

UFRRJ
INSTITUTO DE AGRONOMIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
CIÊNCIA DO SOLO

DISSERTAÇÃO

**Dinâmica da Matéria Orgânica do Solo em Área
Degradada em Recuperação com Plantio de
Leguminosas Arbóreas, no Município de Angra
dos Reis, RJ**

Anatoly Queiroz Abreu Torres

2011



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
CIÊNCIA DO SOLO**

**DINÂMICA DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO EM ÁREA
DEGRADADA EM RECUPERAÇÃO COM PLANTIO DE
LEGUMINOSAS ARBÓREAS, NO MUNICÍPIO DE ANGRA DOS
REIS, RJ**

Anatoly Queiroz Abreu Torres

Sob a Orientação do Professor
Segundo Urquiaga

e Co-Orientação da Pesquisadora
Claudia Pozzi Jantalia

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciências**, no curso de Pós-Graduação em Agronomia, Área de Concentração Ciência do Solo.

Seropédica, RJ
Fevereiro de 2011

631.409815

3

T693d

T

Torres, Anatoly Queiroz Abreu, 1986-
Dinâmica da matéria orgânica do
solo em área degradada em
recuperação com plantio de
leguminosas arbóreas, no Município
de Angra dos Reis, RJ / Anatoly
Queiroz Abreu Torres - 2011.
42 f.: il.

Orientador: Segundo Urquiaga.

Dissertação (mestrado) -
Universidade Federal Rural do Rio
de Janeiro, Curso de Pós-Graduação
em Agronomia.

Bibliografia: f. 33-42.

1. Dinâmica do solo - Angra dos
Reis (RJ) - Teses. 2. Solos -
Degradação - Angra dos Reis (RJ) -
Teses. 3. Nitrogênio - Fixação -
Teses. 4. Leguminosa - Teses. 5.
Recuperação da terra - Teses. I.
Urquiaga Caballero, Segundo do
Sacramento, 1950-. II. Universidade
Federal Rural do Rio de Janeiro.
Curso de Pós-Graduação em
Agronomia. III. Título.

É permitida a cópia parcial ou total desta Dissertação, desde que seja citada a fonte.

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA – CIÊNCIA DO SOLO**

ANATOLY QUEIROZ ABREU TORRES

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciências**, no Curso de Pós-Graduação em Agronomia, área de Concentração em Ciência do Solo.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 18/02/2011

Segundo Urquiaga. Dr. Embrapa Agrobiologia.
(Orientador)

Eduardo Lima Dr. UFRRJ

David Vilas Boas de Campos. Dr. Embrapa Solos

Aos meus pais, irmãos e a todos que torceram por mim e me apoiaram...

Dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por iluminar o meu caminho.

Aos meus pais Edna e José Torres e irmãos Lara, Yuri e Nadya pelo apoio nas diversas etapas desta caminhada.

Aos meus tios e primas de Niterói pelo apoio e carinho que sempre tiveram comigo.

A todos os meus familiares de Muriaé, aos meus avós Terezinha, Moca e Bárbara.

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, em especial a todos da coordenação do Curso de Pós Graduação em Agronomia - Ciência do Solo.

Aos professores do Instituto de Agronomia, em especial aos professores Marcos Bacis, e Érika no auxílio da realização deste trabalho e ao professor Freire pela grande amizade conquistada.

Aos companheiros do Condomínio Portugal, em especial o Sr. Roberto, Milene, Zelma e Márcia pelo apoio e bons momentos juntos.

Aos amigos de curso, pela colaboração e pelos agradáveis momentos juntos (Eloísa, Itaynara, Andréa, Débora, Carol, Camila, e Jackson).

A todos os funcionários do Departamento de Solos, em especial a Maria Helena Soares e Jorge, pela boa vontade e pelo auxílio nos trabalhos.

A Embrapa Agrobiologia, pela oportunidade e apoio no desenvolvimento dos trabalhos.

Aos Pesquisadores Segundo Urquiaga, Claudia Pozzi Jantalia, Bruno José Rodrigues Alves e Bob, pela orientação, apoio, ensinamentos, amizade, confiança e compreensão.

Aos vários pesquisadores e professores que ajudaram neste trabalho, entre eles a Dr Janaína e os Drs Sergio Miana, Ednaldo e Alex Resende.

Aos colegas do grupo de ciclagem de nutrientes, em especial a Natália, Régia, Fernando, Rafael Fiusa, Selenobaldo, Ana Paula e Sandra pelo carinho e ajuda nesses momentos difíceis.

Ao Pessoal do Laboratório de Solos (Altiberto, Monalisa, Gisele, Roberto Grégio e Roberto Andrade) e Leguminosas (Telmo, Fernando, Adriana e Andréia) da Embrapa Agrobiologia.

Aos meus amigos da Rural, Hevandro Ricardo, Ronan, Evandro Silva, Khalil, Stênio, Alexandre, Gustavo, e Gláucio pelos grandes momentos passados juntos.

Às minhas queridas amigas Elisamara, Ingrid, Jerusa, Marcela, Talita e Keila, pela amizade, companheirismo e cumplicidade sempre presentes.

Ao CNPq, pela concessão da bolsa de estudo.

A todos que contribuíram para a realização deste trabalho, o meu sincero agradecimento.

BIOGRAFIA

Anatoly Queiroz Abreu Torres, filho de José Torres e Edna Maria Queiroz Abreu Torres, nasceu em 19 de março de 1986, na cidade de Muriaé, Estado de Minas Gerais. Em 2009 graduou-se em Agronomia pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Durante sua graduação sempre esteve envolvido com estágios e projetos de pesquisa, sendo bolsista de Iniciação Científica pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro na área de Tecnologia de Sementes e pela Embrapa Agrobiologia na área de Recuperação de Áreas Degradadas com Leguminosas. Ingressou no Curso de Pós-Graduação em Agronomia - Ciência do Solo da UFRRJ em março de 2009, concluindo seu trabalho de dissertação de Mestrado na presente data.

RESUMO

TORRES, Anatoly. **Dinâmica da matéria orgânica do solo em área degradada em recuperação com plantio de leguminosas arbóreas, no município de Angra dos Reis, RJ.** 2011. 42f. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Ciência do Solo) - Instituto de Agronomia, Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2011.

O plantio de leguminosas arbóreas fixadoras de nitrogênio em projetos de recuperação de áreas degradadas pode acelerar o processo de sucessão ecológica e contribuir para o estabelecimento e auto-sustentação da floresta recém implantada. Este trabalho teve como objetivo avaliar a dinâmica da matéria orgânica do solo (MOS) em área em recuperação com o plantio de leguminosas arbóreas. Para avaliar as mudanças dos estoques de carbono e nitrogênio na área reflorestada com leguminosas há 17 anos, foi selecionada uma área de gramíneas e uma área de mata usada como uma provável referência da condição original, na fase anterior ao desflorestamento desta região. O solo foi amostrado em diferentes camadas até 60 cm de profundidade em 4 repetições. Os estoques de C e N do solo foram comparados sob a mesma massa de solo. Foi utilizada a técnica de abundância natural de ^{13}C para determinação do C derivado das leguminosas na MOS. A concentração de carbono orgânico total foi determinada pelo método de combustão a seco, em um auto-analisador de carbono e os teores de nitrogênio total foram determinados pelo método Kjeldahl. Após 17 anos o conteúdo de C e N do perfil do solo (0-60 cm) aumentou em 10 Mg C ha^{-1} e 1 Mg N ha^{-1} sob o plantio das leguminosas arbóreas, em relação a área sob gramíneas, embora as diferenças não alcançaram significância estatística. O uso de leguminosas arbóreas fixadoras de nitrogênio contribuiu com uma média de $59 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de N, favorecendo o sequestro de C. Esses maiores estoques foram encontrados nas camadas mais superficiais do solo, onde essas diferenças foram significativas. Os resultados demonstram que o plantio de leguminosas manteve o C original do solo e proporcionou a incorporação de C derivado da serapilheira e raízes nas camadas superficiais, contribuindo assim para a recuperação do solo degradado.

Palavras-chave: Mudanças de uso do solo. Nitrogênio. Fixação biológica de N

ABSTRACT

TORRES, Anatoly. **Dynamics of soil organic matter in degraded areas under recovery by planting leguminous trees in Angra dos Reis municipality, RJ.** 2011. 42p. Dissertation (Máster Science in Agronomy, Soil Science). Instituto de Agronomia, Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2011.

Planting of nitrogen-fixing legume trees in restoration projects of degraded areas could accelerate the process of ecological succession and contribute to establishment and self-sustainability of newly established forest. This study aimed to evaluate dynamics of soil organic matter (SOM) in a recovering area with leguminous trees planting. To evaluate changes in storage of carbon and nitrogen in the area reforested with legumes for 17 years, there were selected a pasture and a forested area as references to the original conditions, previously to the deforestation. The soil was sampled in different layers at 60 cm depth in four replications. The soil C and N stocks were compared under an equal soil mass. The technique of natural abundance ^{13}C was used for determination of C in SOM derived from the legume trees. Total soil organic carbon concentration was determined by dry combustion in an auto-analyzer carbon and total nitrogen was determined by Kjeldahl method. After 17 years, the C and N content of the soil profile (0-60cm) increased by 10 Mg C ha^{-1} and 1 Mg N ha^{-1} , under the planting of leguminous trees, compared to the pasture, although the differences were not statistically significant. The usage of nitrogen-fixing leguminous trees contributed an average of $59 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1} \text{ N}$, favoring sequestration of C. These largest stocks were found in the soil superficial layers, where the differences were significant. The results show that planting of legumes kept the original soil C level, and provided incorporation of C derived from litter and roots in the surface layers, thus contributing to the recovery of the degraded soil.

Keywords: Land usage change. Nitrogen. Biological nitrogen fixation

ÍNDICES DE FIGURAS

Figura 1. Área reflorestada há 17 anos com leguminosas	9
Figura 2. Área com predominância de gramíneas	10
Figura 3. Área de floresta secundária, do Bioma Mata Atlântica	10
Figura 4. Serapilheira acumulada ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) nas áreas de mata, gramíneas e reflorestada há 17 anos com leguminosas, no município de Angra dos Reis, RJ. Barras seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste T (Bonferroni; $P < 0,05$)	16
Figura 5. Teores de carbono (CT) e nitrogênio (NT) ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) no perfil do solo sob as 3 áreas, no município de Angra dos Reis, RJ.	18
Figura 6. Correlação entre as concentrações de nitrogênio e de carbono observadas nas três áreas avaliadas no município de Angra dos Reis, RJ.	19
Figura 7. Teores de carbono e nitrogênio ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) na fração leve da MOS sob as 2 áreas, no município de Angra dos Reis, RJ (NS).	21
Figura 8. Estoque de carbono presente nas camadas de 0-60 e 0-30 cm do solo, sob diferentes coberturas vegetais, no Município de Angra dos Reis, RJ. Barras seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste T (Bonferroni; $P < 0,05$).	22
Figura 9. Estoque de nitrogênio presente nas camadas de 0-60 e 0-30 cm do solo, sob diferentes coberturas vegetais, no Município de Angra dos Reis, RJ. Barras seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste T (Bonferroni; $P < 0,05$).	23
Figura 10. Abundância natural de $\delta^{13}\text{C}$ no COT do solo nas áreas de estudo, no município de Angra dos Reis, RJ.	27
Figura 11. Regressão do inverso dos teores de C ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) versus a abundância de ^{13}C das amostras de solo nas áreas de Reflorestamento e Gramíneas.....	27
Figura 12. Abundância natural de $\delta^{13}\text{C}$ da fração leve do solo sob as áreas de pastagem e reflorestamento com leguminosas. (NS)	29
Figura 13. Regressão do inverso dos teores de C-FL ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) versus a abundância de ^{13}C das amostras da fração leve da MOS.	30

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Análise química do solo ao longo do perfil, em três áreas avaliadas, no município de Angra dos Reis, RJ.	14
Tabela 2. Análise granulométrica do perfil do solo sob as diferentes áreas, no município de Angra dos Reis, RJ.	15
Tabela 3. Densidade do solo (Mg m^{-3}) sob as diferentes coberturas vegetais, no Município de Angra dos Reis, RJ.	15
Tabela 4. Estoque de carbono fração leve (FL) e percentual desta no estoque de C total da matéria orgânica do solo.	24
Tabela 5. Estoque de nitrogênio e relação C:N na fração leve (FL) e percentual desta no estoque de N total da matéria orgânica do solo.	26
Tabela 6. Estoque de carbono no solo derivado da vegetação antiga e reflorestamento com leguminosas.	28
Tabela 7. Estoque de carbono no solo derivado da vegetação antiga e gramíneas.	28
Tabela 8. Abundância natural de $\delta^{13}\text{C}$ e estoque de C na FL da MOS (0-30 cm) derivado da vegetação nativa e gramíneas (original) e leguminosas (incorporado).	30
Tabela 9. Abundância natural de $\delta^{13}\text{C}$ e estoque de C na FL da MOS (0-30 cm) derivado da vegetação nativa (original) e gramíneas (incorporado).	31

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1 Matéria Orgânica do Solo.....	4
2.2 Abundância Natural de ¹³ C.....	5
2.3 Fracionamento Físico da MOS	7
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	9
3.1. Descrição das Áreas.....	9
3.2. Análises Físicas e Químicas do Solo.....	10
3.3. Serapilheira Acumulada	11
3.4. Determinação de Carbono no Solo.....	11
3.5. Determinação de Nitrogênio no Solo	11
3.6. Fracionamento Físico da Fração Leve Livre da Matéria Orgânica do Solo.....	11
3.7. Estoque de Carbono e Nitrogênio Total e na Fração Leve Livre da Matéria Orgânica do Solo.....	12
3.8. Abundância Natural de ¹³ C no Perfil do Solo.....	12
3.9. Análise Estatística	13
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	14
4.1. Análise Físicas e Químicas do Solo	14
4.2. Serapilheira Acumulada	16
4.3. Determinação de Carbono e Nitrogênio no Solo e na Fração Leve Livre da MOS	17
4.4. Estoques de C e N no Perfil do Solo e na Fração Leve Livre da MOS.....	21
4.5. Abundância Natural de ¹³ C e Estimativa do Estoque de Carbono no Solo e na Fração Leve Livre da MOS	26
5 CONCLUSÕES.....	32
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33

1 INTRODUÇÃO

Os resultados de estudos, pesquisas e levantamentos técnico-científicos realizados na Mata Atlântica, especialmente na última década, invariavelmente confirmam a notável riqueza da diversidade de espécies desse bioma. Lamentavelmente, os mesmos estudos indicam também a degradação na qual o bioma se encontra (degradação) devido às constantes agressões aos seus ambientes naturais. Em virtude dessas características, grande riqueza biológica e altos índices de ameaça, a Mata Atlântica, ao lado de outras 24 regiões localizadas em diferentes partes do planeta, foi indicada como um dos hotspots mundiais, ou seja, uma das prioridades para a conservação da biodiversidade em todo o mundo (MYERS et al, 2000).

