, com médias próximas a $-25 \mu\text{g C-CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ e maior que a verificada por Guckland et al. (2009) em florestas temperadas da Alemanha, valores entre 0 e 78 $\mu\text{g C-CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. O baixo EPPA medido nestes estudos favorece as condições edafoclimáticas para a ocorrência do processo de oxidação do CH₄.

A MN apresentou fluxo de CH₄ (Fig. 1b) normalmente abaixo de zero durante o período amostrado, com a oxidação do CH₄ variando de $-114,02$ a $1,46 \mu\text{g C-CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ e apenas um pico de emissão de $42,88 \mu\text{g C-CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ no começo de março, que coincidiu com o aumento na frequência de precipitação (Fig. 2a). A oxidação observada na MN se deve principalmente ao elevado aporte de MO ao solo, que pode melhorar as condições físicas, químicas e biológicas do solo favorecendo o maior EPPA (Fig. 2c) e a formação de condições propícias à oxidação de CH₄ (DALAL et al., 2008; BOECKX et al., 1997). A emissão de CH₄ na MN em março também pode ser consequência da competição do NH₄⁺ com o CH₄, indicada pelo aumento dos teores de NH₄⁺ no solo coincidindo com os períodos de emissão de CH₄ (BOECKX et al., 1997). A oxidação observada na MN foi superior aos valores medidos em silvicultura neste estudo e nos estudos de Allen et al. (2009) que obteve variação entre -1 e $-50 \mu\text{g C-CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, com cultivo de eucalipto e pinus em diferentes regiões. O solo sob vegetação de MN apresenta melhores condições químicas, físicas e biológicas em relação aos solos cultivados (REES et al., 2005), podendo favorecer a ocorrência dos processos responsáveis pela oxidação do CH₄. O fluxo de CH₄, neste estudo, não apresentou correlação significativa com as variáveis ambientais N mineral, EPPA e temperatura do solo (Tabela 2).

3.2 Aporte de serrapilheira

A taxa de aporte de serrapilheira (Fig. 3) apresentou discreta diferença entre os tratamentos avaliados. Os tratamentos E4 e MN apresentaram maior aporte de serrapilheira entre os meses de setembro de 2011 e fevereiro de 2012, período em que o clima estava mais seco e a temperatura apresentou-se mais elevada. A MN obteve um pico de aporte de serrapilheira entre os meses de junho e julho de 2012, período em que ocorreram maiores fenômenos de geadas na região. O tratamento E2 apresentou menor aporte de serrapilheira em relação aos demais tratamentos, sendo as menores taxas no começo do estudo até o mês de novembro de 2011. O E2 obteve maior aporte de serrapilheira entre os meses de dezembro de 2011 e fevereiro de 2012. Esse menor aporte de serrapilheira no tratamento E2 em relação ao E4 é explicado pelo estágio de desenvolvimento do eucalipto. Plantas jovens podem adicionar menor quantidade de serrapilheira ao solo se comparado com plantas mais desenvolvidas.

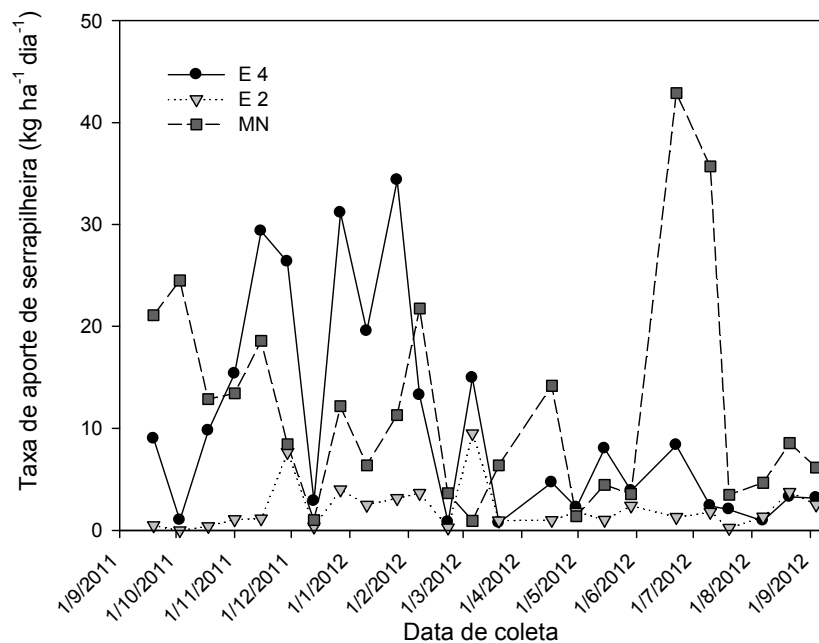


Fig. 3. Aporte de serrapilheira em um Argissolo Vermelho-Amarelo nos diferentes usos do solo no período de um ano. Cacequi (2012). E4: eucalipto com 4 anos de cultivo; E2: eucalipto com 2 anos de cultivo; MN: mata nativa.

A retirada da serrapilheira não alterou significativamente os fluxos de N_2O e CH_4 na silvicultura com eucalipto. Os fluxos de N_2O e CH_4 nos tratamentos E4 e E4-s foram semelhantes entre si na maioria dos dias avaliados. Esse resultado sugere que a ação dos

microorganismos presentes na serrapilheira sobre os fluxos de N_2O e CH_4 foi imperceptível em relação aos fluxos do solo. O fluxo de N_2O no E4-s (Fig. 1a) mostrou-se estável durante o período avaliado, apresentando taxas geralmente próximas de zero e levemente superiores ao E4. O E4 apresentou picos de influxo de N_2O entre março e abril de 2012, sendo que esse influxo não foi visualizado no E4-s, podendo indicar influência da retirada da serrapilheira nesse período. A oxidação de CH_4 no tratamento E4-s (Fig. 1b) foi ligeiramente superior à oxidação observada no E4. O E4-s apresentou emissão de CH_4 no começo do estudo entre os meses de setembro e dezembro de 2011, mesmo período de maior emissão do tratamento E4, após esse período o E4-s apresentou oxidação de CH_4 .

3.3 Emissões acumuladas de N- N_2O e C- CH_4

As emissões acumuladas de N- N_2O (Fig. 4a) não mostraram diferença significativa para os tratamentos analisados, com variação de 99 a 328 g N- N_2O ha⁻¹ ano⁻¹. Esses resultados podem ser explicados pelos teores baixos de NH_4^+ e NO_3^- , com valores geralmente inferiores a 10 mg dm⁻³ e 6 mg dm⁻³, respectivamente, na maioria dos dias avaliados, somado ao baixo EPPA registrado no período (Fig. 2c). Khalil & Baggs (2005), avaliando o efeito do EPPA no fluxo de N- N_2O , observaram que a emissão desse gás diminui quando o solo possui teores baixos de N mineral aliado ao menor EPPA. Comparando a emissão acumulada de 99 e 328 g N- N_2O ha⁻¹ ano⁻¹ dos tratamentos E4 e E2, respectivamente, o tratamento E2 apresentou tendência de maior emissão acumulada de N- N_2O que o E4. Essa tendência no E2 pode ser atribuída à idade da planta, uma vez que solos de florestas jovens podem emitir mais gases para a atmosfera (ALLEN et al., 2009), devido a pouca cobertura vegetal no solo durante o período de crescimento das plantas, deixando o solo mais vulnerável às variações climáticas de precipitação e temperatura. A presença de cobertura vegetal no solo pode auxiliar na proteção do solo contra as variações de temperatura e umidade, favorecendo a menor emissão de N- N_2O (MALJANEN et al., 2002).

