

Estoque de carbono e nitrogênio e emissão de N₂O em diferentes usos do solo na Mata Atlântica

Rodolfo Pellegrini Coutinho⁽¹⁾, Segundo Urquiaga⁽²⁾, Robert Michael Boddey⁽²⁾, Bruno José Rodrigues Alves⁽²⁾, Anatoly Queiroz Abreu Torres⁽³⁾ e Claudia Pozzi Jantalia⁽²⁾

⁽¹⁾Ministério do Meio Ambiente, Serviço Florestal Brasileiro, SCEN, trecho 2, Bloco H, CEP 70.818-900 Brasília, DF. E-mail: rodolfo.coutinho@florestal.gov.br ⁽²⁾Embrapa Agrobiologia, Caixa Postal 74.505, CEP 23890-000 Seropédica, RJ. E-mail: urquiaga@cnpab.embrapa.br, bob@cnpab.embrapa.br, bruno@cnpab.embrapa.br, claudia@cnpab.embrapa.br, ⁽³⁾Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Departamento de Ciência do Solo, CEP 23890-000 Seropédica, RJ. Email: anatoly_torres@yahoo.com

Resumo – O objetivo deste trabalho foi avaliar o impacto da substituição de pastagens por reflorestamento com eucalipto e mata secundária sobre a dinâmica da matéria orgânica e emissão de N₂O, em áreas da Mata Atlântica. As áreas avaliadas localizam-se no Município de Cruzeiro, SP, e têm histórico comum de uso da terra, tendo sido inicialmente ocupadas por pastagem. Desde 1973, uma parte desta área foi reservada para regeneração natural, outra foi ocupada com plantio de eucalipto e outra permaneceu como pastagem. Para quantificar o estoque de C e nitrogênio do solo e a abundância isotópica de ¹³C na matéria orgânica do solo (MOS), foram coletadas amostras de solo até 1 m de profundidade, com uso de três repetições. A emissão de N₂O foi avaliada com câmaras estáticas pelo período de um ano. Não foram observadas diferenças significativas nos estoques de C e N do solo nas áreas de mata e eucalipto, em relação à pastagem. A mata apresenta maior influência sobre a composição da MOS. Na mata de eucalipto ocorrem as maiores perdas anuais de N, pela emissão de N₂O.

Termos para indexação: abundância isotópica, gases de efeito estufa, matéria orgânica do solo, mudança no uso da terra.

Carbon and nitrogen stocks and N₂O emission under different land use in Atlantic Forest biome

Abstract – The objective of this work was to evaluate the impact on soil organic matter dynamics and N₂O emission of the substitution of pasture areas by eucalyptus reforestation and secondary forest. The evaluated areas are localized in Cruzeiro municipality, São Paulo state, Brazil. The areas presented common soil usage history, and were used, at first, as pasture. Since 1973, part of the area was reserved for regeneration of the secondary forest, another part was planted with eucalyptus, and the remaining was kept as pasture. To quantify the stocks of C, N and in soil and the ¹³C isotopic abundance in soil organic matter (SOM), samples from these areas were collected until 1-m depth, using three replicates. The emission of N₂O was evaluated with static chambers for one year. The three areas did not show significant differences on C and N stocks of the secondary forest and eucalyptus areas, in comparison to the pasture one. Secondary forest and eucalyptus has greater carbon contribution to SOM. Secondary forest and eucalyptus have highest annual losses of N, as N₂O.

Index terms: isotopic abundance, greenhouse effect gases, soil organic matter, land use change.

Introdução

A Mata Atlântica é um dos biomas brasileiros mais alterados por atividades antrópicas. Em algumas regiões, esta situação é mais crítica, como nos estados de São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais. Esta região foi historicamente de grande importância para o desenvolvimento econômico do país e encontra-se, atualmente, com extensas áreas ocupadas por pastagens de baixa produtividade (Boddey et al., 2006). As propriedades físicas, químicas e

biológicas do solo, nestas áreas, estão alteradas em decorrência do manejo e uso inadequados do solo, inicialmente pelo extrativismo e depois pelo manejo agrosilvipastoril (Boddey et al., 2003).

A perda da cobertura florestal reflete negativamente em importantes ciclos biogeoquímicos. Os impactos podem se refletir tanto de forma local, com o desabastecimento de água, como globalmente, pela maior emissão de gases de efeito estufa para a atmosfera. No Brasil, o manejo e a mudança no uso

da terra causaram 75% das emissões de CO₂, e a queima de combustíveis fósseis 25% (Cerri & Cerri, 2007). Pesquisas sobre os efeitos da mudança do uso do solo nas condições brasileiras devem ser ampliadas, considerando-se não apenas os efeitos de estoques de C do solo, mas também os das emissões dos principais gases, como óxido nitroso e metano, para melhor avaliação desses impactos (Jantalia et al., 2008).

Nos últimos anos, os reflorestamentos comerciais de eucalipto estão ocupando áreas de pastagem, principalmente na região Sudeste, e programas de recuperação de matas ciliares vêm tendo incentivo de órgãos públicos e da sociedade civil (Barbosa et al., 2003). A Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul é um exemplo da ampliação deste incentivo, por ser responsável pelo fornecimento de água a cerca de 14 milhões de pessoas, em 180 municípios. No Estado de São Paulo, a bacia hidrográfica desse rio é ocupada principalmente por 57,6% de pastagens e campos, 15,6% de florestas, 12,3% de florestas secundárias, 4,5% de áreas agrícolas e 4,4% de reflorestamentos (Brasil, 2010).

O objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos da mudança de uso do solo, sobre a dinâmica da matéria orgânica do solo e as emissões de N₂O, em áreas de Mata Atlântica nas quais ocorreu a substituição de pastagem de baixa produtividade por reflorestamento com eucalipto e floresta secundária.