Estima-se que 28% do território brasileiro estejam em processo avançado de degradação (TERRASTAT, 2009), devido ao desmatamento e ao mau uso do solo. Quanto maior o grau de degradação, menor é a velocidade de regeneração do sistema (VITOUSEK et al, 1989; LUGO & BROWN, 1992; GUARIGUATA & OSTERTAG, 2001), de modo que, dependendo das circunstâncias, medidas de recuperação são necessárias para acelerar o processo.

As avaliações quantitativas da matéria orgânica do solo (estoques e fluxos) são importantes para dimensionar o resultado dos fatores envolvidos em um determinado sistema de produção. Alguns estudos vêm utilizando a técnica isotópica do ^{13}C , como complemento, para avaliar a influência da vegetação no seqüestro de carbono no perfil do solo, respondendo de qual espécie vegetal é proveniente a matéria orgânica presente no solo e qual a taxa de substituição, tornando-se uma ferramenta de grande utilidade. Esta técnica ajuda na seleção de áreas ou sítios experimentais que apresentam a mesma origem, pelo menos quanto ao tipo original de C orgânico do solo, essencial para estudos comparativos na avaliação do impacto dos sistemas de manejo no seqüestro de C no perfil do solo (URQUIAGA et al, 2006).

Além do papel de promover o bom funcionamento do solo, a matéria orgânica do solo representa o terceiro maior reservatório de carbono terrestre, com 1550 Pg de C (LAL, 2004), de modo que nos últimos anos, o seu papel no ciclo biogeoquímico do C e nas mudanças climáticas globais vem recebendo maior atenção (BROWN & LUGO, 1990; CORAZZA et al, 1999; SILVER et al, 2000; LEITE et al, 2003; LAL, 2004; BODDEY et al, 2006).

As perdas de C do solo associadas à emissão de CO_2 após a conversão de uma área florestal em uma área agrícola geralmente variam entre 20-30% do C original, ocorrendo, principalmente, nos primeiros vinte anos (CADISCH et al, 2006). Entretanto, de acordo com Tiessen et al. (1994), dependendo do manejo este processo pode ocorrer de forma mais rápida. Estes autores constataram que em regiões tropicais, seis anos de cultivo foram suficientes para que 40% da matéria orgânica do solo fossem perdidos, quando o solo era submetido a um sistema de agricultura convencional.

A regeneração natural de florestas tropicais é, muitas vezes, lenta e incerta em virtude da combinação de fatores, tais como: a agressividade e dominância de gramíneas, a recorrência das queimadas, as condições microclimáticas desfavoráveis, a baixa fertilidade dos solos, e a exaustão de banco de sementes (PARROTTA et al, 1997). Recentemente, as pesquisas mostram que o plantio de árvores em áreas degradadas ameniza os fatores desfavoráveis, acelerando a sucessão natural (BROWN & LUGO, 1994; SILVA JUNIOR et al, 1995).

Neste contexto, como alternativa aos problemas de perda de produtividade, e de degradação do solo, o uso de leguminosas fixadoras de nitrogênio acelera o processo de sucessão ecológica e condiciona a longo prazo o estabelecimento e auto-sustentação da floresta.

As leguminosas arbóreas possuem sistema radicular bastante desenvolvido e algumas espécies são capazes de crescer em solos rasos, rompendo camadas adensadas. Além disso, o uso de leguminosas de rápido crescimento em condições adequadas de substrato oferece condições favoráveis para a atração e recebimento de propágulos que ingressem pelos diferentes agentes de dispersão. No entanto, segundo Franco & Campello (1994), essas espécies devem apresentar características desejáveis como: capacidade de fixar N₂ atmosférico, tolerância á acidez elevada, tolerância á ambientes pobres em nutrientes, melhorar o solo por intermédio do aporte de matéria orgânica advindo da serapilheira, formar cobertura vegetal protetora ao solo, restabelecer processos de sucessão vegetal, formar associações eficientes com fungos micorrízicos e desenvolver sistema radicular eficiente no escoramento da planta e obtenção de semente.

Estas espécies são capazes não só de se estabelecerem, como também produzirem uma grande quantidade de biomassa de baixa relação C:N (ANDRADE et al. 2000; SILVA et al. 2008; MACEDO et al, 2006), contribuindo para o incremento de matéria orgânica e nitrogênio no solo (BODDEY et al, 2006). Isto porque em áreas com baixa capacidade produtiva ou mesmo de subsolo exposto, o crescimento satisfatório das plantas só é possível com a adição de grandes quantidades de composto orgânico ou adição freqüente de adubos nitrogenados (RESENDE et al, 2006), que eleva consideravelmente o custo (energético, ecológico e financeiro) de implantação e manutenção dos plantios.

A estratégia de utilizar leguminosas fixadoras de nitrogênio é apoiada pela constatação de que o nitrogênio é um elemento chave no restabelecimento da comunidade vegetal nos trópicos, e de que a fixação biológica é a principal via natural de entrada deste elemento no sistema. Além disso, estudos mostram que o incremento dos níveis de matéria orgânica do solo está intimamente associado à disponibilidade de nitrogênio (CHRISTOPHER & LAL, 2007).

Além de fixar grandes quantidades de N e contribuir com aporte elevado de biomassa ao solo, essas espécies podem contribuir para a reciclagem de nutrientes de modo efetivo, uma vez que a qualidade do material aportado é geralmente superior àquela oriunda de espécies não leguminosas. Em estudo onde se avaliou a composição química da serapilheira produzida por plantios homogêneos de *Acacia mangium* e *Eucalyptus pellita* na recuperação de solo degradado pela extração de bauxita, em Porto Trombetas, no Pará, foi observada a superioridade da leguminosa na produção de biomassa e retorno de N, P, K e Mg ao solo via queda de serapilheira (DIAS et al, 1994). Além disso, resultados de Campello (1998) mostram que a sucessão vegetal em áreas degradadas colonizadas por leguminosas fixadoras de nitrogênio apresentou maior número de espécies, e biomassa, do que quando colonizadas com espécies não fixadoras de nitrogênio.

Esta técnica se baseia na idéia de que os processos de facilitação em estádios iniciais de sucessão são determinantes no estabelecimento da comunidade vegetal, uma vez que promovem a melhoria das condições físicas do ambiente e o incremento de matéria orgânica e nutrientes no solo (PUGNAIRE et al, 1996). Uma vez alteradas as condições do ambiente, a entrada de novas espécies mais exigentes torna-se possível. Além disso, a camada de serapilheira formada por estas espécies, juntamente com a parte aérea e radicular das plantas, vai proteger o solo dos agentes erosivos (ANDRADE, 1997).

Pode-se citar o uso destas espécies em sistemas agroflorestais (SILVA et al, 2006), silviculturais (BALIEIRO, 2002), silvipastoris (SILVA et al, 2006) e na recuperação de áreas degradadas (FRANCO et al, 1992; FRANCO & FARIA, 1997). Devido a capacidade destas espécies em incorporar quantidades substanciais de C no solo (BODDEY et al, 2006; MACEDO et al, 2008), estas vem sendo avaliadas quanto a sua capacidade de auxiliar na mitigação do efeito estufa (BODDEY et al, 2006; RESENDE et al, 2006).

Sendo assim, este trabalho tem como objetivo avaliar a capacidade da recuperação de

áreas degradadas com leguminosas arbóreas associadas a bactérias fixadoras de nitrogênio simbióticas e fungos micorrízicos arbusculares em restabelecer a ciclagem de nutrientes e incrementar os estoques de C e N do solo. Visando uma melhor compreensão sobre a capacidade da recuperação de áreas degradadas com leguminosas em incrementar os estoques de C e N do solo, foram avaliados outros atributos do sistema, como a abundância natural de ^{13}C , e a avaliação da fração leve livre da matéria orgânica.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Matéria Orgânica do Solo

Na natureza, o solo comporta-se como um sistema aberto, trocando matéria e energia com o meio (MIELNICZUK, 1999). Apresenta-se como um sistema complexo de substâncias cuja dinâmica é governada pela adição de resíduos orgânicos de diversas naturezas e por uma transformação contínua por agentes biológicos, químicos e físicos (CAMARGO et al, 1999). Segundo Buyanovsky et al. (1994) a matéria orgânica do solo (MOS) pode ser definida como um compartimento altamente heterogêneo, composto por numerosas substâncias orgânicas que podem variar de açúcares facilmente mineralizáveis a complexos produtos da transformação microbiana altamente recalcitrantes, para os quais o tempo de residência pode variar de poucos minutos a centenas de anos.

Nas regiões tropicais, onde a presença de C inorgânico é reduzida, a maior parte do C do solo estará na forma de matéria orgânica. Esta se encontra na forma de resíduos em diversos estágios de decomposição, compostos humificados e materiais carbonizados, associados ou não à fração mineral (CHRISTENSEN, 1992; ROSCOE & MACHADO, 2002). É responsável pelo aumento da CTC, complexação do Al, retenção de bases, agregação, assim como está intimamente relacionada com a disponibilidade de nutrientes, especialmente do nitrogênio, no solo (BAYER & MIELNICKZUC, 1999; CANELLAS et al, 2000; CRASWELL & LEFROY, 2001; GUARIGUATA & OSTERTAG, 2001; SIX et al, 2002).

Diversos compartimentos da matéria orgânica vêm sendo estudados e sugeridos como indicadores de mudanças nos seus níveis e na dinâmica de nutrientes (CADISCH et al, 1996; CORAZZA et al, 1999; MIELNICZUK, 1999; ROSCOE ET al, 2000; FREIXO et al, 2002). Isso se deve a dois fatos: por ser, a matéria orgânica, muito sensível às práticas de manejo, principalmente nas regiões tropicais e subtropicais; e pela maioria dos atributos do solo estarem relacionados às funções básicas do solo estarem intimamente ligados à ela (MIELNICZUK, 1999).

Uma vez avaliados os compartimentos, estes podem ser entendidos e integrados, permitindo uma melhor compreensão sobre a dinâmica da matéria orgânica do solo. Nesse sentido, a formação e a estabilização da matéria orgânica podem ser interpretadas a partir de esquemas evolutivos que analisam conjuntamente os ciclos de ganhos e perdas de carbono e a contribuição dos processos bioquímicos, físicos e pedoclimáticos de estabilização do húmus em função de aspectos quantitativos e qualitativos do sistema (MANZATTO, 1990).

A conservação da matéria orgânica do solo é de grande importância para o funcionamento biológico, químico e físico do solo tanto em regiões tropicais quanto em temperadas (SIX et al, 2002). Nos trópicos apresenta papel de destaque, uma vez que na maior parte das vezes, os solos são altamente intemperizados, fortemente ácidos e com reduzida capacidade de troca catiônica (BAYER & MIELNICZUK, 1999).

O estoque de matéria orgânica do solo em qualquer ecossistema é obtido pela interação dos fatores que determinam a sua formação e aqueles que promovem a sua decomposição (LEITE et al, 2003). Assim, o acúmulo de carbono no solo é dependente das práticas de manejo do solo, fatores edáficos, climáticos assim como da quantidade e qualidade do material vegetal depositado.

A redução dos níveis de matéria orgânica do solo se inicia com a remoção da comunidade vegetal, que reduz a deposição de serapilheira, restringindo a atividade biológica do solo. Uma vez reduzido o aporte de serapilheira, o solo fica exposto aos processos erosivos, favorecendo a remoção das camadas mais férteis. Além disso, essa redução do

aporte de biomassa, em associação ao aumento da temperatura do solo, favorece a mineralização da matéria orgânica, levando à redução dos seus níveis, que por sua vez, pode resultar em processos de degradação. Durante o processo de mineralização da matéria orgânica há liberação de CO₂, que contribui para o aumento dos níveis deste gás na atmosfera, hoje o gás de efeito estufa emitido em maior quantidade.

Nesse sentido, o restabelecimento dos seus níveis no solo só será possível através de adubação nitrogenada ou da fixação biológica de nitrogênio por diazotróficos livres ou associados a outras espécies. Diversas espécies da família Leguminosae são capazes de se associarem a bactérias fixadoras de nitrogênio e são numerosas nas regiões tropicais. Estas bactérias são capazes converter o nitrogênio atmosférico em amônio, fornecendo-o para planta em troca dos produtos da fotossíntese. Nesse sentido, a grande diversidade dessa família (POPHIL & RAVEN, 1981) associada às suas varias possibilidades de uso, as tornam espécies estratégicas no que diz respeito a sustentabilidade ecológica, econômica e social, principalmente no Brasil (RESENDE et al, 2006).

2.2 Abundância Natural de ¹³C

Na natureza existem três isótopos do C: ¹²C, ¹³C, e ¹⁴C. Este último representa somente 10⁻¹⁰ %, não tendo, portanto, relevância fisiológica (TAIZ & ZEIGER, 1998). O ¹³C representa aproximadamente 1,11 %, contra 98,89 % do ¹²C. A concentração de ¹³C no ar, no entanto, é muito variável, não podendo ser utilizado, por isso, como uma referência padrão. Por convenção internacional, os valores de δ ¹³C são expressos utilizando os valores encontrados em uma reserva de carbonato de cálcio, denominada PDB, como referência. Essa é uma reserva calcária fóssil de *Belemnitella americana*, numa formação Pee Dee do Cretáceo, na Carolina do Sul, EUA (BOUTTON, 1991, ALVES et al, 1999).