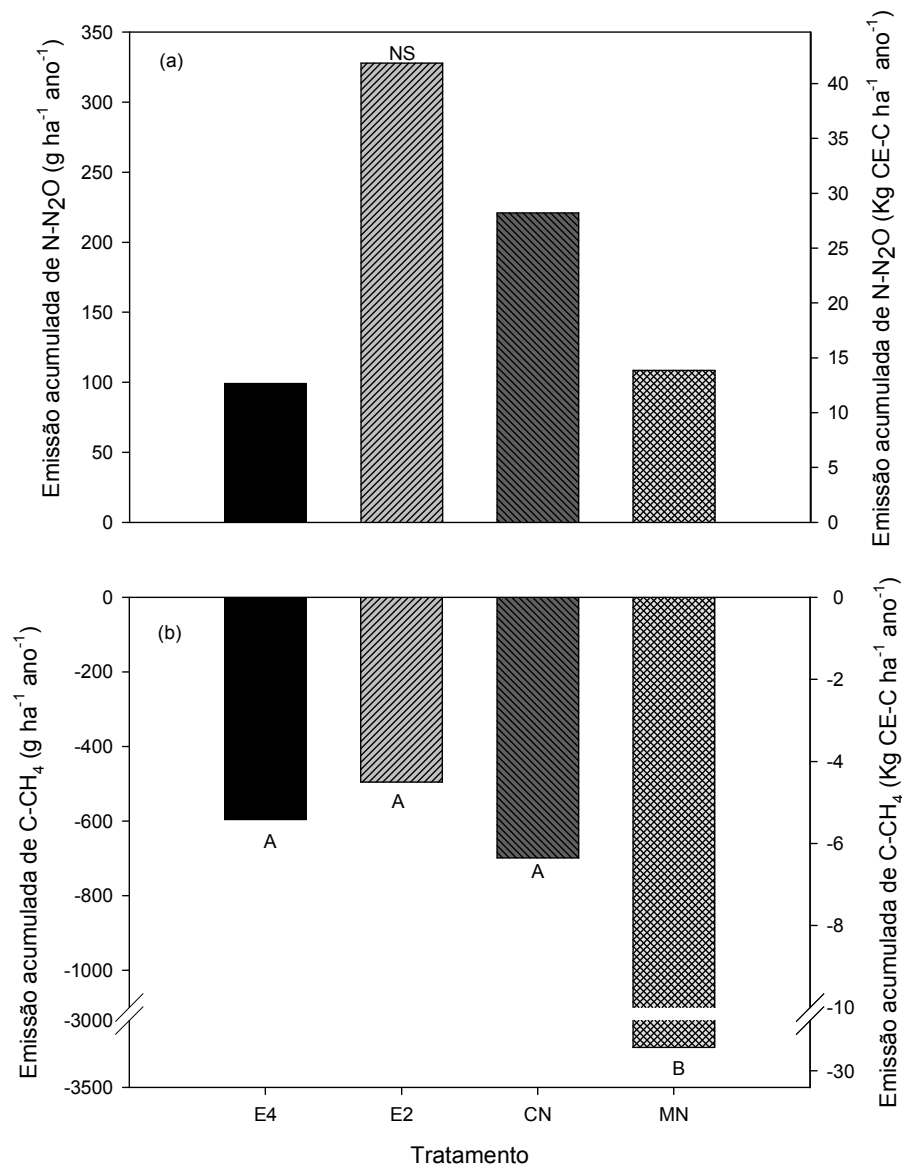


Fig. 4. Emissão acumulada de N-N₂O (a) e C-CH₄ (b) em um Argissolo Vermelho-Amarelo nos diferentes usos do solo no período de um ano. Cacequi (2012). E4: eucalipto com 4 anos de cultivo; E2: eucalipto com 2 anos de cultivo; CN: campo nativo (área de referência); MN: mata nativa. A, B: teste de Tukey ($P < 0,05$); NS: diferença não significativa entre os tratamentos avaliados.

O CN e a MN obtiveram emissões acumuladas de 221 e 108 g N-N₂O ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente. As emissões nas áreas de CN e MN podem ser resultado dos processos de nitrificação e desnitrificação, visto que estes tratamentos apresentaram tendência em maiores teores de N mineral em relação aos demais tratamentos. A partir de janeiro de 2012 os teores de NH₄⁺ e NO₃⁻ (Fig. 2d e 2e), apresentaram-se mais elevados nestes tratamentos, período em que houve aumento da frequência de precipitação (Fig. 2a), coincidindo com o período de

temperaturas mais altas no solo (Fig. 2b). Os aumentos nos teores de NO_3^- ocorreram logo após os picos de NH_4^+ , confirmando a relação entre eles através do processo de nitrificação. As emissões acumuladas de $\text{N-N}_2\text{O}$, medidas neste estudo, não apresentaram correlação significativa com as características de solo, como COT, NT e COP (Tabela 3).

Os fluxos acumulados de C-CH_4 (Fig. 4b) apresentaram oxidação para todos os tratamentos avaliados neste estudo. Estes resultados foram favorecidos principalmente pela menor precipitação do período avaliado, que resultou em baixo EPPA (CASTRO et al., 1994; BORKEN et al., 2005), em adição a baixos teores de N mineral do solo devido, provavelmente, à ciclagem eficiente deste nutriente no sistema solo-planta do CN e da MN e à baixa entrada de N pela serrapilheira do eucalipto. Nos tratamentos E4, E2 e CN os fluxos foram semelhantes, variando entre $-699 \text{ g C-CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ no CN e $-495 \text{ g C-CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ no E2, resultados que podem ter relação com a textura mais arenosa nas camadas até 40 cm destes tratamentos (teores de areia variando de 850 g kg^{-1} a 691 g kg^{-1} no CN e no E4, respectivamente; Tabela 1). Maiores teores de areia favorecem a aeração do solo, beneficiando a comunidade de bactérias metanotróficas (BOECKX et al., 1997).

A MN apresentou a maior oxidação de C-CH_4 ($-3200 \text{ g C-CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$). Esse resultado se deve principalmente aos elevados conteúdos de COT, COP e NT presentes no solo de MN (Fig. 5), que contribuíram para melhorar a qualidade deste solo (LAL, 2004; DALAL et al., 2008), proporcionando que o solo de MN funcionasse como um dreno de C-CH_4 . Elevados estoques de COT e NT, cobertura vegetal e ciclagem eficiente de nutrientes no sistema solo-planta contribuem para manter a estabilidade do solo frente às variações ambientais de temperatura e umidade, contribuindo para aumentar as condições favoráveis à oxidação de CH_4 (DALAL et al., 2008; BAYER et al., 2005; DIEKOW et al., 2005). Os fluxos acumulados de C-CH_4 apresentaram correlação significativa com os estoques de COT, COP e NT no solo ($P < 0,01$; Tabela 3), confirmando a importância destes fatores no conjunto de situações que oportunizam a oxidação de CH_4 .