Material e métodos

O estudo foi realizado no Sítio Dom Bosco (22°44'38"S e 44°57'31"W, altitude de 700 m), no Município de Cruzeiro, SP, entre as Serras da Mantiqueira e da Bocaina, na porção geográfica do Médio Paraíba do Sul. De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo Cwa, quente e úmido, com inverno seco e precipitação média de 1.500 mm, temperatura média anual de 20°C, com média do mês mais frio inferior a 18°C e a do mês mais quente superior a 22°C. O histórico de uso da terra desta propriedade representa uma situação comum da região. O desmatamento de toda a propriedade ocorreu por volta de 1880 para o plantio de café. Após 1920, todas as áreas da propriedade foram convertidas em pastagem, com predomínio de grama batatais (*Paspalum notatum*). Em 1973, uma área de 40 ha desta pastagem deixou de receber qualquer tipo

de manejo e, por meio do processo de regeneração natural, formou-se uma floresta secundária (Martins et al., 2002).

Em janeiro de 2004, em uma área de 3,5 ha da pastagem adjacente a uma porção de 2 ha da floresta secundária (mata), foi realizado o plantio de eucalipto (*Eucalyptus urograndis*). No plantio das mudas, foi realizada apenas uma roçada e a abertura de covas e o coroamento das mudas foram realizados manualmente. O espaçamento utilizado foi de 3x2 m. Foram aplicados 200 g de superfosfato simples por cova e duas adubações de cobertura, uma aos 90 dias e outra um ano após o plantio, com 80 g de adubo (20-5-20).

Em junho de 2007, foi selecionada uma área de 3 ha na pastagem remanescente, adjacente às áreas de mata e eucalipto. Entre 1997 e 2007, o único manejo realizado nesta área foi a roçada ocasional. As três áreas adjacentes selecionadas para este estudo (mata, eucalipto e pastagem) têm declividade de 35% e o mesmo histórico inicial de desmatamento e implantação da pastagem. Por ocasião da amostragem, a mata estava em regeneração há 34 anos, o plantio de eucalipto tinha 3 anos, e a pastagem 87 anos. A área de pastagem foi considerada como referência para avaliação dos efeitos na mudança da cobertura do solo que ocorrera com a regeneração de mata secundária e o plantio de eucalipto.

Para verificar se o solo sob os três tipos de vegetação teria características físicas e químicas semelhantes, as áreas foram divididas em três subáreas de aproximadamente 50x30 m, no terço médio do declive do terreno. Cada uma destas subáreas foi considerada uma repetição. No centro de cada repetição foi aberta uma trincheira, com cerca de 2,0x1,0x1,1 m. Nestas trincheiras, foram coletadas amostras, com uso do anel de Kopeck, para determinação da densidade do solo, nas profundidades 0-5, 5-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm, com quatro repetições por trincheira. As amostras retiradas para determinação da densidade do solo foram secas em estufa a 105°C, por 48 horas.

Para a determinação da textura e das características químicas do solo, nestas mesmas profundidades, foram retiradas seis amostras simples ao redor de cada trincheira, para formar uma amostra composta. As amostras foram secas ao ar por 72 horas, destorroadas e peneiradas em malha de 2 mm. As análises químicas e granulométricas foram realizadas no Laboratório

de Solos e Nitrogênio, da Embrapa Agrobiologia, e no Laboratório de Física do Solo da Embrapa Solos, e seguiu metodologia da Embrapa (Claessen, 1997). O solo sob estas áreas foi classificado como Latossolo-Vermelho Amarelo distrófico. Os atributos químicos e físicos encontram-se nas Tabelas 1 e 2. A textura, a densidade e a fertilidade do solo, nas diferentes áreas, foram semelhantes.

O preparo das amostras para análise carbono orgânico total (C), nitrogênio total (N) e abundância isotópica de ¹³C, expressa em δ¹³C, foi feito conforme Smith & Myung (1990). A concentração de C do solo foi determinada pelo método de combustão a seco, em um autoanalisador CHN-600 (St. Joseph, Michigan, LECO Corp., USA), no laboratório de solos da Embrapa Agrobiologia; a abundância isotópica de ¹³C da matéria orgânica do solo (MOS) e das raízes foi determinada por um espectrômetro de relação de massa isotópica de fluxo contínuo Finnigan DeltaPlus (Finnigan MAT, Watham, MA, Alemanha). A concentração de nitrogênio do solo foi determinada pelo método de digestão semi-micro Kjeldahl (Bremner & Mulvaney, 1982).

Os estoques de C e N no perfil do solo foram calculados sob a mesma massa de solo até as profundidades de 0–40 cm, para avaliar os efeitos em superfície, e de 0–100 cm, para avaliar todo o perfil. Neste estudo, a quantidade referência de solo, utilizada para ajustar os demais tratamentos, foi a observada sob a área de mata regenerada. Nos demais tratamentos, a massa excedente foi subtraída da camada mais profunda

(20–40 e 80–100 cm), e o conteúdo de C e N totais foram recalculados para este valor ajustado (Neill et al., 1997). Esta correção foi expressa matematicamente por Sisti et al. (2004).

A proporção de C do solo na área de pastagem (plantas C₄) incorporada após a substituição da floresta e a abundância isotópica de ¹³C original do solo foram calculados pela técnica de Balesdent et al. (1988). Para os cálculos, foi utilizada a média dos valores de abundância natural de ¹³C do sistema radicular e da manta orgânica. Para a determinação da abundância isotópica de ¹³C nas raízes das pastagens, eucaliptos e mata, foram retiradas amostras compostas formadas por três amostras simples. Para essa determinação na serrapilheira, foram utilizadas 15 amostras simples das áreas de mata e eucalipto, e sete das áreas de pastagem. Essas amostras foram secas em estufa a 65°C por 72 horas, e moídas finamente para análise no espectrômetro de massa.