No processo da fotossíntese, ocorre uma discriminação isotópica do ¹³C do CO₂ atmosférico, quando incorporado aos tecidos vegetais. Isto é, a entrada de ¹²C é favorecida, alterando a proporção entre ¹²C e ¹³C. Nas plantas que possuem a via fotossintética C₃, a abundancia isotópica situa-se entre -25 e -31 ‰ (LUDLOW et al, 1976), como nas culturas da soja, trigo, arroz, e principalmente, nas florestas tropicais. Já nas plantas de ciclo C₄, a discriminação isotópica é menor, variando de -10 a -15 ‰, como exemplo a cana-de-açúcar, braquiária, capim elefante e milho.

A discriminação isotópica ocorre basicamente devido à diferença de peso entre os isótopos ¹²C e ¹³C, que possuem uma diferença de massa de 2,3 ‰. Nas folhas, o carbono movimenta-se por difusão, e o p¹²C é mais rápido que o ¹³C. Mesmo assim, o maior grau de discriminação isotópica ocorre na reação de carboxilação catalisada pela RUBISCO, por razões ainda não conhecidas, nas plantas de ciclo fotossintético C₃. Contrariamente, nas plantas de ciclo fotossintético C₄, o efeito de discriminação isotópica é menor, na fixação de carbono pela PEP carboxilase. Assim, as diferenças entre os ciclos fotossintéticos vão diferenciar a composição isotópica (TAIZ & ZEIGER, 1998). Uma utilização interessante do ¹³C é o estudo em plantas CAM, já que estas fixam o carbono, via PEP carboxilase, e em algumas espécies, quando bem hidratadas, durante o dia, fixam carbono via RUBISCO. Assim, os valores de ¹³C ficam intermediários entre as plantas de ciclo C₃ e C₄, e pode-se conhecer a origem de como o C foi fixado (TAIZ & ZEIGER, 1998).

Devido a essa diferença entre espécies C₃ e C₄, e levando-se em conta que a matéria orgânica do solo é dependente e/ou reflete a vegetação sobre o solo, é possível determinar a origem do C contido na matéria orgânica do solo, nas suas frações e liteira, podendo assim quantificar a contribuição de cada tipo de vegetação. A técnica da abundância natural de ¹³C é considerada uma ferramenta de grande valor na determinação da origem das diferentes frações da matéria orgânica do solo.

No caso dos solos tropicais, a matéria orgânica dos solos sob floresta geralmente

apresenta valores próximos a -27‰ (CERRI et al, 1985). Assim, em solos sob cultivo de plantas C_4 onde havia originalmente florestas (C_3), pela análise do carbono isotópico em materiais fracionados, pode-se saber a origem do carbono orgânico da fração do solo. Com o desflorestamento e implantação de espécies C_4 (as quais são mais competitivas nas condições do habitat tropical), a matéria orgânica do solo originalmente sob floresta nativa vai sendo substituída por uma nova matéria orgânica formada oriunda dessa vegetação mais recente, com diferente sinal de $\delta^{13}\text{C}$. A velocidade com que ocorre essa substituição permite aplicar modelos para a caracterização dos compartimentos da matéria orgânica do solo (CADISCH et al, 1998, CERRI et al, 1985).

Métodos mais recentes, baseados na abundância natural de ^{13}C , têm sido aplicados em experimentos de campo (CERRI et al, 1985; BALESIDENT et al, 1987). A composição isotópica da matéria orgânica do solo é relacionada à composição isotópica da cobertura vegetal. A alteração da vegetação sobre o solo vai refletir na matéria orgânica. Assim, as diferenças isotópicas observadas nas frações do solo podem indicar a velocidade da ciclagem de C nos diferentes compartimentos do sistema.

Em profundidade, também pode ser verificado um ligeiro enriquecimento nos valores de $\delta^{13}\text{C}$. Balesdent et al. (1987) citaram três razões pra essas diferenças observadas entre as frações e em profundidade. Primeiro, a decomposição de substratos orgânicos poderia envolver um efeito isotópico normal, então, os produtos microbianos tornar-se-iam mais enriquecidos em ^{13}C do que os substratos. Segundo, nas plantas e microorganismos, ocorrem pequenas variações inter e intra-moleculares de $\delta^{13}\text{C}$. Assim, a decomposição diferenciada entre os diversos componentes do material pode gerar enriquecimentos isotópicos diferenciados. E por último, as variações climáticas locais e globais, já que os valores de $\delta^{13}\text{C}$ no tempo estão sendo modificados. Com a queima de combustíveis fósseis (petróleo e carvão), que são menos enriquecidos em $\delta^{13}\text{C}$ (BOUTTON, 1991), tem-se liberado na atmosfera CO_2 com menores enriquecimentos de ^{13}C . Assim, a matéria orgânica do solo mais antiga geralmente apresenta valores mais enriquecidos de ^{13}C . Outra possível causa de variabilidade reside no fato de que na humificação, os valores de $\delta^{13}\text{C}$ do carbono orgânico tendem a aumentar (VITORELLO et al, 1989).

Para quantificar o C da matéria orgânica do solo derivado da floresta e da planta cultivada, é necessário se conhecer o delta ^{13}C do solo sob floresta, que pode ser medido em uma amostra de solo de área de reserva próxima do sítio experimental, o enriquecimento do solo de uso agrícola e o enriquecimento dos resíduos da espécie agrícola. A técnica da abundância natural do ^{13}C possui limitações, quando duas premissas não são satisfeitas. Primeiro, haver diferença isotópica entre o material vegetal ou da matéria orgânica do solo sob a vegetação antiga e da nova vegetação. Segundo, deve-se conhecer o histórico das áreas.

Em áreas nas quais reconhecidamente predominam espécies C_3 e que foram substituídas por espécies de ciclo C_4 , as estimativas podem ser calculadas com precisão. Por isso, em solos onde a floresta primária ou secundária foi substituída pelas culturas da cana-de-açúcar, milho, pastagens de gramíneas tropicais, capim elefante, braquiária, oferecem condições ideais para o estudo. Já a utilização de espécies C_3 , como feijão, soja, arroz, hortaliças, café, laranja, apresenta dificuldades, gerando resultados pouco elucidativos. O histórico da área estudada também possui grande importância, pois ajuda a explicar os resultados obtidos, já que torna conhecido o manejo realizado na área em determinado tempo.

O desconhecimento do histórico da área é uma limitação que pode ser uma fonte de erro no uso da técnica. Na área em estudo, quando são utilizadas várias espécies C_4 após a substituição das espécies C_3 , seria necessário calcular quanto foi a contribuição de cada espécie durante o tempo que foram plantadas. Isso é uma grande dificuldade, porque cada planta tem a sua característica em relação à sua qualidade e quantidade de material produzido. Nessas condições, as estimativas podem perder precisão.

2.3 Fracionamento Físico da MOS

Nos últimos anos maior ênfase tem sido dada aos estudos que envolvam a dinâmica da MOS, através de modelos matemáticos que simulam o ciclo dos vários compartimentos de carbono no solo. Através do fracionamento físico se extrai a matéria orgânica de acordo com a sua localização na matriz do solo, oferecendo assim, uma boa oportunidade para alocar a MOS em compartimentos com diferentes níveis de reatividade (MOLINA et al, 1994; BALESSENT & MARIOTTI, 1996).

O fracionamento físico pode envolver a separação densimétrica e granulométrica e pelo menos uma etapa de dispersão do solo. O método densimétrico baseia-se na diferença de densidade entre a fração orgânica e a mineral. A densidade dos minerais do solo geralmente excede 2 g cm^{-3} , enquanto a de compostos orgânicos é menor que $1,5 \text{ g cm}^{-3}$ (GREGORICH & ELLERT, 1993, GAVINELLI et al, 1995), assim a amostra é submersa em soluções orgânicas ou soluções de sais inorgânicos com uma densidade específica, geralmente entre 1,6 a $2,0 \text{ g cm}^{-3}$. A flotação em líquidos com alta densidade específica permite, portanto, a separação da MOS em compostos com densidades mais baixas e mais altas do que a da solução utilizada. Tais frações são denominadas, respectivamente, leves e pesadas (GREGORICH & ELLERT, 1993). A fração leve (FL) corresponde à matéria orgânica não complexada, dividindo-se em: leve livre – separada antes da dispersão dos complexos organo-mineral secundários em complexos organo-mineral primários, e leve oclusa – separada após a dispersão - equivalente a matéria orgânica não complexada e oclusa (SOHI et al, 2011).

O conhecimento da quantidade de fração leve se torna fundamental em estudos de ciclagem da MOS por causa do papel intermediário entre plantas e húmus. Como era de se esperar, a composição química da fração leve é muito similar à da planta (MOLINA et al, 1994; BALESSENT & MARIOTTI, 1996). Além de proporcionar uma importante entrada na ciclagem da matéria orgânica, a fração leve também serve como um indicador das consequências das mudanças do manejo no solo. Por esta razão a fração leve deve ser considerada separadamente do húmus nos estudos de dinâmica da MOS (MAGID et al, 2002).

A fração leve é o compartimento de matéria orgânica composta de resíduos vegetais pouco ou não humificados, de baixa densidade, com características associadas aos resíduos vegetais (liteira). A fração leve intra-agregado ou oclusa é a fração leve fisicamente protegida no interior dos agregados. Estudos recentes têm mostrado que a fração leve intra-agregado possui composição diferente da fração leve, podendo ser considerada um outro compartimento (SOHI et al, 1998, FREIXO, 2000; FREIXO et al, 2002).

A fração leve tem composição semelhante aos resíduos vegetais, com maior perda dos compostos mais lábeis (carboidratos e proteínas), fragmentos de raízes, sementes, mesofauna e microfauna. Os teores de carbono variam de 20 a 40 %, e relação C:N alta maior do que 15 (FREIXO, 2000). Em solos onde ocorreram queimadas, pode-se observar materiais carbonificados em sua composição (ROSCOE et al, 2001). Dentre as frações da MOS, a fração leve é a que apresenta a maior variabilidade espacial e sazonal. Estudos espectroscópicos conduzidos por Freixo et al. (2002) mostraram que essa fração encontra-se nos estágios iniciais de transformação.

Embora possua grande similaridade com a serapilheira, apresenta algumas diferenças na sua composição química (ROSCOE & MACHADO, 2002). Ainda que sua relação C:N seja menor do que a de serapilheira é a maior dentre as três frações (leve livre, leve oclusa e pesada; CHRISTENSEN, 1992; ROSCOE & MACHADO, 2002). O que dificulta a sua decomposição é somente a sua qualidade (ROSCOE & MACHADO, 2002). O clima também tem um importante papel na sua conservação. Nas regiões mais úmidas e quentes (BAYER et al, 2004), esta fração representa uma menor porção do solo quando comparadas com as observadas em regiões mais frias e secas (CHRISTENSEN, 1992).

Em regiões tropicais, a maior parte da matéria orgânica do solo está na fração pesada. Bayer et al. (2004) observaram que a fração pesada representava 78% do carbono orgânico do solo em uma área florestal, e 82% em uma área de pastagem nativa, enquanto a fração leve representava 14 e 9%, respectivamente. ROSCOE & MACHADO (2002) observaram que a maior parte do carbono estava associada à fração pesada em áreas de Cerrado. Segundo estes autores, também acumulam em solos com baixo pH, e continuamente vegetados. No estudo de Freixo et al. (2002), o C-fração leve foi mais sensível à conversão de uma área cultivada inicialmente com arroz e depois com a forrageira *Andropogon gayanus*, em área de plantio direto. Pode-se considera-la como a mais sensível à degradação do solo pelo cultivo. Guggenberger & Zech (1999) observaram respostas significativas após três anos do estabelecimento de uma comunidade vegetal secundária em uma antiga área de pastagem. De acordo com os resultados destes autores, a fração leve foi restabelecida após 12 anos de vegetação secundária. Sendo assim, acredita-se que este seja um indicador precoce do declínio ou incremento da matéria orgânica no solo (BREMER et al, 1995; FREIXO et al, 2002; GUGGENBERGER & ZECH, 1999), em solos manejados há pouco tempo, onde alterações no estoque de C, por exemplo, ainda não são possíveis de se detectar. Esta capacidade é de grande relevância para tomada de decisões e reforça o seu uso como indicador.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Descrição das Áreas

O presente estudo foi conduzido no campo experimental do Condomínio Portugal, no município de Angra dos Reis, litoral sul do Estado do Rio de Janeiro, a altura do km 70 da Rodovia BR 101, nas coordenadas geográficas de 23° 02' 30'' S e 44 ° 11' 30'' W, variando em altitude em torno de 100 a 200 m do nível do mar. A área de estudo encontra-se inserida no domínio da Floresta Ombrófila Densa (VELOSO et al, 1991), bastante ocupada por antropismos, constituindo a vegetação remanescente em áreas de preservação permanente.

A caracterização climática da região enquadra-se na descrição do tipo climático Af de Koppen – tropical úmido. Possui precipitações anuais da ordem de 2.300 mm e temperaturas médias anuais em torno de 22,5°C, não possuindo estação seca definida.

A topossequência típica das encostas envolve associações de Argissolos Vermelho – Amarelo e Cambissolos, onde normalmente os Cambissolos ocupam os pontos mais íngremes e os Argissolos as partes menos declivosas. A rochiosidade também é muito freqüente nestas unidades, agravando os riscos de erosão e deslizamentos (Depto de Solos, UFRRJ, 1992). Quanto ao relevo, a encosta estudada apresenta relevo forte ondulado.

As avaliações foram realizadas em áreas declivosas e adjacentes do condomínio. A exposição do solo à alta pluviosidade que predomina nessa região levou ao desenvolvimento de processos avançados de erosão nesta área. Isso resultou na formação de voçorocas e sulcos profundos, além do crescimento de espécies invasoras, com predomínio de capim gordura (*Melinis minutiflora*). Para minimizar este impacto e recuperar parte desta área, foi implantado reflorestamento em outubro de 1992, com espécies de leguminosas arbóreas de rápido crescimento (Figura 1).

As mudas foram preparadas de acordo com Franco et al. (1992) e transplantadas quando atingiram aproximadamente 30 cm de altura. Todas as mudas foram associadas simbioticamente a bactérias fixadoras de nitrogênio e fungos micorrízicos arbusculares. Para o plantio foram abertas covas de 20 x 20 x 20 cm, em espaçamento de 2 x 2 m.



Figura 1. Área reflorestada há 17 anos com leguminosas

A área adjacente a este reflorestamento foi mantida nas condições originais com predominância de gramíneas há mais de 50 anos, sem nenhum tipo de manejo (Figura 2).