Tabela 3

Correlação de Pearson ($P < 0,05$) entre o fluxo acumulado de gases do solo e os estoques de COT, NT e COP no solo ($n= 5$) em um Argissolo Vermelho-Amarelo. Cacequi, 2012.

Emissão acumulada		Estoque de COT ¹				Estoque de NT ²				Estoque de COP ³		
		0-5*	0-10*	0-20*	0-100*	0-5*	0-10*	0-20*	0-100*	0-5*	0-10*	0-20*
N ₂ O	r	-0,375	-0,364	-0,365	-0,310	-0,398	-0,381	-0,359	-0,198	-0,425	-0,405	-0,390
	P	0,534	0,547	0,546	0,612	0,507	0,527	0,553	0,749	0,476	0,498	0,517
CH ₄	r	-0,969	-0,966	-0,966	-0,889	-0,974	-0,969	-0,963	-0,896	-0,976	-0,976	-0,972
	P	0,007	0,007	0,008	0,043	0,005	0,007	0,008	0,039	0,004	0,004	0,006

¹ Carbono orgânico total

² Nitrogênio total

³ Carbono orgânico particulado

* Camadas do solo em cm

3.4 Carbono orgânico total e nitrogênio total no solo

Os tratamentos E4, E2 e CN apresentaram teores de COT e NT semelhantes para a maioria das camadas ao longo do perfil do solo (Fig. 5a e 5c). Nas camadas superiores (0 – 40 cm) os teores de COT e NT nos tratamentos E4, E2 e CN variaram entre 10,5 e 3,8 g kg⁻¹ solo para o COT e entre 1,0 e 0,4 g kg⁻¹ solo para o NT. Os tratamentos E4 e E2 apresentaram teores mais altos de COT e NT do que a MN e o CN nas camadas a partir de 60 cm. Esse acréscimo nos teores de COT e NT nos tratamentos E4 e E2 pode ser explicado pelo aumento no teor de argila no decorrer do perfil do solo (Tabela 1), variando de 54 para 168 g kg⁻¹ no E4 e de 74 para 154 g kg⁻¹ no E2. A argila proporciona proteção física a MO, retendo-a no interior de seus agregados, o que favorece o acúmulo de COT no solo (LIMA et al., 2008; BOECKX et al., 1997).

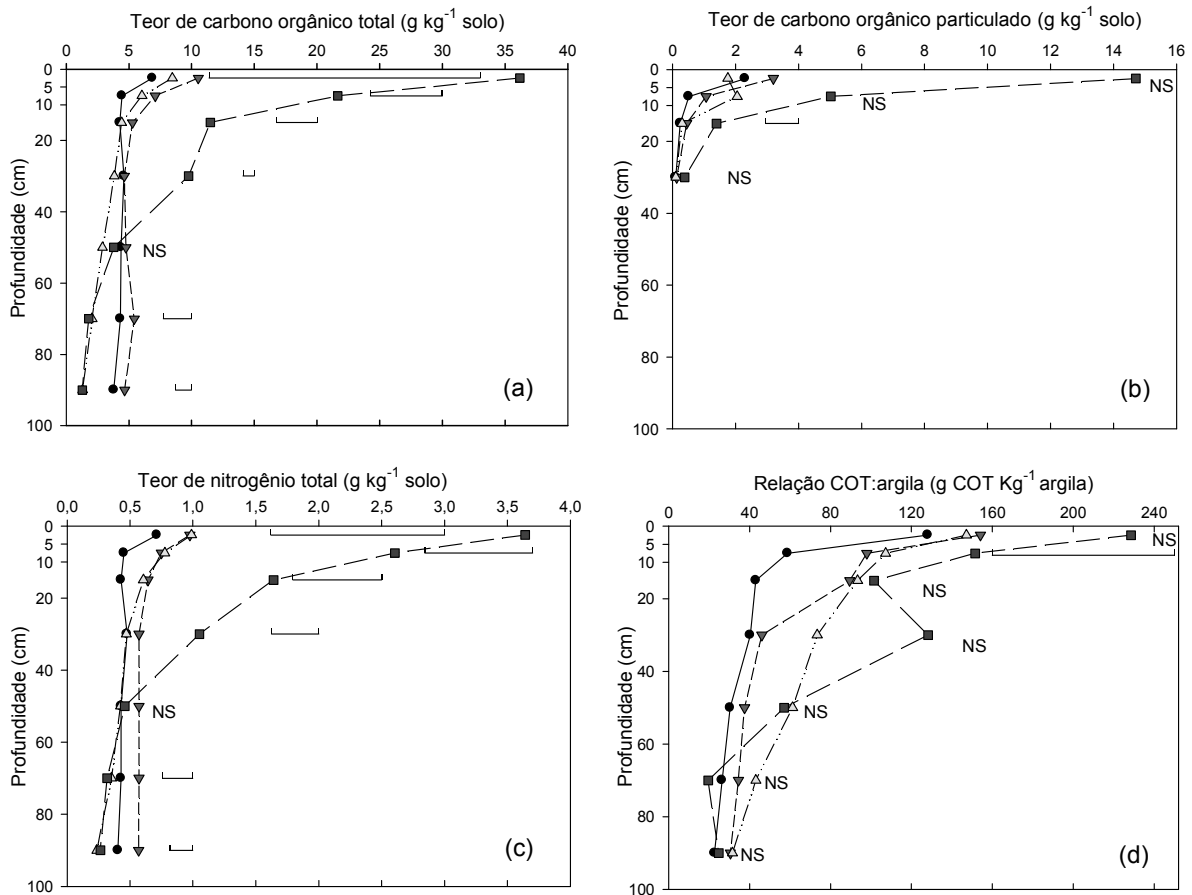


Fig. 5. Teor de COT (a), de COP (b) e de NT (c) e relação COT:argila (d) no solo em um Argissolo Vermelho-Amarelo nos diferentes usos do solo. Cacequi (2012). E4: eucalypto com 4 anos de cultivo; E2: eucalypto com 2 anos de cultivo; CN: campo nativo (área de referência); MN: mata nativa. As barras horizontais indicam a diferença mínima significativa pelo teste de Tukey ($P < 0,05$) entre os tratamentos avaliados dentro da respectiva camada de solo. NS: diferença não significativa.

A MN apresentou valores de COT e NT (Fig. 5a e 5c) maiores que os demais tratamentos nas camadas superiores (0 – 40 cm), com valores variando de 36,2 a 9,8 g kg⁻¹ solo para o COT e de 3,6 a 1,0 g kg⁻¹ solo para o NT. Esse resultado se deve provavelmente à textura mais argilosa e flora variada, que favorecem o acúmulo de MO no solo da MN (LAL, 2004; GATTO et al., 2010; LIMA et al., 2008). Nas camadas inferiores, a partir dos 40 cm, os teores de COT e NT da MN reduziram significativamente para 1,3 g kg⁻¹ solo e 0,3 g kg⁻¹ solo na camada 80 – 100 cm, respectivamente. Estes resultados se devem principalmente à textura arenosa do solo de MN nas camadas mais profundas (BOECKX et al., 1997; LOSS et al., 2009).