Para a estimativa da emissão de N₂O, foram utilizadas duas câmaras estáticas por repetição, o que totalizou seis repetições em cada área de estudo. A câmara era composta por uma base retangular de metal de 40x60 cm, com altura de 15 cm, inserida no solo até 5 cm de profundidade, e permaneceu no local durante todo período das avaliações. Durante o período de incubação, a base era coberta com uma chapa metálica de 45x65 cm. A amostragem foi realizada às oito horas da manhã, e o tempo de incubação foi de 40 min. A coleta do gás foi realizada com auxílio de uma bomba a vácuo, com intervalo médio de sete

Tabela 1. Média dos atributos químicos do solo em diferentes profundidades, em áreas de eucalipto, pastagem e mata.

Profundidade (cm)	Área	pH em H ₂ O	Al ⁺³	Ca ⁺²	Mg ⁺²	P	K ⁺
			-----cmol _c dm ⁻³ -----			-----mg dm ⁻³ -----	
0–20	Eucalipto	4,6	1,0	0,4	0,3	0,2	37,2
	Pastagem	4,4	1,2	0,4	0,0	0,6	47,9
	Mata	5,2	0,5	2,2	0,5	0,1	44,9
20–40	Eucalipto	4,5	0,9	0,3	0,0	0,0	18,6
	Pastagem	4,4	1,2	0,1	0,0	0,0	15,3
	Mata	5,0	0,5	1,5	0,4	0,0	19,9
40–60	Eucalipto	4,7	0,7	0,4	0,1	0,3	28,9
	Pastagem	4,5	1,1	0,0	0,0	0,0	11,3
	Mata	4,6	0,7	0,2	0,2	0,0	20,0
60–80	Eucalipto	4,8	0,7	0,5	0,1	0,0	12,2
	Pastagem	4,5	1,1	0,0	0,0	0,0	10,3
	Mata	4,8	0,9	0,1	0,1	0,0	19,3
80–100	Eucalipto	4,9	0,5	0,5	0,2	0,0	10,9
	Pastagem	4,6	1,1	0,0	0,0	0,0	10,0
	Mata	4,8	0,6	0,3	0,1	0,0	19,6

dias. As amostras foram encaminhadas ao Laboratório de Solos e Nitrogênio da Embrapa Agrobiologia, para determinação da concentração de N_2O por cromatografia gasosa, em cromatógrafo a gás Perkin Elmer (Autosystem).

A umidade gravimétrica e a temperatura do solo foram avaliadas na camada de 0–10 cm, no período de 6/2 a 16/5/2008. Com os dados de densidade e porosidade do solo, calculou-se a saturação do espaço poroso com água (%EPSA), no período de amostragem, pela equação $\%EPSA = \theta / [(1 - D_s) / D_p] 100$, em que: θ é a umidade gravimétrica; D_s é a densidade do solo; e D_p é a densidade das partículas ($2,65 \text{ kg dm}^{-3}$).

A extração do N mineral foi realizada conforme Silva (1999). Todos os resultados relativos ao N mineral foram expressos em relação ao solo seco a 105°C .

Tabela 2. Densidade e textura do solo no perfil do solo (0–100 cm) das áreas avaliadas.

Profundidade	Pastagem	Mata	Eucalipto
Densidade aparente do solo (Mg m^{-3})			
0–5	1,31	1,17	1,35
5–10	1,37	1,25	1,36
10–20	1,37	1,33	1,41
20–40	1,44	1,43	1,51
40–60	1,47	1,45	1,52
60–80	1,36	1,41	1,48
80–100	1,34	1,40	1,42
Teor de argila (g kg^{-1})			
0–5	353	293	307
5–10	360	293	333
10–20	360	307	353
20–40	427	320	380
40–60	480	353	413
60–80	530	407	487
80–100	547	433	540
Teor de areia (g kg^{-1})			
0–5	492	515	549
5–10	487	511	526
10–20	491	509	514
20–40	435	509	491
40–60	416	482	466
60–80	364	441	421
80–100	350	419	372
Teor de silte (g kg^{-1})			
0–5	155	144	193
5–10	153	141	193
10–20	149	133	187
20–40	139	129	169
40–60	124	121	167
60–80	109	93	153
80–100	103	88	141

Os estoques de C e N e a emissão de N_2O encontrados foram submetidos ao teste de normalidade de Cochran e Bartlett, pelo programa SAEG 5.0 (Ribeiro Júnior, 2001). Após a análise de variância, os tratamentos foram comparados pelo teste t (Bonferroni), a 5% de probabilidade, pelo programa Sisvar (Ferreira, 2008).

Resultados e Discussão

Os teores de nitrogênio total (N total) variaram entre 2,3 e 0,45% e os de carbono (C) do solo entre 0,19 e 0,05%, sem que tenha havido diferença significativa entre as áreas, em todo o perfil avaliado do solo (Figura 1). Os teores de N e C, observados na camada de 0–5 cm na mata regenerada, ficaram abaixo dos encontrados por Garay et al. (2003) em capoeiras secundárias e próximos aos observados em mata primária (3% C e 0,3% N) e mata atlântica de tabuleiro (2,4% C e 0,2% N), em Argissolo Amarelo, no Estado do Espírito Santo. Na camada de 0–10 cm de profundidade, Gama-Rodrigues et al. (2008) observaram 1,8% C e 0,24% N, em áreas nativas, e 1,2% C e 0,14% N em plantio de eucalipto com 7 anos, sobre Latossolo Vermelho-Amarelo, em Minas Gerais. Assim, os resultados encontrados no presente estudo indicam que a regeneração de longo prazo da mata tende a refletir valores observados em condições mais estabilizadas de cobertura nativa da Mata Atlântica.