Neste trabalho, esta área foi denominada gramíneas, servindo como referência das mudanças que ocorreram no reflorestamento.



Figura 2. Área com predominância de gramíneas

Também foi amostrada área de floresta secundária (Figura 3) que se encontra em encosta similar ao do estudo, localizada cerca de 20 km de distância destas áreas. Nesta área ocorre o predomínio de espécies nativas do bioma Mata Atlântica com poucos sinais de perturbação, servindo assim como uma provável referência da condição original, na fase anterior ao desflorestamento desta região. Neste estudo esta área foi denominada de Mata.



Figura 3. Área de floresta secundária (mata), do Bioma Mata Atlântica

3.2. Análises Físicas e Químicas do Solo

Foram avaliados parâmetros físicos e químicos para verificar se o solo sob os três tipos de vegetação seria semelhante, condição essencial para este tipo de estudo. Em setembro e outubro de 2008 as áreas foram divididas em quatro subáreas permanentes de 20m x 40m (800m²) uma em cada ponto da encosta com aproximadamente 60%, 45%, 25% e 10% de declividade, cada parcela permanente foi subdividida em 4 subparcelas de 200m², onde foi aberta uma trincheira, com cerca de 2,0x1,0x1,1 m. Nestas trincheiras, foram coletadas amostras de terra, com uso do anel de Kopeck, para determinação da densidade do solo, nas profundidades 0–5, 5–10, 10–20, 20–40, 40–60 cm. As amostras retiradas para determinação

da densidade do solo foram secas em estufa a 105°C, por 48 horas e pesadas em balança de duas casas decimais. Foi retirada também uma amostra composta de cada profundidade, formada por seis amostras simples, para determinação da textura e das características químicas do perfil do solo.

As amostras compostas foram secas ao ar por três dias, destorroadas e peneiradas em malha de 2 mm. Parte das amostras foi encaminhada ao Laboratório de Solos e Nitrogênio da Embrapa Agrobiologia para análise química, e outra parte encaminhada ao Laboratório de Física do Solo do Instituto de Agronomia da UFRRJ para análise granulométrica. As análises químicas e granulométricas foram realizadas de acordo com a metodologia da (EMBRAPA, 1997). A quantidade de carbono e nitrogênio nas áreas foi estimada associando-se a massa de solo de cada camada com seu respectivo teor. A massa de solo foi corrigida com base no perfil de referência, observada na área de reflorestamento com leguminosas, como proposto por Neill et al. (1997) e aplicado por Sisti et al. (2004).

3.3. Serapilheira Acumulada

Em todas as áreas também foi quantificada a serapilheira e, para isso, foram amostradas quatro parcelas na área de mata secundária, gramíneas e recuperada com leguminosas. As coletas foram feitas em pontos representativos dessas áreas, onde todo o material que ficou dentro do quadrado de aço de 0,25 m² foi removido. Posteriormente, o material coletado foi seco em estufa de ventilação forçada a 65°C e pesado em balança com precisão de duas casas decimais.

3.4. Determinação de Carbono no Solo

A concentração de carbono orgânico total do solo foi determinada pelo método de combustão a seco. Pesou-se aproximadamente 300 mg de cada amostra de solo com precisão de 4 casas decimais em cápsulas de estanho e analisadas em um auto-analisador de carbono, a 900°C (modelo CHN-600, LECO Corp, St. Joseph, MI, USA), no Laboratório de Solos da Embrapa Agrobiologia. O teor de carbono foi medido a partir da absorção de radiação infravermelha pelo CO₂ liberado na combustão. Os resultados foram impressos ao final da análise e expressados em percentual de carbono da amostra. A cada 10 amostras o aparelho foi calibrado com amostras-padrão do laboratório.

3.5. Determinação de Nitrogênio no Solo

A concentração de nitrogênio do solo foi determinada em alíquotas de 1000 mg de solo utilizando-se o método de digestão semi-micro Kjeldahl (BREMNER & MULVANEY, 1982), digerindo-se as amostras com ácido sulfúrico concentrado e catalisadores (CuSO₄/K₂SO₄ / Se, na proporção de 100:10:1) a 150 °C por 1 hora e depois 300 °C por mais 3 horas (ou até o clareamento da solução). Após a digestão, as amostras foram alcalinizadas com 20 mL de NaOH 50%, destiladas em arraste a vapor e tituladas com uma solução alcoólica de ácido bórico + azul metil + vermelho metil em um destilador automático Kjeltac Auto-analyzer modelo 1030 (TECATOR, Höganäs, Sweden), obtendo-se então o teor total de nitrogênio da amostra. Em cada bloco digestor contendo 40 amostras foram analisadas duas amostras em branco e duas amostras-padrão (padrões de Laboratório) de solo para calibração da análise (LIMA et al, 1987).

3.6. Fracionamento Físico da Fração Leve Livre da Matéria Orgânica do Solo

Para a avaliação da fração leve livre (FL) da matéria orgânica do solo (MOS) foi feito o fracionamento físico por densidade nas amostras do solo, de acordo com a metodologia proposta por Sohi et al. (2001), com modificações (FREIXO et al, 2002) nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-60 cm, com quatro repetições por trincheira.

A fração leve livre foi extraída do solo por meio de uma solução de NaI com densidade de $1,80 \text{ g cm}^{-3}$, na proporção de 5 g de terra fina seca ao ar para 40 mL de solução, com duas amostras por repetição. Uma vez adicionada a solução de NaI à amostra, o material foi submetido a uma leve agitação manual por 1 minuto e deixado em repouso por 24 h. Após este tempo, o sobrenadante foi succionado através de uma bomba de vácuo (Sistema Asséptico Sterefil, 47 mm – Milipore) com filtros de fibra de vidro (47 mm de diâmetro; 2 microns – Whatman tipo GF/A). O material retido no filtro considerou-se como fração leve livre. Este material (Filtro + FL) foi lavado com água destilada para a eliminação do NaI em excesso e seco em estufa a 65° C durante 48 h.

As amostras foram moídas, pesadas e analisadas para a quantificação do estoque de C e a abundância isotópica de ^{13}C neste compartimento, FL, através de um espectrômetro de relação de massa isotópica de fluxo contínuo Finnigan DeltaPlus (Finnigan MAT, Watham, MA, Alemanha).

3.7. Estoque de Carbono e Nitrogênio Total e na Fração Leve Livre da Matéria Orgânica do Solo

A quantidade de carbono e nitrogênio total na fração leve livre da matéria orgânica do solo nas áreas foi estimada comparando os tratamentos na mesma massa de solo de um perfil referencia. Neste caso a massa de solo do perfil de referência correspondeu a massa de solo contida no perfil sob as gramíneas, uma vez que, como será visto adiante, os estudos de ^{13}C demonstraram que o solo sob vegetação nativa apresenta características diferentes das outras áreas. Nos demais tratamentos, a massa excedente foi subtraída da camada superficial (20-30 cm) quando se considerou o perfil do solo até 30 cm e na camada mais profunda (40-60 cm) quando se considerou todo o perfil do solo (0-60 cm). O conteúdo de C e N totais e na fração leve da MOS foram recalculados para ajustar ao valor da massa de solo do perfil referencia (SISTI et al, 2004; NEILL et al, 1997). Esta correção foi expressa matematicamente por Sisti et al. (2004).

3.8. Abundância Natural de ^{13}C no Perfil do Solo

A origem do carbono do solo foi estimada em porcentagem, com base na relação do isótopo de $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ presente no solo. A abundância isotópica de ^{13}C do solo foi determinada em alíquotas contendo entre 200 e 400 μg de carbono total, utilizando um espectrômetro de relação de massa isotópica de fluxo contínuo (espectrômetro de massa Finnigan DeltaPlus acoplado em um auto-analisador de C e N total Carlo Erba EA 1108 – Finnigan MAT, Bremen, Alemanha).

A proporção de carbono do solo das leguminosas (plantas C_3), que ingressou no solo após a substituição das gramíneas e mata (plantas $\text{C}_3 + \text{C}_4$) e a abundância isotópica de ^{13}C original do solo foi calculada pela técnica desenvolvida por Balesdent et al. (1988). Para os cálculos, foi utilizada a média dos valores de abundância natural de ^{13}C em cada profundidade do solo. Já para a determinação da abundância isotópica de ^{13}C e incorporação de C no solo na área de pasto (plantas C_4), foi utilizado o procedimento padrão de mistura simples, onde foram retiradas 4 amostras simples formando uma amostra composta. Essas amostras foram secas em estufa a 65°C por 72 horas, e moídas finamente para análise no espectrômetro de massa (Finnigan MAT, Waltham, MA, Alemanha).

Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ foram estimados de acordo com a equação abaixo:

$$\delta^{13}\text{C} (\text{‰}) = \left(\frac{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C}) \text{ amostra}}{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C}) \text{ padrão}} - 1 \right) \times 1000$$

3.9. Análise Estatística

Os estoques de C e N no solo e na fração leve da matéria orgânica do solo e a abundância natural de ^{13}C foram submetidos à análise de normalidade (teste de Lilliefors, 1%) e homogeneidade de variância dos erros (teste de Cochran e Bartlett 1%), pelo programa SAEG 5.0 (RIBEIRO JÚNIOR, 2001). Após a análise de variância, os tratamentos foram comparados conforme o delineamento inteiramente casualizado, com 4 repetições e as médias das duas áreas (reflorestamento com leguminosas e gramíneas) comparadas pelo teste t de Bonferroni a 5% de probabilidade, pelo programa Sisvar (FERREIRA, 2003).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Análise Físicas e Químicas do Solo

Para todas as áreas avaliadas, observou-se uma baixa fertilidade do solo ao longo de todo o perfil do solo, uma vez que são altamente intemperizados, apresentam baixo pH, baixa disponibilidade de bases trocáveis e alto teor de Al (Tabela1). As áreas de mata secundária e reflorestamento com leguminosas apresentaram uma maior fertilidade em relação a área de gramíneas. A manutenção da palhada na superfície do solo provavelmente contribuiu na adição de nutrientes no perfil do solo, ciclando quantidades maiores que na área de gramíneas.

A área de mata apresentou os maiores teores de Ca+Mg na camada de 0-40 cm, sendo que na profundidade de 0-5 cm, a área de recuperação com leguminosas apresentou valores bem próximos a estes. Os resultados de fósforo foram semelhantes nas áreas de reflorestamento com leguminosas e mata nas três primeiras profundidades avaliadas (até 20 cm), ou seja, de 0-5 cm, 5-10 cm e 10-20 cm, sendo que em profundidade os maiores valores observados foram encontrados na área de mata secundária e os menores na área de gramíneas. O aumento do Ca, Mg e P na área em recuperação pode refletir a adubação efetuada por ocasião no plantio das mudas no campo, onde foram utilizados 100g de fosfato natural e 100g de superfosfato simples por cova.

Tabela 1. Análise química do solo ao longo do perfil, em três áreas avaliadas, no município de Angra dos Reis, RJ.

Prof. (cm)	Local	pH* Em H ₂ O	Al ⁺³ * -----cmol _c /dm ³ -----	Ca ⁺² * + Mg ⁺² * -----cmol _c /dm ³ -----	P* -----mg/dm ³ -----	K ⁺ *
0-5	Reflorest..	4,0	1,4	1,2	6,0	78,0
	Gramíneas	4,6	1,3	0,3	0,6	76,0
	Mata	4,3	0,6	1,5	6,5	75,0
5-10	Reflorest.	4,1	1,8	0,3	4,1	50,0
	Gramíneas	4,6	1,3	0,2	0,0	57,0
	Mata	4,4	1,0	0,8	4,8	55,0
10-20	Reflorest.	4,1	1,7	0,0	3,8	50,0
	Gramíneas	4,7	1,5	0,0	0,0	47,0
	Mata	4,5	0,8	0,3	4,3	39,0
20-30	Reflorest.	4,2	2,0	0,0	1,6	44,0
	Gramíneas	4,8	1,6	0,0	0,0	33,0
	Mata	4,6	1,0	0,2	3,9	35,0
30-40	Reflorest.	4,2	1,8	0,0	1,7	46,0
	Gramíneas	4,7	1,6	0,0	0,0	33,0
	Mata	4,7	1,0	0,1	4,1	31,0
40-60	Reflorest.	4,2	1,8	0,0	2,0	41,0
	Gramíneas	4,8	1,5	0,0	0,0	29,0
	Mata	4,7	1,0	0,0	4,2	29,0

* valores médios de quatro repetições

A disponibilidade de K não foi significativa entre as áreas, no entanto, a área de reflorestamento com leguminosas apresentou os maiores teores, principalmente em profundidade. É provável que, além da adubação feita no plantio, esta disponibilidade esteja

relacionada com o K proveniente do intemperismo do solo. Estudos em outras áreas indicam que após a queima, a disponibilidade de K no solo aumenta por um curto período, retornando a níveis mais baixos logo em seguida (SANCHEZ et al, 1983; DIEZ et al, 1991).

Segundo Macedo (2007), os teores de nutrientes ligeiramente maiores na área de reflorestamento, quando comparada com a de gramíneas, provavelmente é produto da adubação utilizada no plantio das mudas no campo, que retornam ao sistema através da deposição e decomposição da serapilheira. Além disso, a perda dos horizontes mais superficiais do solo expôs as camadas de solo mais ricas em minerais primários, que associado ao clima e ao tempo, pode estar liberando parte das bases contidas neste solo.

Nas áreas de gramíneas e reflorestamento com leguminosas, a textura do solo foi semelhante ao longo do perfil (Tabela 2). O solo sob a área de mata apresentou uma textura mais arenosa em relação a essas 2 áreas ao longo de todo o perfil do solo, não podendo ser utilizada como uma área de referência, por este critério.

Tabela 2. Análise granulométrica do perfil do solo sob as diferentes áreas, no município de Angra dos Reis, RJ.

Prof. (cm)	Areia			Silte			Argila		
	Mata	Gram. ^a	Reflo. ^b	Mata	Gram.	Reflo.	Mata	Gram.	Reflo.
	-----(g/kg^{-1})-----								
0-5	647	560	566	144	206	179	209	234	255
5-10	563	506	514	182	249	236	255	245	250
10-20	575	513	525	172	233	227	254	254	248
20-30	554	488	466	171	241	267	276	271	267
30-40	567	431	442	187	267	275	247	302	283
40-60	536	422	422	205	250	276	260	328	302

^a Gram.- área sem manejo, com crescimento de gramíneas de crescimento espontâneo.