A inserção da silvicultura em áreas de CN não indicou alteração significativa no teor de COP (Fig. 5b), nas condições deste estudo. Os valores de COP variaram entre 0,1 e 3,2 g kg⁻¹ solo nas camadas 0 – 40 cm nos tratamentos E4, E2 e CN. Esse resultado pode ser consequência da maior adição de MO ao solo de eucalipto através da serrapilheira (REES et al., 2005), que auxilia a manter o conteúdo de COP semelhante ao CN mesmo após o processo de mudança de uso do solo. Neste sentido, a silvicultura nas condições do presente estudo possui potencial para manutenção do conteúdo de C no solo em condições similares a áreas de vegetação nativa, com menor perturbação deste em relação a outros usos do solo. Já a MN indicou tendência a apresentar maiores teores de COP no solo, valores entre 0,4 e 14,7 g kg⁻¹ solo na camada 0 – 40 cm. Este resultado evidencia as qualidades químicas, físicas e biológicas do solo de MN, que promovem melhor estabilidade ao solo em relação aos demais tratamentos.

A relação COT:argila (Fig. 5d) mostrou diferença significativa apenas na camada 5 – 10 cm com valores de 151, 107, 98 e 59 g COT kg⁻¹ argila para os tratamentos MN, CN, E2 e E4, respectivamente. A MN apresentou tendência à maior relação COT:argila nas camadas superficiais até 40 cm, com valores variando de 229 a 101 g COT kg⁻¹ argila. Após os 40 cm, a relação COT:argila da MN reduziu significativamente para 19,5 g COT kg⁻¹ argila. Essa redução pode estar associada ao menor teor de argila (Tabela 1) nas camadas mais profundas do solo sob MN. O tratamento E4 apresentou tendência à menor relação COT:argila no decorrer do perfil do solo, valores variando de 128 a 22,6 g COT kg⁻¹ argila. O tratamento CN indicou tendência a maiores valores na relação COT:argila a partir dos 60 cm, embora tenha apresentado teores mais baixos de COT no solo destas camadas do que o eucalipto. Esse resultado sugere que o eucalipto até os quatro anos possui menor eficiência no sequestro de C no solo na forma de húmus que o CN. Os resultados da relação COT:argila apontam para a importância do teor de argila no solo, proporcionando o armazenamento de COT nas camadas mais profundas, melhorando assim as condições físicas, químicas e biológicas não somente nas camadas superficiais do solo (LAL, 2004; BOECKX et al., 1997; KAHLE et al., 2003).

Os tratamentos E4 e E2 não apresentaram diferença significativa entre si nos estoques de COT e NT no solo (Fig. 6a e 6b), com estoques de 67,4 e 81,3 Mg ha⁻¹ para o COT, respectivamente e de 6,9 e 9,2 Mg ha⁻¹ para o NT, respectivamente. O E2 indicou tendência a valores maiores que o E4 tanto para os estoques de COT quanto para o NT. Esse resultado pode ser consequência da vegetação nativa ainda presente nesta área juntamente com a jovem plantação de eucalipto, o que aumenta a adição de MO somada à baixa taxa de decomposição do C. Este resultado foi obtido, também, por Wiesmeier et al. (2009) estudando plantações de

Pinus com 8 e 30 anos, no qual o Pinus de 8 anos obteve maiores valores para COT e NT no solo.

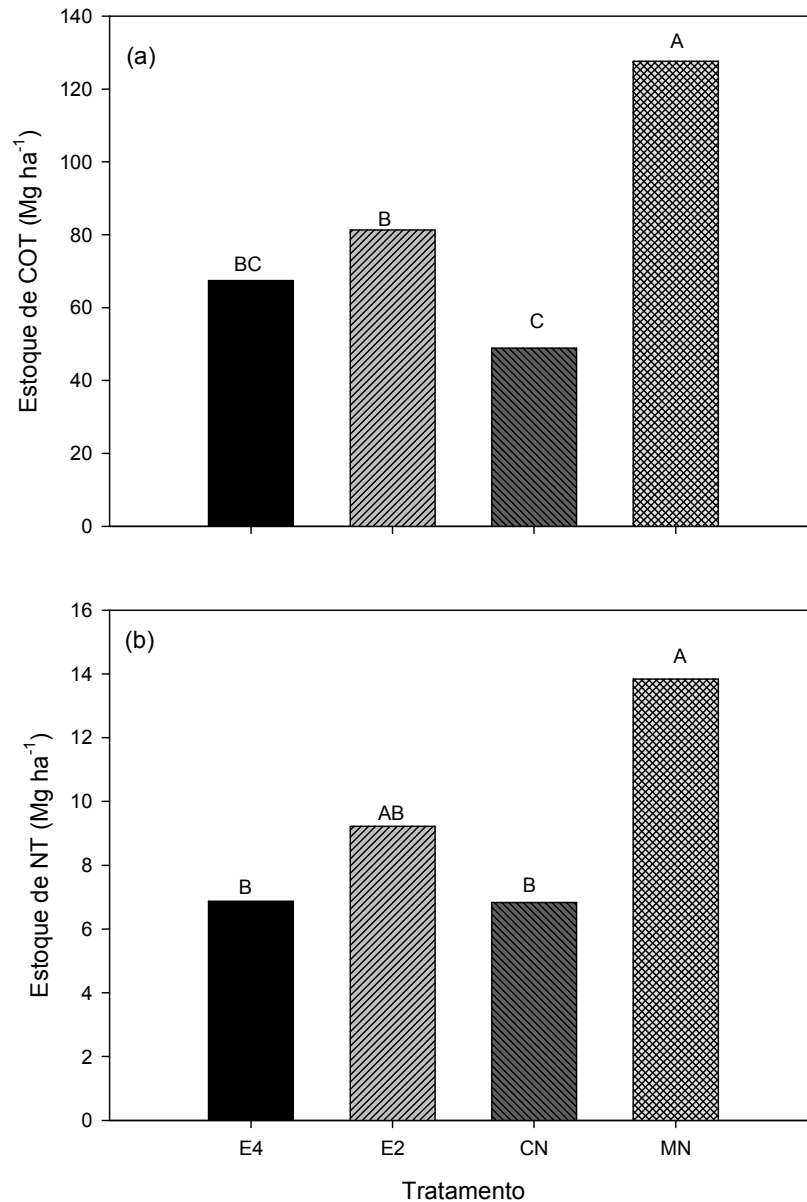


Fig. 6. Estoque de COT (a) e NT (b) no solo na profundidade 0 – 100 cm em um Argissolo Vermelho-Amarelo nos diferentes usos do solo. Cacequi (2012). E4: eucalipto com 4 anos de cultivo; E2: eucalipto com 2 anos de cultivo; CN: campo nativo (área de referência); MN: mata nativa; A, B, C: teste de Tukey ($P < 0,05$).

O solo sob MN apresentou maiores estoques de COT no solo, $127,6 \text{ Mg ha}^{-1}$, semelhantes às 122 Mg ha^{-1} estimadas por Lal (2004) para florestas tropicais. A MN também apresentou o maior estoque de NT no solo, de $13,8 \text{ Mg ha}^{-1}$. Esse resultado se deve

principalmente ao maior teor de COT e NT nas camadas superiores, consequência provavelmente do maior teor de argila nestas camadas, que auxilia na retenção de água, nutrientes e MO (BOECKX et al., 1997; LIMA et al., 2008), favorecendo o aumento dos estoques de COT e NT do solo. O CN alcançou os menores estoques de COT e NT no solo, com 48,9 e 6,8 Mg ha⁻¹, respectivamente. Tais resultados, como anteriormente discutido, apresentam relação com os baixos teores de argila presentes ao longo do perfil do solo e o menor aporte de resíduos vegetais neste tratamento em comparação a silvicultura e a MN.