Assim como o observado nos teores de C e N, os estoques de C e N entre as áreas, tanto na camada superficial de 0–40 cm como em todo o perfil (0–100 cm), não apresentaram diferenças significativas entre as áreas de estudo. Independentemente da área avaliada, aproximadamente 60% do C encontrava-se até a profundidade de 0–40 cm (Figura 1), o que era esperado, em razão da maior quantidade de resíduos, nutrientes e atividade biológica observados nessas camadas. A relação C/N do solo, tanto nas camadas superficiais como em todo o perfil avaliado (0–100 cm), variou entre 10 e 11, nas diferentes áreas. Estes valores médios são próximos aos observados em grande parte dos solos do mundo, que variam entre 9 e 13 (Brady, 1989).

As quantidades observadas nos estoques de C dos sistemas avaliados são semelhantes aos estoques reportados em outros trabalhos realizados em Latossolos (Gatto, 2005; Rangel & Silva, 2007). Outros autores também não observaram mudanças no estoque de C, em plantios de eucalipto com menos

de 10 anos (curto prazo) em substituição a plantio de cana (Binkley et al., 2004) e pastagem (Mendhan et al., 2002). Na região do Vale do Rio Doce, em Minas Gerais, a substituição de pastagens degradadas por plantios comerciais de longo prazo de eucalipto (três décadas) resultou em incremento de 10 e de 15 Mg ha⁻¹ de C, à profundidade de 0–20 cm, em um Latossolo Vermelho-Amarelo e Latossolo Vermelho, respectivamente (Lima et al., 2008).

Observou-se diferença significativa na abundância natural de ¹³C na matéria orgânica do solo (MOS) entre

as 3 áreas, com exceção da camada de 40–60 cm. Sob a mata regenerada, praticamente 100% do C da MOS foi derivado das espécies arbóreas (C₃, em sua maioria) que cresceram nesta área após 35 anos de regeneração, uma vez o valor médio de δ¹³C na manta orgânica (serrapilheira) e no sistema radicular nesta área foi de -24,7‰, dentro da faixa normalmente reportada para plantas C₃ (Smith & Epstein, 1971). Em todo o perfil avaliado, a área de mata apresentou os menores valores de abundância em ¹³C, o que é indicação de que, em 35 anos de regeneração, houve grande contribuição do C derivado das raízes das plantas arbóreas, com substituição praticamente total do C derivado da pastagem (plantas C₄, que apresentariam maior abundância natural em ¹³C), que ocupara a área por quase 40 anos. Este comportamento ocorreu mesmo em profundidades onde se esperava que a dinâmica de C fosse mais lenta, como nas camadas abaixo de 40 cm. No entanto, esta substituição não resultou em incrementos quantitativos de MOS.

Na área de pastagem, a abundância natural em ¹³C foi maior nas camadas mais superficiais, o que indica maior contribuição do carbono derivado de plantas C₄ na MOS (Smith & Epstein, 1971). O valor de δ¹³C na manta orgânica e no sistema radicular, na área de pastagem, foi de -11,7‰. Na área com eucalipto, mesmo na camada de 0–10 cm, não foram observadas diferenças significativas na composição isotópica do carbono em relação à área de pastagem, o que confirma que a implantação recente (4 anos) pouco modificou a MOS. Resultados semelhantes foram observados por Balieiro et al. (2008), em que a substituição de pastagem de *Panicum maximum* por plantios puros de *Eucalyptus grandis* e *Pseudosamanea guachapele* não modificaram a composição isotópica da MOS em relação à pastagem. No entanto, esses autores observaram que, após 5 anos, mais de 40% do C do solo sob plantio misto de *E. grandis* e *P. guachapele* foi derivado das árvores, enquanto nos plantios puros dessas espécies, a contribuição do C das árvores ficou em 19 e 27%, respectivamente.

A composição isotópica média de ¹³C na MOS da mata secundária, determinada pelo método de Balesdent et al. (1988), foi estimada em -25‰ (Figura 2). Tendo-se utilizado este valor como uma referência possivelmente próxima à composição da mata nativa, antes da implantação da pastagem, foi possível estimar que, após 88 anos, a incorporação do C derivado da pastagem na composição do estoque de C do solo foi de 53,5, 57,5, 47,5 e 24,6%, para as camadas de 0–5, 5–10,

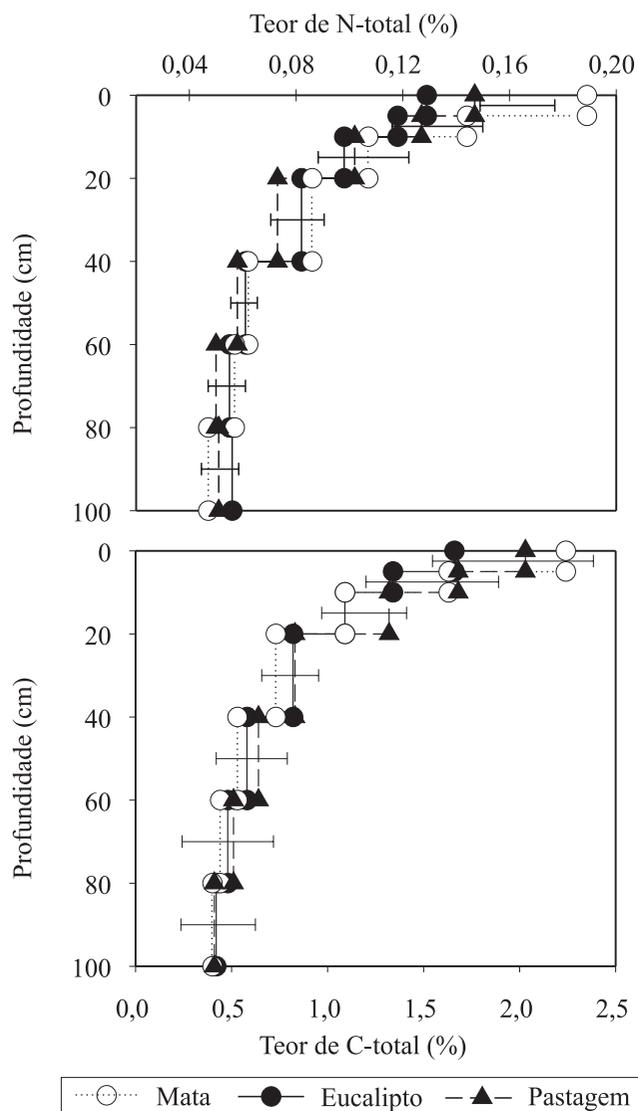


Figura 1. Teores de nitrogênio total e carbono, no perfil do solo. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa pelo teste t (Bonferroni), a 5% de probabilidade.