^b Reflo.- área com reflorestamento com leguminosas arbóreas.

Os valores de densidade do solo estão apresentados na Tabela 3. Entre as áreas de gramíneas e reflorestamento com leguminosas, os valores de densidade do solo foram significativamente diferentes pelo teste 't' (Bonferroni) apenas na camada superficial (0-5 cm). Nas demais camadas não foram observadas diferenças significativas, sendo que variações de densidade na camada superficial do solo são normais, devido aos processos erosivos que ocorrem nessa região. As sensíveis variações da densidade do solo nas camadas abaixo de 40 cm de profundidade são um indicativo de que as áreas de estudo (gramíneas e reflorestamento) estão localizadas em solos semelhantes quanto a este parâmetro, já que as práticas de manejo do solo não influenciam nessas camadas.

Os menores valores de densidade foram observados na área de floresta. Este resultado era esperado, pois esta área sofreu pouca perturbação do solo, mas deve-se destacar que abaixo de 40 cm, onde não se tem influência do manejo, a densidade foi bem superior as outras áreas, o que comprova que este solo possui uma natureza diferente das áreas de reflorestamento com leguminosas e gramíneas. Juntamente com este aspecto, a maior diversidade da vegetação acarreta um aumento na atividade biológica e na diversidade dos organismos do solo, o que promove a descompactação do solo (ROSSI et al, 2006).

Tabela 3. Densidade do solo (Mg m^{-3}) sob as diferentes coberturas vegetais, no Município de Angra dos Reis, RJ.

Profundidade (cm)	Mata	Gramíneas (Mg m^{-3})	Reflorestamento
0-5	1,02	1,12b*	1,17a
5-10	1,19	1,22ns	1,19
10-20	1,33	1,30ns	1,24
20-30	1,37	1,25ns	1,39
30-40	1,38	1,39ns	1,43
40-60	1,44	1,29ns	1,26

*Médias seguidas pela mesma letra, na linha, não diferem entre si pelo teste t (Bonferroni; $P < 0,05$).
ns: não significativo

Portanto, observou-se assim que a textura do solo nessas áreas corrobora com os resultados de densidade, indicando a semelhança do solo sob as duas áreas de estudo (gramíneas e reflorestamento com leguminosas), condição essencial para este tipo de estudo. Esta confirmação permite a comparação segura dos estoques de carbono e nitrogênio entre as duas áreas avaliadas. Após estes resultados, a área sob floresta foi empregada apenas como referencia para dar uma idéia de uma provável condição original sob vegetação nativa, mas os resultados dela não participaram das análises estatísticas.

4.2. Serapilheira Acumulada

A área reflorestada com leguminosas arbóreas há 17 anos apresentou os maiores valores de estoque de serapilheira (Figura 4). O plantio dessas espécies proporcionou aumento em relação à área de gramíneas de $3,1 \text{ Mg ha}^{-1}$ de serapilheira, o que representa incremento de $182,4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de matéria seca.

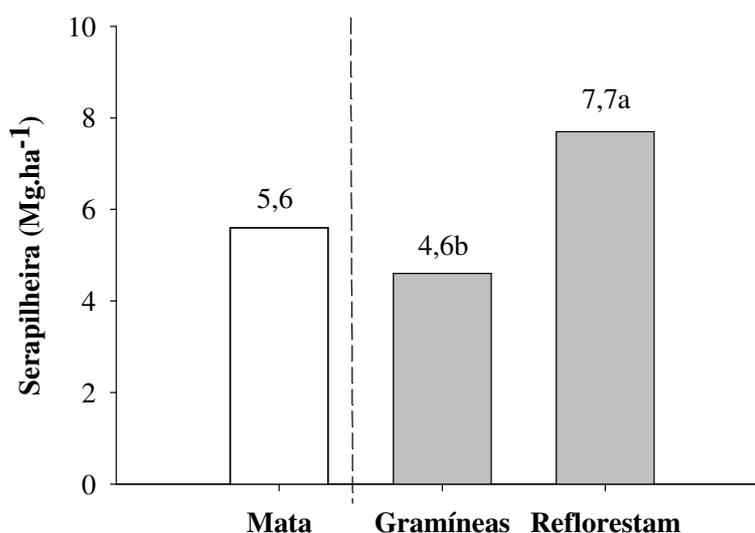


Figura 4. Serapilheira acumulada (Mg.ha^{-1}) nas áreas de mata, gramíneas e reflorestada há 17 anos com leguminosas, no município de Angra dos Reis, RJ. Barras seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste T (Bonferroni; $P < 0,05$).

Os estoques encontrados, de 5,6 Mg ha⁻¹ de serapilheira na área de mata, 4,6 Mg ha⁻¹ na área de gramíneas e de 7,7 Mg ha⁻¹ na área reflorestada com leguminosas, são similares aos encontrados por Macedo (2007), avaliando estoques de serapilheira em mata secundária (5,0 Mg ha⁻¹) e por 13 anos em recuperação com leguminosas (6,7 Mg ha⁻¹), no município de Angra dos Reis-RJ. Vital et al. (2004) em floresta estacional semidecidual em zona ripária localizada no sudeste da Mata Atlântica encontraram estoques de 6,2 Mg ha⁻¹, e estoques próximos aos observados por Arato et al. (2003) e Cunha et al. (1993) em um sistema agroflorestal estabelecido há 9-10 anos em uma área degradada (8,7 Mg ha⁻¹) e em área de floresta estacional decidual (6,7 Mg ha⁻¹), respectivamente.

Ewel (1976) observou que durante os primeiros vinte anos de sucessão havia um aumento no acúmulo de serapilheira que superava a da mata nativa. No entanto, as variações nos resultados encontrados por diversos autores, dificultam a comparação entre áreas, e se deve ao fato do aporte e do estoque de serapilheira variarem não só em função da idade, mas também em função do solo, clima, composição, idade da comunidade vegetal (EWEL, 1976; MARTIUS et al, 2004).

Em estudo realizado por Coutinho (2009), foram encontrados 8,22 Mg ha⁻¹ de serapilheira acumulada em área de reflorestamento aos 4 anos de idade com eucalipto e 9,93 Mg ha⁻¹ em área de regeneração natural de espécies nativas no município de Cruzeiro-SP num período de 35 anos. Paixão et al, (2006), encontraram 17,4 Mg ha⁻¹, em um povoamento de *Eucalyptus grandis*, no município de Viçosa-MG, aos 72 meses de idade, Gatto (2005) encontrou valor estimado médio de 6,83 Mg ha⁻¹, aos 84 meses.

Binkley & Giardina (1997) também relataram aumentos nos teores de matéria orgânica e N total, em plantios de leguminosas florestais. Além do aporte elevado de biomassa ao solo, estas espécies contribuem para a ciclagem de nutrientes de um modo mais efetivo, uma vez que as características químicas do material aportado são geralmente superior aquela oriunda de espécies não leguminosas.

A maior capacidade de algumas espécies de leguminosas arbóreas como *Acacia mangium* e *Mimosa caesalpiniiifolia* no fornecimento de serapilheira e nutrientes, em comparação com outros ambientes florestais evidencia o potencial de utilização dessas espécies em programas de revegetação para reabilitação de áreas. Andrade et al. (2000), encontraram valores de 7; 7,5 e 11 Mg.ha⁻¹ de serapilheira para *M. caesalpiniiifolia*, *A. mangium* e *A. holosericea*, respectivamente, com 8 meses de plantio.

Os teores da matéria orgânica do solo de regiões tropicais são, geralmente, baixos e regulados pela produção primária líquida do material orgânico, pela partição dos fotoassimilados entre parte aérea e raízes e, pela velocidade de decomposição dos compostos orgânicos (BATJES, 1996). Os nutrientes liberados pela decomposição da serapilheira podem afetar a produtividade primária de um ecossistema, à medida que se tornam disponíveis para as plantas, e que não sejam perdidos do sistema (MATHERS et al, 2003). Assim, a serapilheira representa importante via de aporte de C e nutrientes minerais ao solo.

Em solos das regiões tropicais úmidas, a manutenção da matéria orgânica no solo pode ser até mais importante para manter a sua produtividade, do que a liberação de nutrientes em curto prazo e possivelmente as espécies de menor taxa de decomposição serão as que mais beneficiam a sustentabilidade da matéria orgânica do solo a médio e longo prazo.

4.3. Determinação de Carbono e Nitrogênio no Solo e na Fração Leve Livre da MOS

De maneira geral, os teores de C e N (Figura 5) foram mais altos na camada superficial do solo (0-5 cm), e reduziram em profundidade até 60 cm. A mata apresentou os maiores valores em praticamente todas as camadas, sendo que nas camadas mais profundas do solo, a área de reflorestamento apresentou valores próximos aos observados nesta área.

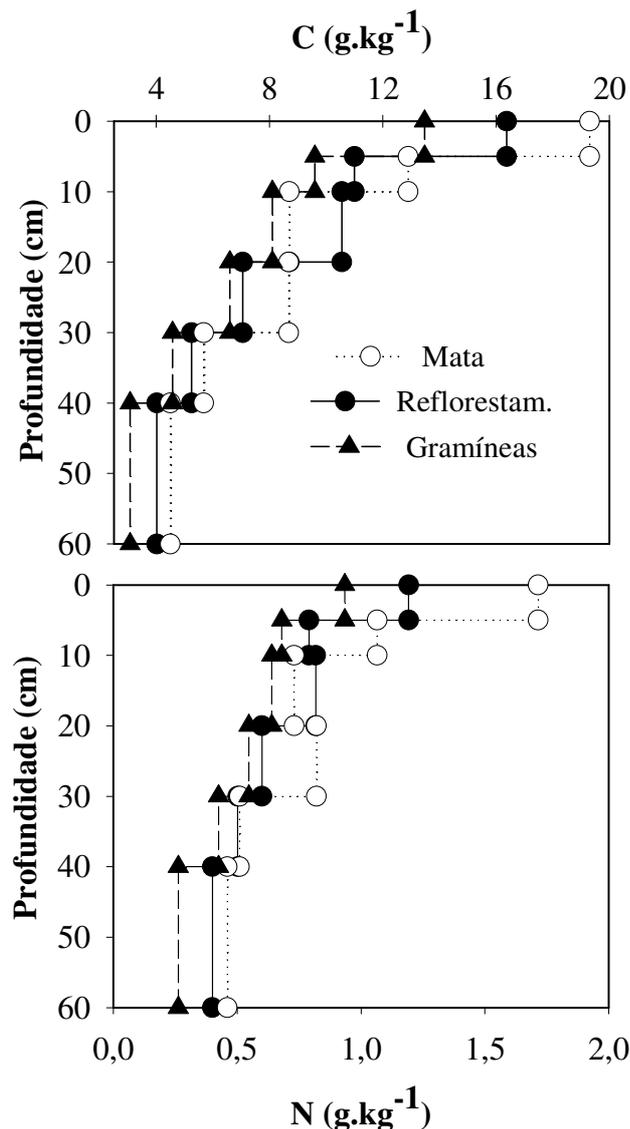


Figura 5. Teores de carbono (CT) e nitrogênio (NT) (g.kg^{-1}) no perfil do solo sob as áreas de mata, gramíneas e reflorestada há 17 anos com leguminosas, no município de Angra dos Reis, RJ.

Os teores de C do solo nas áreas de mata, no reflorestamento com leguminosas arbóreas e área de gramíneas variaram de 19,3, 16,4 e 13,5 g C kg^{-1} na camada 0-5 cm, até valores equivalentes a 4,5, 4,02 e 3,07 g C kg^{-1} de solo, na camada 40-60 cm respectivamente. Os teores de N do solo acompanharam os teores de C, apresentando assim um comportamento semelhante, variando de 1,7, 1,2 e 0,9 g N kg^{-1} na camada 0-5 cm, até valores de 0,46, 0,40 e 0,26 g N kg^{-1} de solo, na camada 40-60 cm (Figura 5).

A área reflorestada com leguminosas apresentou teores de C e N elevados em relação à área de gramíneas em praticamente todo o perfil do solo. Essa maior concentração de carbono e nitrogênio na área reflorestada com leguminosas provavelmente se deve ao fato da maior ciclagem de nutrientes proporcionada por essas espécies, em decorrência da maior quantidade, qualidade e menor relação C:N da serapilheira (MACEDO, 2007).

O incremento de N, promovido pelas leguminosas, é de grande relevância em processos de recuperação de áreas degradadas. Francis & Read (1994) demonstraram que após o aporte de nitrogênio, o ecossistema adquire capacidade maior de suportar uma

comunidade vegetal mais complexa. Por este motivo espécies vegetais do gênero leguminosas vem sendo estudadas como fonte de N em diferentes sistemas tropicais, como pastagens (MACEDO, 2003), plantio direto (SISTI et al, 2004), silvicultura (BALIEIRO, 2002), e sistemas agroflorestais (HANDAYANTO et al, 1995).

Os teores de CT e NT no solo estão intimamente relacionados, como mostrou a correlação de Pearson (Figura 6). Christopher & Lal (2007) destacam a importância da adição de N associada à adição de serapilheira (palhada), para manter, e mesmo, incrementar o estoque de C do solo.

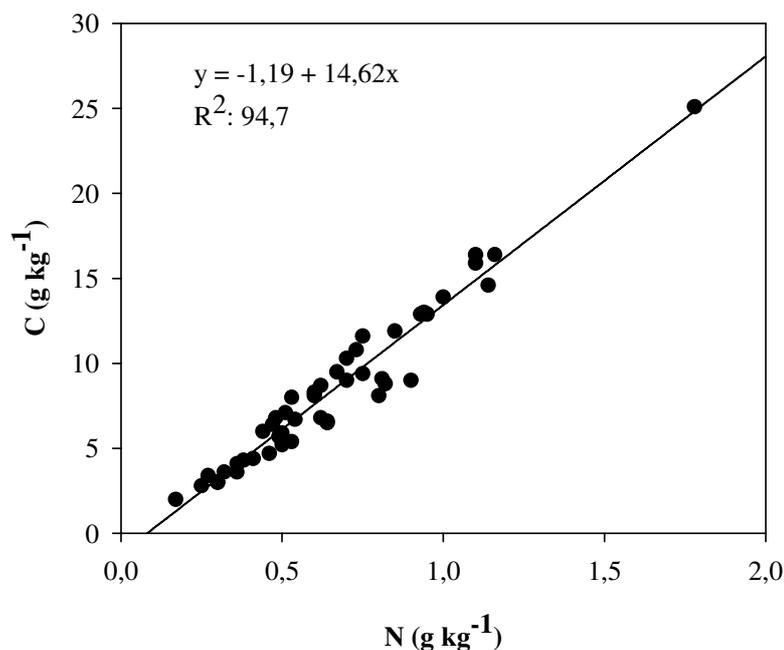


Figura 6. Correlação entre as concentrações de nitrogênio e de carbono observadas nas áreas de mata, gramíneas e reflorestada há 17 anos com leguminosas, no município de Angra dos Reis, RJ.