3.5 Potencial de Aquecimento Global (PAG) parcial

O PAG parcial (Fig. 7) calculado neste estudo não apresentou diferença significativa entre os tratamentos, com valores variando de -15,3 kg CE-C ha⁻¹ ano⁻¹ na MN até 37,4 kg CE-C ha⁻¹ ano⁻¹ no E2. O E4 indicou menor PAG parcial, de 7,2 kg CE-C ha⁻¹ ano⁻¹, valor inferior ao tratamento CN, que obteve PAG parcial de 21,9 kg CE-C ha⁻¹ ano⁻¹. A MN foi o único tratamento que apresentou tendência para mitigar o aquecimento global, com PAG negativo de -15,3 kg CE-C ha⁻¹ ano⁻¹. Estes resultados evidenciam a importância da cobertura vegetal no solo para o balanço de GEE. Solos com maior aporte de serrapilheira, como a MN, aumentam o estoque de C no solo, podendo melhorar suas características químicas, físicas e biológicas, tendendo a menor emissão de N₂O e CH₄. Já em solos com menor aporte de serrapilheira, como CN, o solo fica mais susceptível às variações de temperatura na superfície do solo e a perda de umidade, fatores que podem favorecer a emissão de N₂O e CH₄ (BOECKX et al., 1997; DALAL et al., 2008; SIMEK et al., 2002).

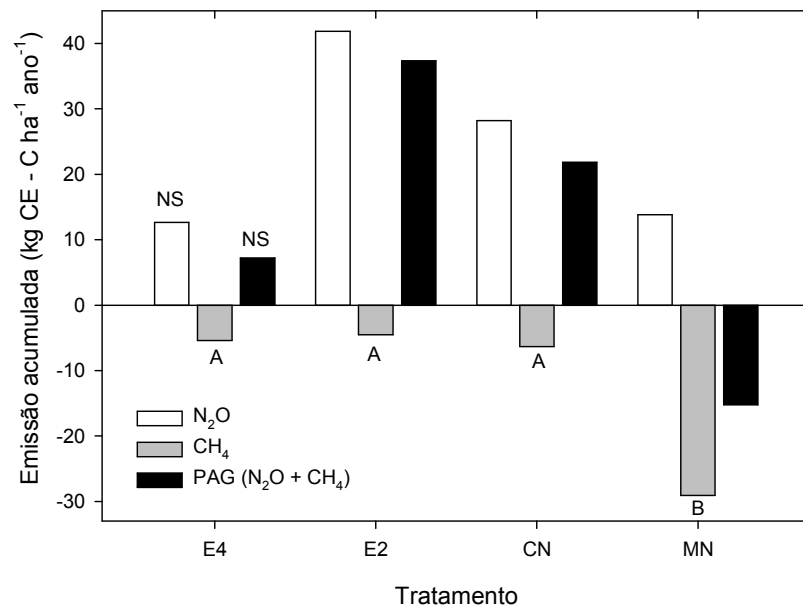


Fig. 7. Estimativa do Potencial de Aquecimento Global (PAG em kg CE ha⁻¹ ano⁻¹) parcial em um Argissolo Vermelho-Amarelo nos diferentes usos do solo. Cacequi (2012). E4: eucalipto com 4 anos de cultivo; E2: eucalipto com 2 anos de cultivo; CN: campo nativo (área de referência); MN: mata nativa; A, B: teste de Tukey ($P < 0,05$); NS: diferença não significativa entre os tratamentos avaliados.

O E2 tendeu a maior PAG (37,4 kg CE-C ha⁻¹ ano⁻¹), corroborando com outros estudos, os quais indicam que solos sob florestas jovens possuem maior potencial para emissão de N₂O e CH₄ que solos sob florestas mais desenvolvidas (ALLEN et al., 2009). No entanto, os fluxos de N₂O e CH₄ foram baixos neste estudo, indicando que estes não são determinantes para o resultado final do PAG na silvicultura, mas sim o sequestro C via produtos madeireiros. De acordo com Paixão et al. (2006) e Gatto et al. (2010) o eucalipto em idade adulta pode sequestrar entre 11,85 e 14,15 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ de C em produtos madeireiros, comprovando o potencial sequestro de C da silvicultura. A silvicultura com eucalipto em solos do Pampa Gaúcho pode representar uma alternativa de mitigação da emissão de GEE principalmente pela oxidação do CH₄ constatada nos tratamentos estudados e o potencial para o sequestro de C via produtos madeireiros do eucalipto.

4. Conclusões

A inserção de silvicultura com eucalipto não alterou significativamente os fluxos de CH₄ e N₂O do solo em relação à área sob CN. O solo sob MN apresentou maior mitigação das

emissões de GEE em relação aos fluxos de CH₄ e N₂O, em comparação aos demais tratamentos avaliados.

A retirada da serrapilheira na silvicultura não alterou significativamente os fluxos de CH₄ e N₂O.

O fluxo de CH₄ apresentou-se negativo ou levemente positivo em todos os tratamentos, no período avaliado.

O fluxo de N₂O não apresentou correlação com as variáveis ambientais e de solo no período avaliado. O fluxo de CH₄ correlacionou-se com os estoques de COT, COP e NT.

A silvicultura com eucalipto até o 4º ano de plantio não afetou de forma significativa os estoques de COT e NT em relação ao CN, neste estudo.

A MN obteve estoques maiores de COT e NT que os demais tratamentos avaliados.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Empresa Florestal Granflor pela concessão do local para a realização do estudo. Este trabalho foi desenvolvido com apoio financeiro do CNPq (481305/2010-6) e FAPERGS (1013351/2010).

Referências

ABRAF – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico**. Ano base, 2007. Brasília: 2008. 90 p.

ABRAF – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico da ABRAF 2011, ano base 2010 / ABRAF**. Brasília: 2011. 130 p.

ALLEN, D. E., MENDHAM, D. S., BHUPINDERPAL-SINGH, COWIE, A., WANG, W., DALAL, R. C. & RAISON, R. J. Nitrous oxide and methane emissions from soil are reduced following afforestation of pasture lands in three contrasting climatic zones. **Australian Journal of Soil Research**, v. 47, p. 443–458, 2009.

BAYER, C., MARTIN-NETO, L., MIELNICZUK, J., DIECKOW, J. & AMADO, T. J. C. C and N stocks and the role of molecular recalcitrance and organomineral interaction in stabilizing soil organic matter in a subtropical Acrisol managed under no-tillage. **Geoderma**, 2005.

BLAIR, G. J., LEFROY, R. D. B. & LISLE, L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index, for agricultural systems. **Aust. J. Agric. Res.** 46, p.1459–1466, 1995.