10–20 e 20–40 cm de profundidade, respectivamente. De acordo com esses dados, até os 20 cm de profundidade, apenas 53% do estoque de C do solo foi derivado do C da gramínea. Salimon et al. (2007) encontraram contribuições de pastagens no estoque de C do solo em torno de 45% (0–5 cm), 20% (5–10 cm) e 10%, a 55 cm de profundidade, mesmo padrão de contribuição encontrado no presente trabalho. Isso mostra que a pastagem não modificou os estoques de C derivados da floresta original, abaixo de 40 cm, e manteve a incorporação de C apenas nas camadas mais superficiais, diferentemente do que foi observado na mata regenerada.

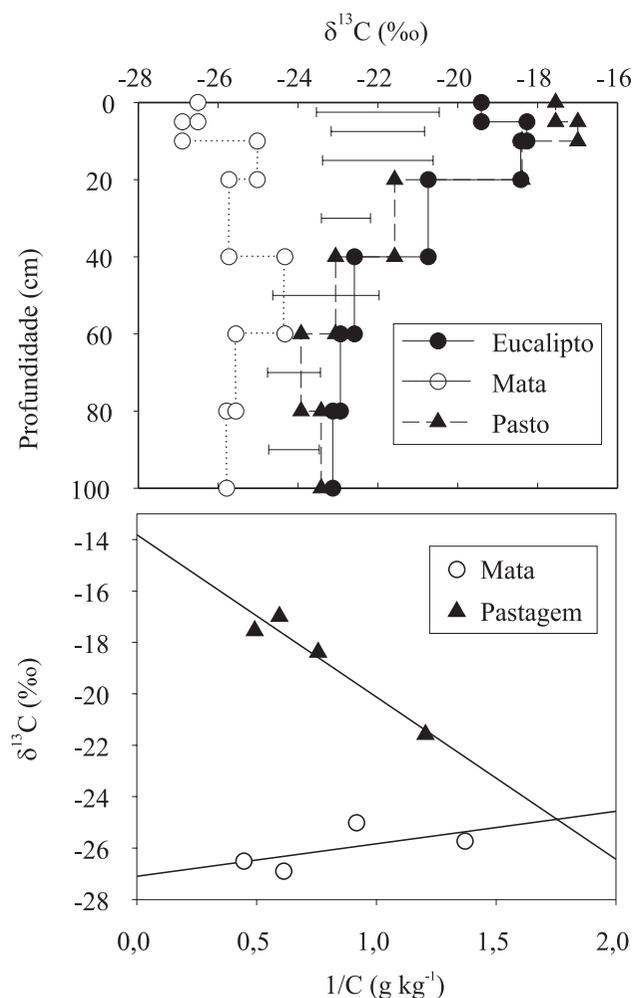


Figura 2. Diferença entre a composição isotópica de ^{13}C na da matéria orgânica do solo e na atmosfera ($\delta^{13}\text{C}$) em diferentes profundidades do solo, e efeito do inverso dos teores de C total no solo sobre $\delta^{13}\text{C}$, em amostras de solo de mata e pastagem. Barras horizontais representam a diferença mínima pelo teste t (Bonferroni), a 5% de probabilidade.

Os maiores fluxos de N_2O foram encontrados na área de mata, onde também foram encontrados os maiores teores de NO_3^- (Figura 3). Gama-Rodrigues et al. (2008) também observaram maior teor de nitrato em áreas de formação nativas, como Mata Atlântica e cerrado, em relação a plantios de eucalipto, na região Sudeste. A qualidade dos resíduos desta área influenciou a incorporação de matéria orgânica, pela menor relação C/N observada, o que estimula a mineralização de MOS e resulta em maiores teores de nitrato. As emissões de N_2O e os teores de NO_3^- , na área com eucalipto, foram intermediários às áreas de mata e de pastagem. O espaço poroso do solo ocupado por água (EPSA), na área com eucalipto, foi o menor observado das três áreas (Figura 3). As menores emissões de N_2O e teores de NO_3^- foram encontradas na área da pastagem.

Não foram observadas correlações entre fatores de solo ambientais das diferentes áreas e emissões de N_2O , durante o período avaliado. A mudança de estações ao longo do ano, no entanto, resultou em mudanças no padrão das emissões. No verão e outono, as emissões em todas as áreas acompanham os teores de NO_3^- do solo. No período de inverno, mesmo com os teores de NO_3^- semelhantes ou maiores que nas outras estações, as emissões foram menores, o que pode ser explicado pela diminuição do EPSA, e pela diminuição da temperatura (Velthof & Oenema, 1995; Davidson & Verchot, 2000; Dobbie & Smith, 2001; Jantalia, 2005).