A relação C:N do solo, para a camada de 0-60 cm, variou entre 14 e 10, o que corrobora aos resultados encontrados na literatura, onde essa relação próxima de 10. Garay et al. (2003) compararam os teores de matéria orgânica em plantios de eucalipto e da leguminosa *Acacia mangium* e verificaram que o maior estoque de serapilheira no plantio de acácia (10 Mg ha⁻¹, em comparação a 5 Mg ha⁻¹ no plantio de eucalipto), aliado à sua menor relação C:N, resultou em maior teor de matéria orgânica no solo, possivelmente decorrente também da sua maior concentração de N. Assim apesar de existir maior produção de serapilheira pela acácia, em função da sua relação C:N mais estreita, a mineralização é maior.

Estudos conduzidos por Franco et al. (1994) em áreas de mineração de bauxita em Porto de Trombetas-PA, reabilitadas com leguminosas arbóreas fixadoras de nitrogênio e de crescimento rápido, promoveram adição de até 200 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N, contribuindo para o sucesso do processo de reabilitação da área. Na Austrália, também em áreas de mineração de bauxita, a utilização de leguminosas como *Mimosa scabrella* na reabilitação aumentou o teor de N total após 9 anos, sendo adicionados em torno de 300 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N via deposição de resíduos vegetais, enquanto em área adjacente reabilitada com eucalipto a adição de N ficou em 63 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N (WARD, 2000).

Balieiro et al. (2003) avaliando a quantidade de N aportado em plantios puros e

consorciado de guachapele (*Pseudosamanea guachapele*) e eucalipto (*Eucalyptus grandis*) encontraram valores de N próximos a 250 kg ha⁻¹ no plantio puro de guachapele, sendo este superior à dos demais tratamentos como também as quantidades relatadas por Costa (1998), Froufe (1999) e Andrade et al. (2000), para diversas espécies de leguminosas em Seropédica-RJ. No sistema consorciado foi observado aporte de 66, 1 kg ha⁻¹ de N e de 58,0 kg ha⁻¹ no plantio puro de eucalipto, evidenciando o benefício da leguminosa naquele sistema. Essa contribuição parece pequena, mas considerando-se a participação porcentual do material aportado pela leguminosa (de apenas 11%) e a importância do N na atividade biológica e estabilização da matéria orgânica do solo, pode-se afirmar que plantios consorciados de eucalipto com leguminosas poderiam aumentar o acúmulo de matéria orgânica do solo, principalmente nos de textura mais arenosa, como neste estudo.

Peoples & Craswell (1992) descrevem que os benefícios das leguminosas não são atribuídos somente ao N residual proveniente da FBN, mas também pela melhoria da estrutura e aeração do solo, densidade e redução da erosão, além de efeitos sobre o armazenamento de água pelo solo e incremento na disponibilidade de nutrientes associado à incorporação dos resíduos das leguminosas (BURESH & DE DATTA, 1991).

Nesse sentido, frações da MOS que têm ciclagem mais rápida, como a fração leve livre (FL) são muito importantes, pois contribuem para a ciclagem de nutrientes, visto que são fontes de energia mais prontamente disponíveis para os microrganismos responsáveis por esta ciclagem (JANZEN et al, 1992). Além disso, Roscoe & Machado (2002) afirmam que o único mecanismo de proteção da FL é a recalcitrância dos seus materiais constituintes, o que a torna mais disponível para a microbiota do solo, e conseqüentemente, mais sensível para detectar modificações na MOS, antes mesmo que os teores de carbono orgânico e nitrogênio do solo.

A quantidade de C na FL da MOS variou entre 1,63 e 5,47 g kg⁻¹ de solo na área de reflorestamento com leguminosas e 1,03 e 3,37 g kg⁻¹ na área sob cobertura de gramíneas (Figura 7). Souza (2004) estudando um solo arenoso (Neossolo Quartzarênico) da Amazônia Central obteve quantidade de carbono na FL em áreas alteradas, variando na FL de 0,6 g.kg⁻¹ a 1,9 g.kg⁻¹.

As quantidades de C na fração leve livre foram maiores na superfície (0-5 cm) e reduziram-se com a profundidade (40-60 cm). Decréscimos nos teores de C da FL, à medida que se aprofunda no perfil do solo, também foram relatados em outros estudos (BOONE, 1994; SIX et al, 1999; CANELLAS et al, 2000), que de acordo com esses autores, deveu-se ao maior aporte de resíduos orgânicos na camada superficial do solo. Fato que também ocorreu em povoamento de eucalipto (RANGEL & SILVA, 2007; LIMA et al, 2008).

A quantidade de N apresentou comportamento semelhante às de C, sendo superiores na área de reflorestamento com leguminosas, atingindo 5,47 g N kg⁻¹ enquanto na área de gramíneas apresentou valores próximos a 3,37 g N kg⁻¹ na camada de 0-5 cm (Figura 7). Estes resultados demonstram o potencial das leguminosas arbóreas fixadoras de nitrogênio no aumento das quantidades de C e N da fração leve livre adicionada ao solo, que pode refletir em todos os compartimentos do solo.

Não foi observada diferença estatística entre as duas áreas de estudo, embora os resultados mostrem uma tendência para um aumento da quantidade de C e N na fração leve livre no solo introduzido com as leguminosas arbóreas.

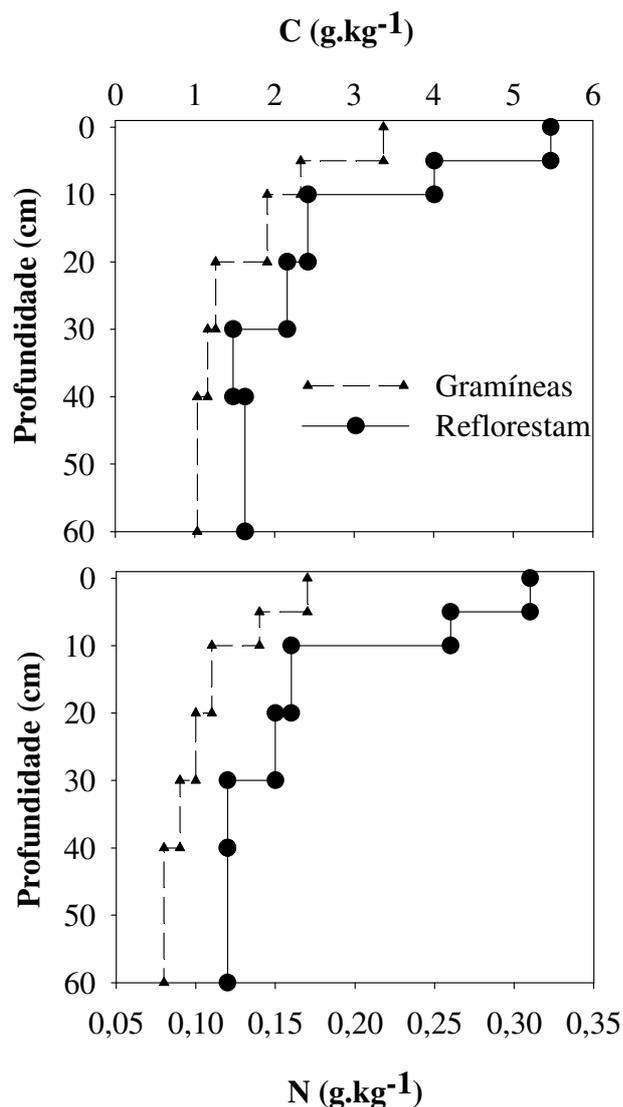


Figura 7. Teores de carbono e nitrogênio (g.kg^{-1}) na fração leve da MOS sob nas áreas de gramíneas e reflorestada há 17 anos com leguminosas, no município de Angra dos Reis, RJ.

4.4. Estoques de C e N no Perfil do Solo e na Fração Leve Livre da MOS

O estoque de C na mata foi de 64 Mg.ha^{-1} , seguido pelo estoque de 59 Mg.ha^{-1} da área reflorestada com leguminosas arbóreas que apresentou maiores valores de estoque de C do solo, em comparação com a área de gramíneas de 49 Mg.ha^{-1} . No entanto, não houve diferença significativa entre as áreas, para as camadas de 0-30 e 0-60 cm (Figura 8).

Independentemente da área de estudo, mais de 50% do estoque de carbono do solo encontrava-se até a profundidade de 0-30 cm. Avaliando-se a camada de 0-60 cm, encontrou-se um incremento de $0,6 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de C na área de reflorestamento com leguminosas em relação à área de gramíneas, o que proporcionou um aumento de 20% no estoque de carbono no solo (Figura 7).

Ao avaliar a dinâmica do carbono na conversão de floresta em pastagens em dois Argissolos, no estado do Acre, Salimoni et al. (2007), encontraram maior estoque de carbono no solo principalmente nos dez primeiros centímetros sob pastagem com idades de 13 e 14 anos. Quando compararam áreas de pastagem com a mesma idade, com áreas de floresta

secundária e floresta primária, o incremento de carbono foi em torno de $1,2 \text{ Mg.C.ha}^{-1}.\text{ano}$. Deve-se destacar que esta comparação foi feita sem levar em consideração a correção pela massa do solo referencia.

Trabalhos recentes já vêm relatando a importância do carbono contido nas camadas mais profundas, para o estoque de C do solo (BODDEY et al, 2010; NEPSTAD et al, 1994; FELDPAUSCH et al, 2004;). Segundo Nepstad et al. (1994), em uma floresta na região amazônica, os valores de C em profundidade ultrapassam os estoques observados na biomassa vegetal e horizontes superficiais.

A maioria dos estudos tem avaliado a incorporação de C apenas nas camadas superficiais do solo (até 30 cm), e poucos trabalhos tem sido realizados relacionando o potencial de acúmulo de C nas camadas mais profundas (até 100 cm) dos solos tropicais e subtropicais. Em alguns estudos realizados, especialmente no Canadá (VANDENBYGAART et al, 2003) onde os solos foram amostrados em maiores profundidades, foi encontrado um maior estoque de carbono em profundidade sob área de preparo convencional do que em área conservacionista, sugerindo assim que o maior acúmulo de carbono total na área conservacionista reflete a área de amostragem que foi feita (até 30 cm). A mesma conclusão foi feita por Blanco-Canqui & Lal (2008) a partir de estudos feitos em 11 locais localizados em 3 estados dos Estados Unidos da América. Vários estudos têm mostrado que a introdução de leguminosas arbóreas também mostrou ser altamente eficaz no acúmulo de C no solo (RESH et al, 2002; BINKLEY, 2005, MACEDO et al, 2008).

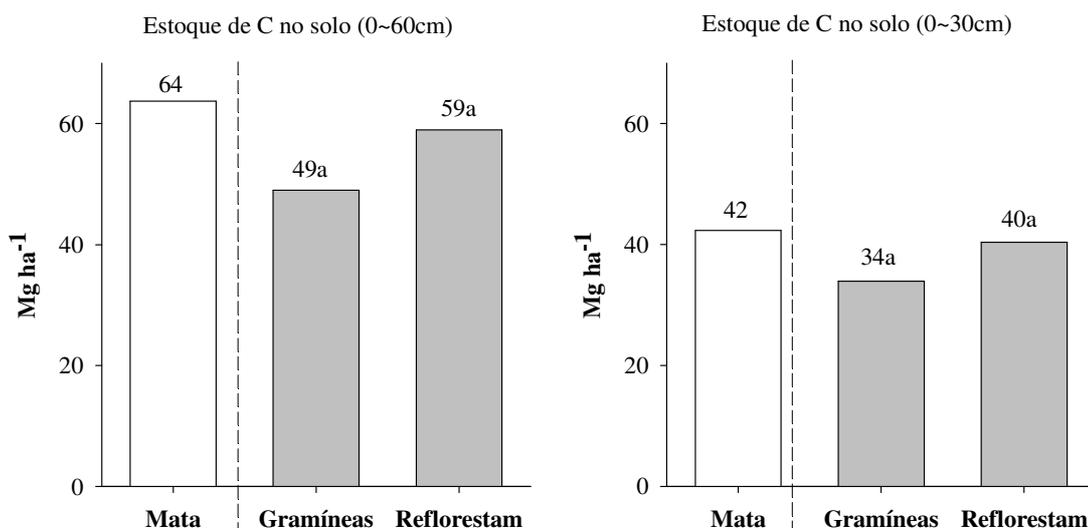


Figura 8. Estoque de carbono presente nas camadas de 0-60 e 0-30 cm do solo, sob diferentes coberturas vegetais, no Município de Angra dos Reis, RJ. Barras seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste T (Bonferroni; $P < 0,05$).

Assim como para o estoque de C na profundidade de 0-30 e 0-60 cm, o estoque de N na área de reflorestamento com leguminosas foi superior a de gramíneas e próximo a área de mata secundária. Pode-se dizer que houve um aumento de $1,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ de N no solo na camada de 0-60 cm proporcionado por essas espécies, o que representa um incremento de $58,8 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de N (Figura 9). Resultado semelhante foi encontrado por Macedo (2007) em área degradada recuperada há 17 anos com a leguminosa *A. auriculiformis* no município de Seropédica, RJ, onde houve um incremento de $41,1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de N no solo.