- BLAIR, N. Impact of cultivation and sugar-cane green trash management on carbon fractions and aggregate stability for a Chromic Luvisol in Queensland, Australia. **Soil & Tillage Research**, 55, p. 183-191, 2000.
- BOECKX, P., VAN CLEEMPUT & VILLARALVO, I. Methane oxidation in soils with different textures and land use. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 49, n. 1-3, p. 91-95, 1997.
- BORKEN, W., DAVIDSON, E. A., SAVAGE, K., SUNDQUIST, E. T. & STEUDLER, P. Effect of summer throughfall exclusion, summer drought, and winter snow cover on methane fluxes in a temperate forest soil. **Soil Biology & Biochemistry [S.I.]**, v. 38, p. 1388-1395, 2005.
- CERRI, C. C. et al. Greenhouse gas mitigation options in Brazil for land-use change, livestock and agriculture. **Sci. Agric.**, v. 67, n. 1, p. 102-116, January/February, 2010.
- COSTA, F. de S., GOMES, J., BAYER, C. & MIELNICZUK, J. Métodos para avaliação das emissões de gases do efeito estufa no sistema solo-atmosfera. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n. 2, p. 693-700, mar-abr, 2006.
- CASTRO, M. S., MELILLO, J. M., STEUDLER, P. A. & CHAPMAN, J. W. Soil moisture as a predictor of methane uptake by temperate forest soils. **Journal of Forest Research [S.I.]**, v. 24, p. 1805-1810, 1994.
- DALAL, R. C., ALLEN, D. E., LIVESLEY, S. J. & RICHARDS, G. Magnitude and biophysical regulators of methane emission and consumption in the Australian agricultural, forest, and submerged landscapes: a review. **Plant and Soil**, v. 309, p. 43-76, 2008.
- DIEKOW, J., MIELNICZUK, J., KNICKER, H., BAYER, C., DICK, D. P. & KÖGEL-KNABNER, I. Carbon and nitrogen stocks in physical fractions of a subtropical Acrisol as influenced by long-term no-till cropping systems and N fertilization. **Plant and Soil**, 268, p. 319-328, 2005.
- ECOAR – Instituto Ecoar para Cidadania. **Efeito estufa**. São Paulo, 2003. 5p.
- ELLERT, B. H. & BETTANY, J. R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. **Can. J. Soil Sci.** 75, 529-538, 1995.
- EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solo / Centro Nacional de Pesquisa de Solos**. 2 ed. rev. atual. Rio de Janeiro: 1997. 212 p.
- GATTO A. et al. Estoques de carbono no solo e na biomassa em plantações de eucalipto. **R. Bras. Ci. Solo**, 34, p. 1069-1079, 2010.
- GOMES, J. **Emissão de Gases de Efeito Estufa e Mitigação do Potencial de Aquecimento Global por Sistemas Conservacionistas de Manejo do Solo**. 2006. 129p. Tese (Doutorado) – Curso de Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2006.
- GOMES, J., BAYER, C., COSTA, F. S., PICCOLO, M. C., ZANATTA, J. A., VIEIRA, F. C. B. & SIX J. Soil nitrous oxide emissions in long-term cover crops-based rotations under subtropical climate. **Soil and Tillage Research**, 106, p. 36-44, 2009.
- GUCKLAND, A., FLESSA, H. & PRENZEL, J. Controls of temporal and spatial variability of methane uptake in soils of a temperate deciduous forest with different abundance of European beech (*Fagus sylvatica* L.). **Soil Biology & Biochemistry**, 41, p. 1659-1667, 2009.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**, 2007.

KAHLE, M., KLEBER, M., TORN, M. S. & JAHN, R. Carbon Storage in Coarse and Fine Clay Fractions of Illitic Soils. **Soil Sci. Soc. Am.**, J. 67, p. 1732–1739, 2003.

KHALIL, M. I. & BAGGS, E.M. CH₄ oxidation and N₂O emissions at varied soil water-filled pore spaces and headspace CH₄ concentrations. **Soil Biology & Biochemistry**, 37, p. 1785–1794, 2005.

LAL, R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. **Geoderma**, v. 123, n. 1-2, p. 1–22, 2004.

LIMA, A. M. N. et al. Frações da matéria orgânica do solo após três décadas de cultivo de eucalipto no vale do Rio Doce-MG. **R. Bras. Ci. Solo**, 32: 1053-1063, 2008.

LIU, Y., ZHU, R., MA, D., XU, H., LUO, Y., HUANG, T. & SUN, L. Temporal and spatial variations of nitrous oxide fluxes from the littoral zones of three alga-rich lakes in coastal Antarctica. **Atmospheric Environment**, 45, p. 1464–1475, 2011.

LOSS, A., PEREIRA, M. G., TEIXEIRA, M. B., LIMA, F. M., OLIVEIRA, A. B. & CRUZ, R. B. Frações orgânicas do solo em áreas sob manejo agroecológico em Capivari, Duque de Caxias, RJ. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**. v. 4, n. 3, p. 245-251, jul.-set., 2009.

LOU, Y., WANG, J. & LIANG, W. Impacts of 22-year organic and inorganic N managements on soil organic C fractions in a maize field, northeast China. **Catena**, 87, p. 386–390, 2011.

MALJANEN, M., MARTIKAINEN, P. J., AALTONEN, H. & SILVOLA, J. Short-term variation in fluxes of carbon dioxide, nitrous oxide and methane in cultivated end forested organic boreal soils. **Soil Biology & Biochemistry**, 34, p. 577-584, 2002.

MALJANEN, M., LIIKANEN, A., SILVOLA, J. & MARTIKAINEN, P. J. Nitrous oxide emissions from boreal organic soil under different land-use. **Soil Biology & Biochemistry**, 35, p. 1–12, 2003.

MOSIER, A. R., DELGADO, J. A., COHRAN, V. L., VALENTINE, D. W. & PARTON, W. J. Impact of agriculture on soil consumption of atmospheric CH₄ and a comparison of CH₄ and N₂O flux in subarctic, temperate and tropical grasslands. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 49, n. 1, p. 73-83, 1997.

PAIXÃO, F. A., SOARES, C. P. B., JACOVINE, L. A. G., SILVA, M. L. da, LEITE, H. G. & SILVA, G. F. da. Quantificação do estoque de carbono e avaliação econômica de diferentes alternativas de manejo em um plantio de Eucalipto. **R. Árvore**, Viçosa, MG: v. 30, n. 3, p. 411-420, 2006.

PAVAN, J. A., ALVES, T. W. & SOUZA, M. A. de. Viabilidade Econômica da Produção de Eucaliptos no Rio Grande do Sul. **ABCustos Associação Brasileira de Custos**. Vol. V nº 1, jan/abr 2010.

REES, R. M., BINGHAM, I. J., BADDELEY, J. A. & WATSON, C. A. The role of plants and land management in sequestering soil carbon in temperate arable and grassland ecosystems. **Geoderma**, 128, p. 130–154, 2005.

SANTIN, M. F. C. de L. & REIS, A. A silvicultura como veículo do desenvolvimento econômico e ambientalmente sustentável na metade sul do Rio Grande do Sul. **VII Encontro da Sociedade Brasileira de Economia Ecológica**. Fortaleza, 28 a 30 de novembro de 2007.