Quanto às emissões anuais totais de N_2O (g ha^{-1}), o maior valor foi encontrado na área de mata, com diferença significativa apenas da área de pastagem, no entanto. Os valores de $878,7 \text{ g ha}^{-1}$ de N_2O por ano na mata, $664,2 \text{ g}$ na área com eucalipto e $351,4 \text{ g}$ na pastagem foram próximos aos valores médios observados em trabalhos realizados na Mata Atlântica por Maddock et al. (2001). Jantalia (2005) encontrou emissão de 671 e 630 g ha^{-1} de N_2O por ano, em uma área de floresta nativa, em Passo Fundo, RS. Davidson et al. (2001), ao revisar trabalhos sobre emissão de N_2O do solo, observaram que, em florestas primárias da Amazônia, as emissões ficam entre $1,4$ e $2,4 \text{ kg ha}^{-1}$ de N_2O por ano. Em termos mundiais, as emissões em florestas tropicais variam de $0,3$ a $6,7 \text{ kg ha}^{-1}$ de N_2O por ano.

Áreas reflorestadas pelo processo de regeneração natural e sem qualquer tipo de manejo apresentam menores incrementos na biomassa aérea (Vitousek,

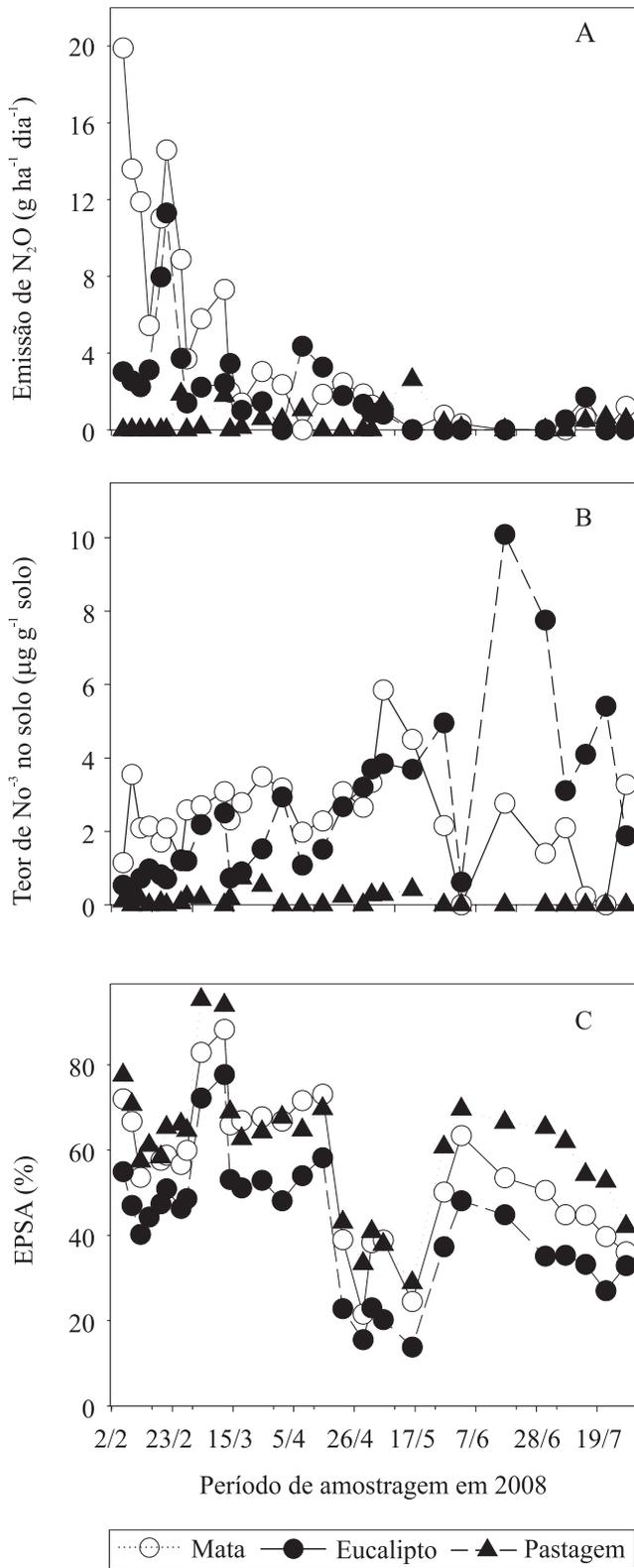


Figura 3. Emissão de N₂O (A), teores de NO⁻³ no solo (B), e espaço poroso do solo ocupado por água (EPSA%) (C), em área de mata, eucalipto e pastagem em 2008.

1984; Guariguata & Ostertag, 2001), principalmente em relação a plantios de espécies arbóreas de rápido crescimento (Franco & Faria, 1997; Macedo et al., 2008). Conseqüentemente, as alterações nos teores de MOS também são mínimas, o que está de acordo com o observado neste trabalho. Assim, técnicas de regeneração de florestas, que promovam a otimização dos ganhos de biomassa (parte aérea e raízes), podem contribuir para aumentar os ganhos na MOS e mitigar o impacto das emissões de gases de efeito estufa que ocorrem nessas áreas.