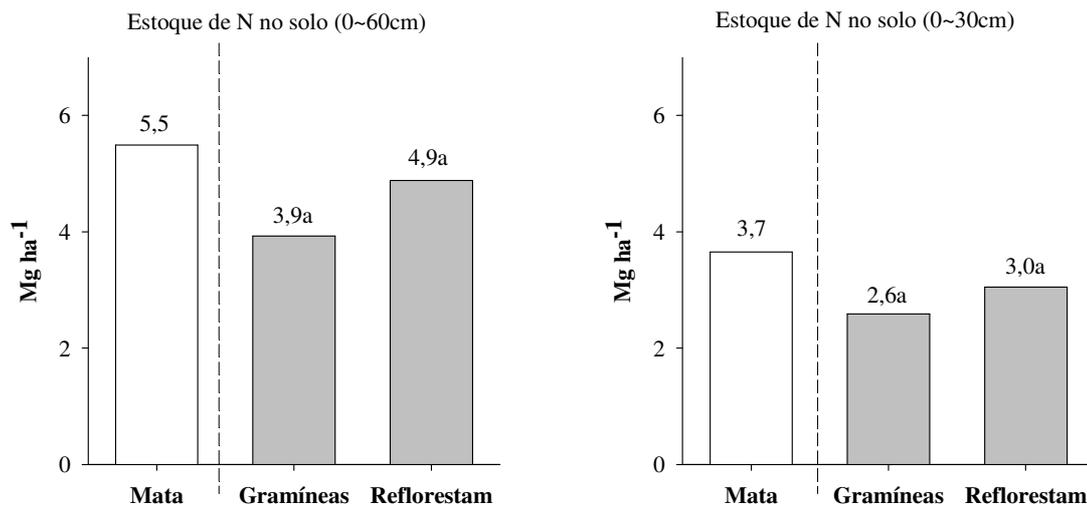


Figura 9. Estoque de nitrogênio presente nas camadas de 0-60 e 0-30 cm do solo, sob diferentes coberturas vegetais, no Município de Angra dos Reis, RJ. Barras seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste T (Bonferroni; $P < 0,05$).

Apesar dos incrementos nos estoques de C e N estarem próximos aos observados na literatura, pode-se dizer que no caso da recuperação de áreas degradadas com leguminosas, este incremento foi relativamente mais rápido visto que, o quadro de degradação do solo era muito maior em Angra dos Reis, do que as áreas estudadas na literatura (BROWN & LUGO, 1990; SILVER et al, 2000). De acordo com Silver et al. (2000) e Vitousek et al. (1989), dependendo do uso anteriormente dado ao solo antes do processo de recuperação da área ou regeneração natural, a incorporação de C e N ao solo poderia ser mais lenta ou mais rápida.

Segundo estimativas, as áreas em regeneração poderiam funcionar como dreno de C por um tempo maior do que 50 anos (SILVER et al, 2000; ZHOU et al, 2006). Destaca-se aí a necessidade de se investigar melhor o papel de florestas secundárias em estádios mais avançados de sucessão como forma de se compreender melhor o papel destas florestas na mitigação dos problemas relacionados ao cenário de mudanças climáticas globais.

Segundo Baker et al. (2007), pequenas alterações no estoque total de C do solo podem ser dificilmente detectáveis em curto prazo.

Na camada de 0-30 cm (Tabela 4), os estoques de C na fração leve livre da matéria orgânica do solo foram maiores na área de reflorestamento com leguminosas, com aproximadamente 12 Mg C-FL ha⁻¹ (Tabela 4). Em relação a área de gramíneas, com a introdução da leguminosas arbóreas fixadoras de nitrogênio houve um aumento de 5 Mg C-FL ha⁻¹, representando um acréscimo de 70% no estoque de C da fração leve livre na camada de 0-30 cm, sendo esta diferença significativa estatisticamente.

Moreira & Costa (2004) observaram que o desmatamento de áreas de floresta primária na Amazônia alterou, significativamente, o conteúdo de carbono orgânico do solo, na profundidade de 0-10 cm, tendo sido constatada uma recuperação parcial no estoque de carbono somente após o quarto ano de idade do reflorestamento.

Tabela 4. Estoque de carbono fração leve (FL) e percentual desta no estoque de C total da matéria orgânica do solo nas áreas de gramíneas e reflorestada há 17 anos com leguminosas.

Prof. (cm)	Gramíneas		Reflorestamento	
	C-FL (Mg C ha ⁻¹)	% do COT	C-FL (Mg C ha ⁻¹)	% do COT
0-30	7b*	20%	12a	30%
0-60	12a	24%	18a	30,5%

*Médias na mesma linha seguida pela mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Bonferroni (P<0,05).

Nesse sentido, os resultados corroboram aos encontrados na literatura, que observaram que a fração leve livre é um indicador precoce do declínio ou incremento da matéria orgânica no solo (BREMER et al, 1995; FREIXO et al, 2002; GUGGENBERGER & ZECH, 1999), onde alterações no estoque de C, por exemplo, ainda não são possíveis de se detectar. Esta capacidade é de grande relevância para tomada de decisões e reforça o seu uso como indicador da qualidade do solo.

Moreira & Costa (2004) observaram que o desmatamento de áreas de floresta primária na Amazônia alterou, significativamente, o conteúdo de carbono orgânico do solo, na profundidade de 0-10 cm, tendo sido constatada uma recuperação parcial no estoque de carbono somente após o quarto ano de idade do reflorestamento.

Como no presente estudo o reflorestamento sucedeu a área de gramíneas houve uma recuperação do estoque de C da fração leve livre pelo uso das leguminosas nas camadas mais superficiais (0–30 cm). Isso mostra que a fração leve livre pode ser utilizada como indicador sensível para detectar mudanças na qualidade do solo com diferentes usos e manejos (SIX et al, 2002; WU et al, 2004), embora nem sempre essa superioridade seja constatada (LEIFELD & KÖGEL-KNABNER, 2005).

Não houve diferença no estoque de C da fração leve livre da MOS quando se comparou o solo sob o reflorestamento com leguminosas com o solo sob gramíneas na profundidade de 0-60 cm. Entretanto o uso dessas espécies arbóreas fixadoras de nitrogênio incrementou 6 Mg C kg fração⁻¹ nessa área em relação as gramíneas (Tabela 4).

Nos solos estudados, o estoque de carbono da fração leve livre da MOS representou 30% e 20% do estoque do carbono no solo nas camada de 0-30 cm, para o reflorestamento e gramíneas respectivamente (Tabela 4). As proporções apresentadas foram semelhantes àquelas obtidas por Tiessen & Stewart (1983), em que o estoque de C da fração leve da MOS respondeu por 20 a 30% do COT (carbono orgânico total) nos solos sob floresta e de 14% nos solos com revolvimento.

Para solos argilosos de regiões temperadas, Parfitt et al. (1997) relataram percentagem de carbono da FL variando de 16 a 39 % do COT do solo. Entretanto, para Latossolos argilosos de regiões tropicais sob diferentes sistemas de manejo (floresta, Cerrado e pastagem), Golchin et al. (1995) e Freixo et al. (2002) observaram percentagens de C da FL variando de 1 a 4 % do CO do solo. Roscoe et al. (2001) observaram elevada quantidade de estoque de C na FL na camada de 0-7,5 cm em solos sob Cerrado (39% do COT), enquanto na pastagem (6% do COT) não foi observado tal acúmulo, levando os autores a afirmar que a área em estudo esta degradada com relação a MOS. Neste estudo o estoque de C da FL na camada de 0-10 cm tanto na área de reflorestamento com leguminosas quanto na área de gramíneas apresentou proporção em torno de 30% do COT.

Pinheiro et al. (2004) mostraram que solos com cobertura vegetal de gramíneas apresentam grande quantidade de C e N na fração leve livre, principalmente quando comparados com sistemas sem adição de material orgânico e submetidos de forma mais intensa aos processos erosivos. Porém, detectou-se que, quando comparada a sistemas com grande adição de resíduos vegetais, a pastagem apresenta a mesma quantidade de C e N.

Guggenberger & Zech (1999) observaram respostas significativas após três anos da substituição de pastagem por uma comunidade vegetal secundária. De acordo com os resultados destes autores, a fração leve foi restabelecida após 12 anos de vegetação secundária. Sendo assim, acredita-se que este seja um indicador precoce do declínio ou incremento da matéria orgânica no solo (BREMER et al, 1995; FREIXO et al, 2002; GUGGENBERGER & ZECH, 1999), onde alterações no estoque de C, por exemplo, ainda não são possíveis de se detectar. Esta capacidade é de grande relevância para tomada de decisões e reforça o seu uso como indicador de qualidade do solo.

Sabendo-se que a área de gramíneas apresentou um estoque de carbono no solo na camada de 0-30 cm de 34 Mg C ha⁻¹ e a área de reflorestamento com leguminosas de 40 Mg C ha⁻¹, na mesma profundidade, obteve-se um aumento de 6 Mg C ha⁻¹ no solo com efeito do reflorestamento. Entretanto, levando em consideração os resultados do fracionamento físico do solo, a área com leguminosas e gramíneas apresentaram um estoque de carbono nas frações mais estáveis da MOS de 27 Mg C ha⁻¹ e 29 Mg C ha⁻¹ respectivamente. Portanto, dessas 6 Mg C ha⁻¹ proporcionado por essas espécies arbóreas, somente 2 Mg C ha⁻¹ foram realmente incorporados ao solo para integrar a fração humificada.

Blair et al. (1995) ao avaliarem solos da Austrália e Brasil, constataram que ao incorporar leguminosas em sistema de rotação de cultura, foram notados aumentos no carbono da fração leve livre (58%) superiores aos carbono mais estável da MOS (15%) e COT (21,6%). Segundo Blair & Crocker (2000), a manutenção dos estoques de C do solo, especialmente as frações labéis, é essencial à melhoria da qualidade do solo, formação e estabilização dos agregados e sustentabilidade destes sistemas de produção. Por outro lado, Lima et al. (2006), estudando a substituição de pastagem degradada por eucalipto no sudeste do Brasil, observaram que o cultivo de eucalipto na região de Belo Oriente- MG, causou um aumento do estoque de C tanto nas frações mais leves, quanto nas frações mais estáveis da MOS na camada de 0-20 cm de profundidade. Essa capacidade que o solo sob eucalipto teve em proteger e acumular carbono no solo é muito importante, pois ela define o potencial de seqüestro de C-CO₂ (SWIFT, 2001).

Na área sob gramíneas, a deposição de resíduos orgânicos mais lignificados, que confere maior nível de recalcitrância e maior resistência a decomposição desses resíduos (MONTEIRO & GAMA-RODRIGUES, 2004), contribuiu para a manutenção do carbono do solo ao longo dos anos (SILVA & MENDONÇA, 2007). No entanto, os menores estoques de carbono na fração leve livre encontrados na área de gramíneas indicam que a manutenção da MOS será comprometida a longo prazo.

Adicionalmente, a baixa concentração de argila nesse solo, pode alterar a umidade do solo, alterando tanto a decomposição da MOS (GAMA-RODRIGUES et al, 2005; MCLAUHLAN, 2006). Dessa forma, a textura do solo, bem como sua mineralogia, é um dos componentes definidores do potencial de seqüestro de CO₂ atmosférico (SIX et al, 2001).

A área de reflorestamento com leguminosas obteve um maior estoque de N-FL da MOS em comparação a área de gramíneas, apresentando a mesma tendência do estoque de C-FL (Tabela 5). Na camada de 0-30 cm, os estoques foram de 0,4 e 0,8 Mg N ha⁻¹ na área de gramíneas e no reflorestamento com leguminosas respectivamente.

Tabela 5. Estoque de nitrogênio e relação C:N na fração leve (FL) e percentual desta no estoque de N total da matéria orgânica do solo nas áreas de gramíneas e reflorestada há 17 anos com leguminosas,.

Prof. (cm)	Gramíneas			Reflorestamento		
	N-FL (Mg N ha ⁻¹)	% do NT	C:N- FL	N-FL (Mg N ha ⁻¹)	% do NT	C:N- FL
0-30	0,4b	15,4	18a	0,8a	26,7	15a
0-60	0,7a	17,9	17a	1,3a	26,5	14a

*Médias na mesma linha seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Bonferroni (P<0,05).

As tendências verificadas para o carbono e o nitrogênio da FL da MOS demonstram que os estoques das frações mais lábeis do COS foram reduzidas com maior intensidade na primeira camada abaixo da superfície, principalmente na área sob influência das gramíneas. Assim, esses incrementos da fração leve livre, principalmente nas camadas superficiais nos solos sob o reflorestamento com leguminosas, refletem a maior deposição de resíduos, que, ao contrário das gramíneas, ocorre principalmente na superfície do solo. Essa recuperação da fração leve livre é importante, pois, embora seu estoque seja bem menor que outras frações mais estáveis da MOS, ela constitui compartimento com rápida ciclagem e que pode favorecer a biota do solo (JANZEN et al, 1992).

Os valores da relação C:N da FL foram bastante variáveis (valores entre 14 e 17) e superiores aos obtidos para o solo (valores entre 10 e 12). Assim, observou-se que o reflorestamento com leguminosas apresentou as menores relações C:N em relação à área de gramíneas, principalmente nas camadas mais profundas do solo.

4.5. Abundância Natural de ¹³C e Estimativa do Estoque de Carbono no Solo e na Fração Leve Livre da MOS

O solo sob a área de mata nativa apresentou valores de ¹³C entre -28 ‰ na camada de 0-5cm até -27‰ de 40-60cm. Estes resultados indicam que esta área vem sendo ocupada por longo prazo por vegetação predominantemente de arbóreas, composta em quase sua totalidade por plantas C₃ (Figura 10). Tarré et al. (2001) também encontraram valores bem próximos a estes, de aproximadamente -27,5 ‰ na camada de 0-5 cm a -26,5 ‰ na camada de 40-60 cm sob área de Mata Atlântica preservada no extremo sul do estado da Bahia.

Na área de gramíneas os valores de δ¹³C são maiores nas camadas mais superficiais, com valores de -18‰ δ¹³C, reduzindo para valores de -22‰ δ¹³C na camada de 40-60 cm (Figura 10). Este resultado indica que a contribuição de plantas C₄ na matéria orgânica do solo é de vários anos atrás porque já atingiu camadas mais profundas do solo, como também foi observado por Smith & Epstein (1971).

Já em sob solos de reflorestamento com leguminosas, os valores de δ¹³C foram de -25 ‰ δ¹³C em superfície e -22‰ δ¹³C em profundidade, corroborando com resultados de Vitorello et al. (1989) que observaram um valor de δ¹³C de -25‰ para uma área florestal na região de Piracicaba, São Paulo.