- SCHUMACHER, M. V., BRUM, E. J., RODRIGUES, L. M. & SANTOS, E. M. dos. Retorno de nutrientes via deposição de serapilheira em um povoamento de Acácia-negra (*Acácia mearnsii* de Wild.) no estado do Rio Grande do Sul. **Revista Árvore**, Viçosa, novembro-dezembro, ano/vol. 27, n. 006, p. 791-798, 2003.
- SIMEK, M., JÍSOVÁ, L. & HOPKINS, D. W. What is the so-called optimum pH for denitrification in soil? **Soil Biology & Biochemistry**, v. 34, p. 1227-1234, February, 2002.
- SOUZA, E. D. de, COSTA, S. E. V. G. de A., ANGHINONI, I., CARVALHO, P. C. de F., ANDRIGUETI, M. & CAO, E. Estoques de carbono orgânico e de nitrogênio no solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto, submetido a intensidades de pastejo. **R. Bras. Ci. Solo**, 33, p. 1829-1836, 2009.
- SUN, L., ZHU, R., XIE, Z. & XING, G. Emissions of nitrous oxide and methane from Antarctic Tundra: role of penguin dropping deposition. **Atmospheric Environment**, 36, p. 4977-4982, 2002.
- TEDESCO, M. J. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**, 2 ed. ver. Porto Alegre: Departamento de Solos da UFRGS, 1995. 174 p.
- UGALDE, D., BRUNGS, A., KAEBERNICK, M., MCGREGOR, A. & SLATTERY, B. Implications of climate change for tillage practice in Australia. **Soil & Tillage Research**, 97, p. 318-330, 2007.
- VIEIRA, F. C. B., BAYER, C., ZANATTA, J. A., DIECKOW, J., MIELNICZUK J. & HE, Z. L. Carbon management index based on physical fractionation of soil organic matter in an Acrisol under long-term no-till cropping systems. **Soil & Tillage Research**, 96, p. 195-204, 2007.
- WERNER, C., ZHENG, X., TANG, J., XIE, B., LIU, C., KIESE, R. & BUTTERBACH, K. N₂O, CH₄ and CO₂ emissions from seasonal tropical rainforests and a rubber plantation in Southwest China. **Plant and Soil**, 289, p. 335-353, 2006.
- WESLIEN, P., KLEMEDTSSON, A. K., BORJESSON, G. & KLEMEDTSSON, L. Strong pH influence on N₂O and CH₄ fluxes from forested organic soils. **European Journal of Soil Science**, June 2009, 60, p. 311-320, 2009.
- WIESMEIER, M., DICK, D. P., RUMPEL, C., DALMOLIN, R. S. D., HILSCHER, A. & KNICKER, H. Depletion of soil organic carbon and nitrogen under *Pinus taeda* plantations in Southern Brazilian grasslands (Campos). **European Journal of Soil Science**, June 2009, 60, 347-359, 2009.
- ZANATTA, J. A., BAYER, C., VIEIRA, F. C. B., GOMES, J. & TOMAZI, M. Nitrous oxide and methane fluxes in south Brazilian gleysol as affected by nitrogen fertilizers. **R. Bras. Ci. Solo**, 34, p. 1653-1665, 2010.
- ZHU, R., LIU, Y., SUN, L. & XU, H. Methane emissions from two tundra wetlands in eastern Antarctica. **Atmospheric Environment**. 41, p. 4711-4722, 2007.
- ZHU, R., SUN, L. & DING, W. Nitrous oxide emissions from tundra soil and snowpack in the maritime Antarctic. **Chemosphere**, 59, p. 1667-1675, 2005.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS

Os resultados dos dois estudos aqui apresentados evidenciam que a inserção da silvicultura no Pampa Gaúcho com plantio de *Acacia mearnsii* De Wild e *Eucalyptus saligna* não alterou significativamente a magnitude dos fluxos de CH₄ e N₂O do solo em relação à vegetação nativa predominante na região do Pampa, mantendo fluxos baixos para os dois gases. No entanto, a mata nativa avaliada apresentou maior potencial para mitigação da emissão de CH₄ e N₂O em relação à silvicultura.

Cabe ressaltar que a precipitação abaixo da média prevista para o ano avaliado contribuiu para os baixos fluxos de CH₄ e N₂O no solo. Para compreender melhor estes fluxos em climas subtropicais é necessário avaliar os fluxos destes gases em condições de maior precipitação, principalmente para o cultivo de acácia. A acácia é uma planta leguminosa com potencial para aumento do teor de N mineral do solo, que em condições de maior umidade pode favorecer a emissão de N₂O pelo aumento da ocorrência do processo de desnitrificação.

A retirada da serrapilheira não alterou significativamente os fluxos de CH₄ e N₂O na silvicultura com *A. mearnsii* e *E. saligna*. Porém, a serrapilheira representa um componente de grande importância na ciclagem do C e nutrientes na floresta e, assim sendo, estudos futuros na temática de GEE em solos de silvicultura deveriam focar um aprofundamento na dinâmica e na qualidade da serrapilheira aportada ao solo.

Este estudo não avaliou a emissão de CH₄ e N₂O do solo no período inicial do plantio, após a aplicação de fertilizantes, que podem aumentar os teores de N mineral no solo e favorecer a emissão de N₂O, juntamente com o efeito mais imediato do preparo do solo sobre tais fluxos. Essa análise contribuiria na verificação das alterações ocorridas nos fluxos de gases do solo no período mais crítico quanto à mudança de uso do solo, tanto em termos de magnitude quanto a persistência do impacto do preparo de solo e dos fertilizantes ao longo do ciclo da cultura. A silvicultura com eucalipto foi avaliada em idades de 2 e 4 anos, no entanto este não foi avaliado em florestas adultas. O solo de florestas adultas pode apresentar melhores condições químicas, físicas e biológicas, o que pode interferir nos fluxos de CH₄ e N₂O do solo.

A colheita da *A. mearnsii* promoveu tendência em aumento nas taxas de emissão de N₂O e CH₄ do solo. Após o corte da floresta o solo permaneceu descoberto até o restabelecimento da vegetação nativa. O ideal seria que após a colheita da acácia fosse realizado o plantio imediato da cultura sucessora, a fim de maximizar o aproveitamento dos

nutrientes - com destaque para o N - dos resíduos da acácia, diminuindo assim o potencial de perdas e de contaminação ambiental.

Os fluxos de CH₄ e N₂O do solo sofrem interferência da variabilidade espacial. Em nosso estudo as câmaras de coletas de ar foram distribuídas nas entrelinhas do plantio, no entanto a distribuição das câmaras de coleta nas linhas e entrelinhas pode auxiliar na compreensão dos fluxos destes gases na silvicultura, visto que a linha de plantio é o local onde o solo sofre a maior perturbação durante o processo de plantio das mudas. A distância entre as câmaras e o tamanho destas também pode interferir na percepção da variação dos fluxos dos gases. Logo, o uso de câmaras maiores que as utilizadas neste estudo e a maior distância entre as câmaras são sugestões para melhorar a precisão e a exatidão das variações dos fluxos de CH₄ e N₂O do solo.

A mudança de uso do solo de campo nativo para florestamento com *A. mearnsii* e *E. saligna* não alterou significativamente o estoque de NT, COT e CMOP. A mata nativa obteve estoques maiores de COT e NT que os demais tratamentos. Entretanto, as características do solo, como textura, porosidade e densidade interferem nestes resultados e também nos fluxos de gases. Em vista disso, a avaliação da silvicultura em outros tipos de solo juntamente com os avaliados neste estudo pode auxiliar na compreensão e na confirmação dos resultados aqui apresentados.