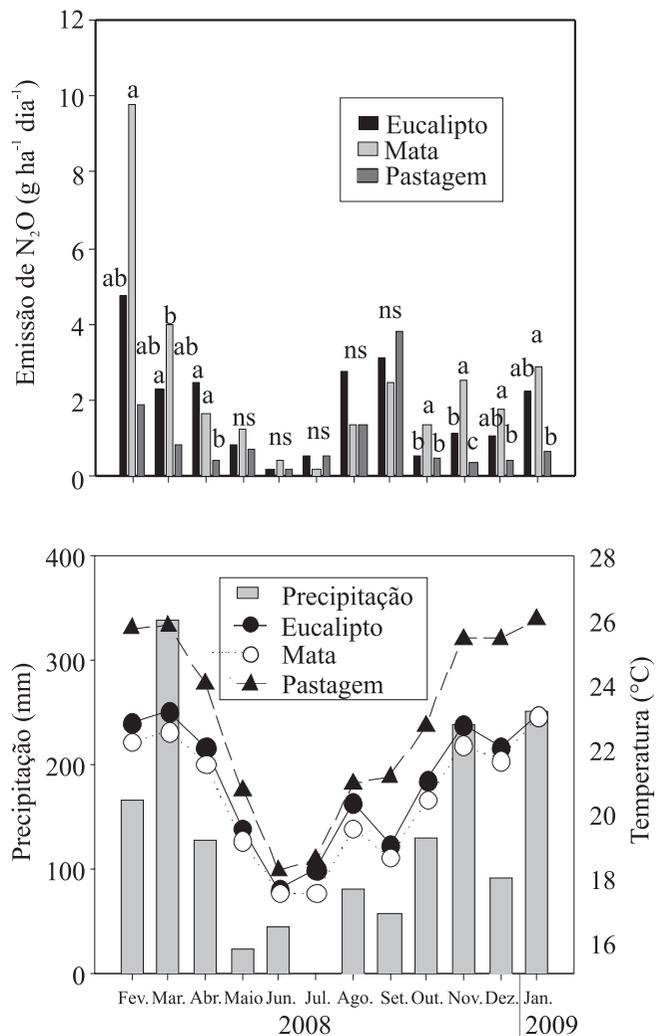


Figura 4. Emissão média mensal de N₂O, precipitação mensal e temperatura do solo na profundidade de 0–10 cm, em área com eucalipto, mata e pastagem. Colunas no mesmo mês, seguidas de letras iguais, não diferem entre si pelo teste t (Bonferroni), a 5% de probabilidade.

Conclusões

1. A regeneração natural da mata ou plantio de eucalipto de curto prazo não alteram o estoque de C e N do solo, em relação à pastagem original.
2. As maiores perdas anuais de N, pela emissão de óxido nitroso, ocorrem nas áreas de mata e eucalipto.
3. A floresta secundária apresenta maior influência na composição da matéria orgânica do solo do que o eucalipto e as pastagens.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pelo apoio financeiro e pela concessão de bolsa; à Embrapa Agrobiologia e aos proprietários do Sítio Dom Bosco, pelo suporte na realização deste trabalho; ao Dr. Fabiano de Carvalho Balieiro, da Embrapa Solos, pela ajuda nas análises de textura do solo.

Referências

- BALESDENT, J.; WAGNER, G.H.; MARIOTTI, A. Soil organic matter turnover in long-term field experiments as revealed by carbon-13 natural abundance. **Soil Science Society of America Journal**, v.52, p.118-124, 1988.
- BALIEIRO, F.C.; PEREIRA, M.G.; ALVES, B.J.R.; RESENDE, A.S. de; FRANCO, A.A. Soil carbon and nitrogen in pasture soil reforested with eucalyptus and guachapele. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.1253-1260, 2008.
- BARBOSA, L.M.; BARBOSA, J.M.; BARBOSA, K.C.; POTOMATI, A.; MARTINS, S.E.; ASPERTI, L.M.; MELO, A.C.G.; CARRASCO, P.G.; CASTANHEIRA, S.A.; PILIACKAS, J.M.; CONTIERI, W.A.; MATTIOLI, D.S.; GUEDES, D.C.; SANTOS JÚNIOR, N.; SILVA, P.M.S.; PLAZA, A.P. Recuperação florestal com espécies nativas no Estado de São Paulo: pesquisas apontam mudanças necessárias. **Florestar Estatístico**, v.6, p.28-34, 2003.
- BINKLEY, D.; KAYE, J.; BARRY, M.; RYAN, M.G. First rotation changes in soil carbon and nitrogen in a eucalyptus plantation in Hawaii. **Soil Science Society of America Journal**, v.68, p.1713-1719, 2004.
- BODDEY, R.M.; JANTALIA, C.P.; MACEDO, M.O.; OLIVEIRA, O.C. de; RESENDE, A.S.; ALVES, B.J.R.; URQUIAGA, S. Potential of carbon sequestration in soils of the Atlantic Forest region of Brazil. In: LAL, R.; CERRI, C.C.; BERNOUX, M.; ETCHEVERS, J.; CERRI, E. (Ed.). **Carbon sequestration in soil of Latin America**. New York: Howarth, 2006. Part II, cap. 15A, p.305-348.
- BODDEY, R.M.; XAVIER, D.; ALVES, B.J.R.; URQUIAGA, S. Brazilian agriculture: the transition to sustainability. **Journal of Crop Production**, v.9, p.593-621, 2003.
- BRADY, N.C. **Natureza e propriedades dos solos**. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1989. 898p.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Bacia do Rio Paraíba do Sul**. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/meioambiente/paginas/aaais/meioambiente_6.aspx?categoriaID=101>. Acesso em: 12 abr. 2010.
- BREMNER, J.M.; MULVANEY, C.S. Nitrogen total. In: PAGE, A.L.; MILLER, R.H.; KEENEY, D.R. **Methods of soil analysis**. Chemical and microbiological properties. Madison: American Society of Agronomy, 1982. Part 2, p.595-641.
- CERRI, C.C.; CERRI, C.E.P. Agricultura e aquecimento global. **Boletim da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.40-44, 2007.
- CLAESSEN, M.E.C. (Org.). **Manual de métodos de análises de solo**. 2.ed. rev. atual. Rio de Janeiro: Embrapa-CNPS, 1997. 212p. (Embrapa-CNPS. Documentos, 1).
- DAVIDSON, E.A.; BUSTAMANTE, M.M.C.; PINTO, A.S. Emissions of nitrous oxide and nitric oxide from soils of native and exotic ecosystems of the Amazon and Cerrado regions of Brazil. **The Scientific World**, v.1, p.312-319. 2001.
- DAVIDSON, E.A.; VERCHOT, L.V. Testing the hole in the pipe model of nitric and nitrous oxide emissions from soils using the TRAGNET database. **Global Biogeochemical Cycles**, v.14, p.1035-1043, 2000.
- DOBBIE, K.E.; SMITH, K.A. The effects of temperature, water-filled pore space and land use on N₂O emissions from an imperfectly drained Gleysol. **European Journal of Soil Science**, v.52, p.667-673. 2001.
- FERREIRA, D.F. SISVAR: um programa para análises e ensino de estatística. **Revista Symposium**, v.6, p.36-41, 2008.
- FRANCO, A.A.; FARIA, S.M. The contribution of N₂-fixing tree legumes to land reclamation and sustainability in the tropics. **Soil Biology and Biochemistry**, v.29, p.897-903, 1997.
- GAMA-RODRIGUES, E.F. da; BARROS, N.F.; VIANA, A.P.; SANTOS, G.A. Alterações na biomassa e na atividade microbiana da serapilheira e do solo, em decorrência da substituição de cobertura florestal nativa por plantações de eucalipto, em diferentes sítios da região Sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.1489-1499, 2008.
- GARAY, I.; KINDEL, A.; CARNEIRO, R.; FRANCO, A.A.; BARROS, E.; ABBADIE, L. Comparação da matéria orgânica e de outros atributos do solo entre plantações de *Acacia mangium* e *Eucalyptus grandis*. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.705-712, 2003.
- GATTO, A. **Estoques de C no solo e na biomassa de plantações de eucalipto na região centro-leste do Estado de Minas Gerais**. 2005. 73p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- GUARIGUATA, M.R., OSTERTAG, R. Neotropical secondary forest succession: changes in structural and functional