Apesar das considerações acima citadas, os dois estudos realizados corroboram com o fato de que a silvicultura na região do Pampa Gaúcho apresenta um elevado potencial para mitigar a problemática dos gases de efeito estufa. Afinal, em relação ao campo nativo, a atividade promove um elevado sequestro de C na biomassa vegetal, além de não alterar significativamente os estoques de carbono no solo e os fluxos de CH₄ e de N₂O do solo.

REFERÊNCIAS

- ABRAF – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico**. Ano base, 2007. Brasília: 2008. 90 p.
- ABRAF – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico da ABRAF 2011, ano base 2010 / ABRAF**. Brasília: 2011. 130 p.
- ALLEN, D. E., MENDHAM, D. S., BHUPINDERPAL-SINGH, COWIE, A., WANG, W., DALAL, R. C. & RAISON, R. J. Nitrous oxide and methane emissions from soil are reduced following afforestation of pasture lands in three contrasting climatic zones. **Australian Journal of Soil Research**, v. 47, p. 443–458, 2009.
- BLAIR, N. Impact of cultivation and sugar-cane green trash management on carbon fractions and aggregate stability for a Chromic Luvisol in Queensland, Australia. **Soil & Tillage Research**, 55, p. 183±191, 2000.
- BOECKX, P., VAN CLEEMPUT & VILLARALVO, I. Methane oxidation in soils with different textures and land use. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 49, n. 1-3, p. 91-95, 1997.
- DALAL, R. C., ALLEN, D. E., LIVESLEY, S. J. & RICHARDS, G. Magnitude and biophysical regulators of methane emission and consumption in the Australian agricultural, forest, and submerged landscapes: a review. **Plant Soil**, v. 309, p. 43–76, 2008.
- FERNANDES, T. J. G., SOARES, C. P. B., JACOVINE, L. A. G. & ALVARENGA, A. de P. Quantificação do carbono estocado na parte aérea e raízes de *Hevea* sp., aos 12 anos de idade, na zona da Mata Mineira. **R. Árvore**, Viçosa, MG: v. 31, n. 4, p. 657-665, 2007.
- FOELKEL, C. Os eucaliptos e as leguminosas – Parte 01: *Acacia mearnsii*. Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel – ABTCP. **Eucalyptus Online Book & Newsletter**, fevereiro de 2008.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Agropecuário 2006: Resultados preliminares**. Rio de Janeiro, p. 1-141, 2007.
- INAGAKI, M. & ISHIZUKA, S. Ecological Impact on Nitrogen and Phosphorus Cycling of a Widespread Fast-growing Leguminous Tropical Forest Plantation Tree Species, *Acacia mangium*. **Diversity**, 3, p. 712-720; doi: 10.3390/d3040712, 2011.
- Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas por Fontes e Remoções por Sumidouros de Gases de Efeito Estufa Não Controlados pelo Protocolo de Montreal**. Brasil, 2012.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**, 2007.
- KONDA, R., OHTA, S., ISHIZUKA, S., HERIYANTO, J. & WICAKSONO, A. Seasonal changes in the spatial structures of N₂O, CO₂, and CH₄ fluxes from *Acacia mangium* plantation soils in Indonesia. **Soil Biology & Biochemistry**, 42, p. 1512 – 1522, 2010.
- LAL, R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. **Geoderma**, v. 123, n. 1-2, p. 1–22, 2004.

- MALJANEN, M., LIIKANEN, A., SILVOLA, J. & MARTIKAINEN, P. J. Nitrous oxide emissions from boreal organic soil under different land-use. **Soil Biology & Biochemistry**, 35, p. 1–12, 2003.
- MARTENS, D. A., EMMERICH, W., MCLAIN, J. E. T. & JOHNSEN, T. N. Atmospheric carbon mitigation potential of agricultural management in the southwestern USA. **Soil & Tillage Research**, v. 83, p. 95–119, 2005.
- MILLAR, N. & BAGGS, E. M. Chemical composition, or quality, of agroforestry residues influences N₂O emissions after their addition to soil. **Soil Biology & Biochemistry**, 36, p. 935–943, 2004.
- MOSIER, A. R. **Soil processes and global change**. *Biol Fertil Soils* [S.I.], v. 27, p. 221–229, 1998.
- MOSIER, A. R., DELGADO, J. A., COHRAN, V. L., VALENTINE, D. W. & PARTON, W. J. Impact of agriculture on soil consumption of atmospheric CH₄ and a comparison of CH₄ and N₂O flux in subarctic, temperate and tropical grasslands. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 49, n. 1, p. 73–83, 1997.
- REDIN, E. & FIALHO, M. A. V. Política Agrícola Brasileira: uma análise histórica da inserção da Agricultura familiar (apresentação oral). **In: 48º Congresso SOBER - Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural**. Campo Grande, 25 a 28 de julho de 2010.
- SANTIN, M. F. C. de L. & REIS, A. A silvicultura como veículo do desenvolvimento econômico e ambientalmente sustentável na metade sul do Rio Grande do Sul. **VII Encontro da Sociedade Brasileira de Economia Ecológica**. Fortaleza, 28 a 30 de novembro de 2007.
- SCHUMACHER, M. V., BRUM, E. J., RODRIGUES, L. M. & SANTOS, E. M. dos. Retorno de nutrientes via deposição de serapilheira em um povoamento de Acácia-negra (*Acácia mearnsii* de Wild.) no estado do Rio Grande do Sul. **Revista Árvore**, Viçosa, novembro-dezembro, ano/vol. 27, n. 006, p. 791–798, 2003.
- TATE, K. R., ROSS, D. J., SAGGAR, S., HEDLEY, C. B., DANDO, J., SINGH, B. K. & LAMBIE, S. M. Methane uptake in soils from *Pinus radiata* plantations, a reverting shrubland and adjacent pastures: Effects of land-use change, and soil texture, water and mineral nitrogen. **Soil Biology & Biochemistry**. V. 39, p. 1437–1449, 2007.
- ULLAH, S., FRASIER, R., KING, L., PICOTTE-ANDERSON, N. & MOORE, T. R. Potential fluxes of N₂O and CH₄ from soils of three forest types in Eastern Canada. **Soil Biology & Biochemistry**, 40, p. 986–994, 2008.
- VIEIRA, F. C. B., BAYER, C., ZANATTA, J. A., DIECKOW, J., MIELNICZUK J. & HE, Z. L. Carbon management index based on physical fractionation of soil organic matter in an Acrisol under long-term no-till cropping systems. **Soil & Tillage Research**, 96, p. 195–204, 2007.
- WERNER, C., ZHENG, X., TANG, J., XIE, B., LIU, C., KIESE, R. & BUTTERBACH, K. N₂O, CH₄ and CO₂ emissions from seasonal tropical rainforests and a rubber plantation in Southwest China. **Plant Soil**, 289, p. 335–353, 2006.
- WESLIEN, P., KLEMEDTSSON, A. K., BORJESSON, G. & KLEMEDTSSON, L. Strong pH influence on N₂O and CH₄ fluxes from forested organic soils. **European Journal of Soil Science**, June 2009, 60, p. 311–320, 2009.