- characteristics. **Forest Ecology and Management**, v.148, p.185-206, 2001.
- JANTALIA, C.P. **Estudo de sistemas de uso do solo e rotações de culturas em sistemas agrícolas brasileiros: dinâmica de nitrogênio e C no sistema solo-planta-atmosfera**. 2005. 137p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica.
- JANTALIA, C.P.; SANTOS, H.P.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R.M.; ALVES, B.J.R. Fluxes of nitrous oxide from soil under different crop rotations and tillage systems in the South of Brazil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.82, p.161-173, 2008.
- LIMA, A.M.N.; SILVA, I.R. da; NEVES, J.C.L.; NOVAIS, R.F. de; BARROS, N.F.; SÁ MENDONÇA, E.; DEMOLINARI, M.S.M.; LEITE, F.P. Frações da matéria orgânica do solo após três décadas de cultivo de eucalipto no Vale do Rio Doce, MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.1053-1063, 2008.
- MACEDO, M.O.; RESENDE, A.S.; GARCIA, P.C.M.; BODDEY, R.M.; JANTALIA, C.P.; URQUIAGA, S.; CAMPELLO, E.F.C.; FRANCO, A.A. Changes in soil C and N stocks and nutrient dynamics 13 years after recovery of degraded land using leguminous nitrogen-fixing trees. **Forest Ecology and Management**, v.255, p.1516-1524, 2008.
- MADDOCK, J.E.L.; SANTOS, M.B.P.; PRATA, K.R. Nitrous oxide emission from soil of the Mata Atlântica, Rio de Janeiro State, Brazil. **Journal of Geophysical Research**, v.106, p.23055-23060, 2001.
- MARTINS, S.V.; COUTINHO, M.P.; MARAGON, L.C. Composição florística e estrutura de uma floresta secundária no Município de Cruzeiro, SP. **Revista Árvore**, v.26, p.35-41, 2002.
- MENDHAM, D.S.; O'CONNELL, A.M.; GROVE, T.S. Organic matter characteristics under native forest, long-term pasture, and recent conversion to eucalyptus plantations in Western Australia: Microbial biomass, soil respiration, and permanganate oxidation. **Australian Journal of Soil Science**, v.40, p.859-872, 2002.
- NEILL, C.; MELILLO, J.; STEUDLER, P.A.; CERRI, C.C.; MORAES, J.F.L.; PICCOLO, M.C.; BRITO, M. Soil carbon and nitrogen stocks following forest clearing for pasture in southwestern Brazilian Amazon. **Ecological Applications**, v.7, p.1216-1225, 1997.
- RANGEL, O.J.P.; SILVA, C.A. Estoques de C e nitrogênio e frações orgânicas de Latossolo submetido a diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.1609-1623, 2007.
- RIBEIRO JÚNIOR, J.I. **Análises estatísticas no SAEG**. Viçosa: UFV, 2001. 301p.
- SALIMON, C.I.; WADT, P.G.S.; MELO, A.W.F. Dinâmica do C na conversão de floresta para pastagens em Argissolos da formação geológica Solimões, no sudoeste da Amazônia. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v.7, p.29-38, 2007.
- SILVA, F.C. da (Ed.). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 370p.
- SISTI, C.P.J.; SANTOS, H.P.; 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**, v.76, p.39-58, 2004.
- SMITH, B.N.; EPSTEIN, S. Two categories of ¹³C/¹²C ratios for higher plants. **Plant Physiology**, v.47, p.380-384, 1971.
- SMITH J.L.; MYUNG, H.U. Rapid procedures for preparing soil and KCl extracts for ¹⁵N analysis. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.21, p.2273-2279, 1990.
- VELTHOF, G.L.; OENEMA, O. Nitrous oxide fluxes from grassland in the Netherlands. II. Effects of soil type, nitrogen fertilizer application and grazing. **European Journal of Soil Science**, v.46, p.541-549, 1995.
- VITOUSEK, P.M. Litterfall, nutrient cycling and nutrient limitation in tropical forests. **Ecology**, v.65, p.285-298, 1984.

Recebido em 16 de novembro de 2009 e aprovado em 30 de janeiro de 2010