Os resultados da composição isotópica de ¹³C na área de gramíneas e área de reflorestamento com leguminosas, na camada abaixo de 30 cm do solo, não apresentaram diferenças estatísticas, confirmando assim que a vegetação da área reflorestada era a mesma da área de gramíneas no passado.

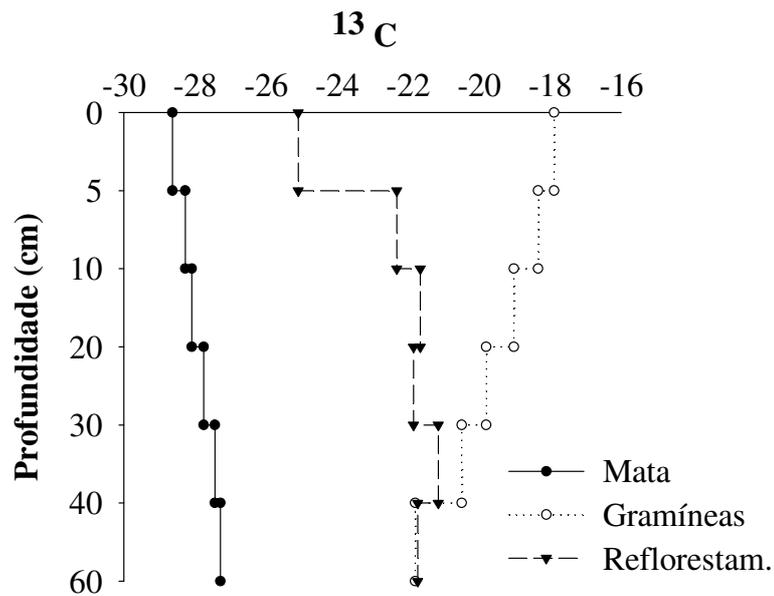


Figura 10. Abundância natural de $\delta^{13}\text{C}$ no COT do solo nas áreas de mata, gramíneas e reflorestada há 17 anos com leguminosas, no município de Angra dos Reis, RJ.

O delta original da composição isotópica do solo sob reflorestamento foi estimado em -20‰ pelo método de Balesdent et al. (1988), utilizando-se este valor como referência próxima à composição da mata nativa, antes da implantação das gramíneas (Figura 11).

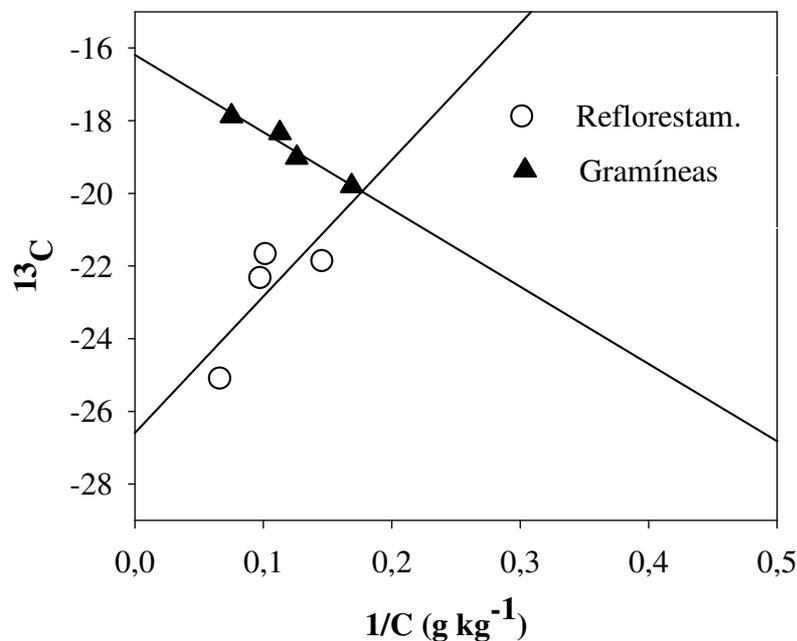


Figura 11. Regressão do inverso dos teores de C (g kg^{-1}) versus a abundância de ^{13}C das amostras de solo nas áreas de Reflorestamento e Gramíneas.

Na área de reflorestamento, as leguminosas arbóreas aumentaram $8,15 \text{ Mg C ha}^{-1}$ na camada de 0-5 cm e $2,53 \text{ Mg C ha}^{-1}$ de 5-10 cm, enquanto o C original sob influência das gramíneas e mata nessas camadas foi de $1,93$ e $4,34 \text{ Mg C ha}^{-1}$ respectivamente (Tabela 6).

Tabela 6. Estoque de carbono no solo derivado da vegetação antiga e reflorestamento com leguminosas.

Prof. (cm)	Mg C ha ⁻¹ derivado:	
	C Antes reflorestamento	C Reflorestamento
0-5	1,93	8,15
5-10	4,34	2,53
10-20	9,70	4,04
20-30	7,27	3,03
Total	23,24	17,75

Poucos dados estão disponíveis sobre a taxa de substituição do C em áreas de florestas plantadas, mas os dados indicam que as alterações não são tão rápidas. Wilcke & Lillienfein (2004) em um Latossolo argiloso na região de Cerrado de Uberlândia-MG, observaram que 30 % do C original do solo de Cerrado foram substituídos pelo C derivado de *Pinus* sp, depois de 20 anos de sua implantação.

Na área de gramíneas, foi encontrada proporção de carbono oriundo da área de mata (C₃) de 36% na camada de 0-5 cm, 39% na camada de 5-10 cm e 44 % a partir da camada de 10 cm (Tabela 7). Outros trabalhos também mostraram essa mesma tendência em áreas com gramíneas. Em estudo realizado por Tarré et al. (2001), encontraram que após 9 anos do estabelecimento da pastagem de *Brachiaria humidicola*, quase metade (44%) do C presente na camada 0-5 cm do solo foi derivado da *Brachiaria*, mas em profundidades maiores de 40 cm, esta contribuição também foi reduzida.

Tabela 7. Estoque de carbono no solo derivado da vegetação antiga e gramíneas.

Prof. (cm)	Mg C ha ⁻¹ derivado:	
	C Nativo	C Gramíneas
0-5	2,81	5,13
5-10	2,40	3,76
10-20	4,84	6,26
20-30	4,32	4,40
Total	14,37	19,55

Campos (2003) encontrou cerca de 50% do carbono oriundo da vegetação anterior (mata) ainda estava presente nos primeiros 5 cm de profundidade após 22 anos da implantação de gramíneas em Conceição da Barra (ES). Nesta área de gramíneas (C₄), observou-se proporção de C derivado das gramíneas em torno de 20% ao longo de todo o perfil do solo.

De acordo com Neill et al. (1996), após a formação das pastagens em áreas desmatadas, o carbono derivado das gramíneas substituiu rapidamente o C derivado da floresta original como o substrato predominante para a respiração microbiana, mostrando que, nesse caso, a origem do C tem pouca influência na utilização microbiana da maior parte do componente lábil do C orgânico do solo. Após dezessete anos de reflorestamento com as leguminosas, foi encontrado em torno de 90% de carbono orgânico incorporado por essas espécies nas primeiras profundidades do solo (0-5 cm).

Estudos de Balieiro et al. (2008) mostraram que a substituição de pastagem de *Panicum maximum* por plantios puros de *Eucalyptus grandis* e *Pseudosamanea guachapele* não modificou 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.

Portanto, os resultados mostram que apesar do reflorestamento não ter alterado significativamente o estoque de C total, a incorporação de C foi intensa alcançando até 30 cm e que novos estudos nos próximos anos devem ser feitos para acompanhar essa mudança.

De uma maneira geral, a composição isotópica da fração leve livre da matéria orgânica acompanhou os valores encontrados no solo. Na área sob influência das leguminosas, após 17 anos de substituição da cobertura da gramínea, a fração leve ainda possuía valores de $\delta^{13}\text{C}$ próxima àquelas encontradas no solo sob pasto, variando entre -25 e -26 ‰ nas camadas de 30-40 e 40-60 cm respectivamente (Figura 12). Nas camadas superficiais até 30 cm, a variação foi entre -28 e -27‰, comprovando que houve uma adição significativa da fração leve livre derivada das leguminosas nessas camadas.

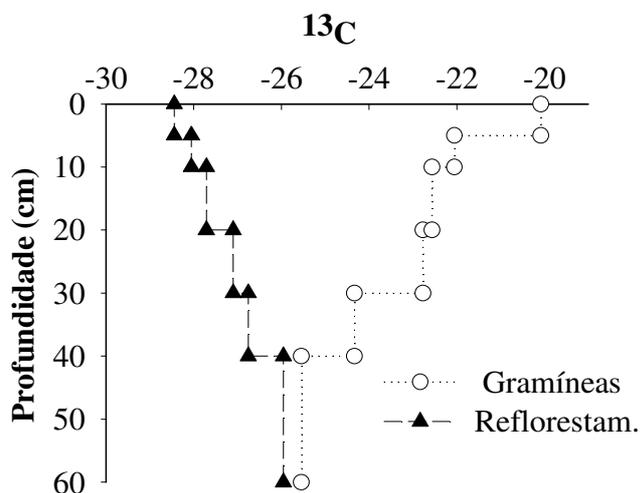


Figura 12. Abundância natural de $\delta^{13}\text{C}$ da fração leve do solo nas áreas de gramíneas e reflorestada há 17 anos com leguminosas.

Baseado nos valores de $\delta^{13}\text{C}$ foi estimada a proporção de carbono da gramínea e da leguminosa na fração leve livre da matéria orgânica do solo até 30 cm de profundidade (Tabela 8). Essa técnica foi empregada com sucesso em vários estudos, em clima tropical e em regiões de clima temperado, para estudar a dinâmica do C do solo a longo prazo, onde o padrão fotossintético da vegetação original foi modificada (BALESDENT & MARIOTTI, 1996; MARTIN et al, 1990; SKJEMSTAD et al, 1990; JASTROW et al, 1996).

O delta original da composição isotópica da fração leve livre da área de reflorestamento com leguminosas foi estimado em -25 deltas pelo método de Balesdent et al. 1988 (Figura 13).

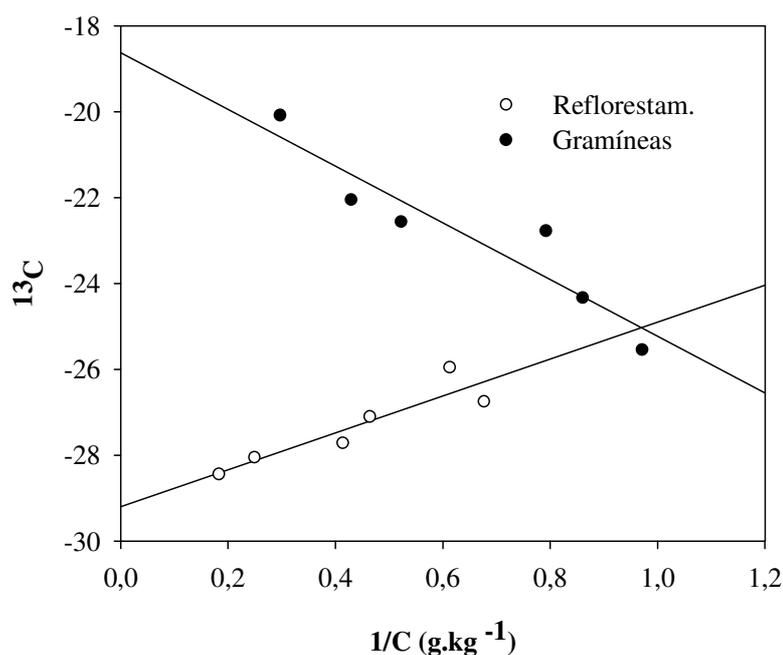


Figura 13. Regressão do inverso dos teores de C-FL (g kg^{-1}) versus a abundância de ^{13}C das amostras da fração leve da MOS observados nas áreas de gramíneas e reflorestada há 17 anos com leguminosas.

As contribuições dessas espécies no estoque de carbono da fração leve livre da matéria orgânica do solo na área de reflorestamento foram de 86% e 76% nas profundidades superficiais de 0-5 e 5-10 cm, respectivamente, e de 67% e 52% nas camadas de 10-20 e 20-30 cm de profundidade (Tabela 8). Segundo Campos (2003), a adição de leguminosas na pastagem pode aumentar a quantidade de N no sistema, podendo alterar a dinâmica do C do solo, favorecendo a decomposição do C mais antigo (efeito “priming”).

Tabela 8. Abundância natural de $\delta^{13}\text{C}$ e estoque de C na FL da MOS (0-30 cm) derivado da vegetação nativa e gramíneas (original) e leguminosas (incorporado).

Prof. (cm)	$\delta^{13}\text{C}$ da FL da MOS ‰	Mg C ha^{-1} derivado:	
		C Antes reflorestamento	C Reflorestamento
0-5	-28,44	0,69	2,51
5-10	-28,05	0,60	1,79
10-20	-27,71	0,85	2,15
20-30	-26,75	1,02	1,98
Total		3,16	8,43

Em sistemas onde há grande deposição superficial de liteira, como nas florestas, o acúmulo de carbono é mais acentuado que em sistemas onde predomina a deposição de liteira subterrânea (resíduos de raízes), como pastagens nativas e cultivadas (ROSCOE & MACHADO, 2002). Espécies com alto teor de N como as leguminosas, mostram claramente uma maior rapidez na decomposição da matéria orgânica do solo em comparação a espécies com baixos teores de N, no entanto, a estabilização à longo prazo do C pode ser mais elevada

para o material com altos teores de N (BERG, 2000).

As maiores proporções de C da gramínea foram encontradas nas camadas superficiais, reduzindo em profundidade (Tabela 9). Em média, mais de 50% do carbono contido na fração leve livre da MOS na área de gramíneas foi originado da vegetação atual de plantas de ciclo C₄, chegando a 69% na camada de 0-5 cm e 56% na camada de 5-10 cm. A partir da camada de 10 cm do solo, ainda foi observada grande influência da vegetação anterior de plantas de ciclo C₃ nas camadas do solo, atingindo valores próximos a 50% nas camadas de 10-20 cm e 20-30 cm.

Roscoe et al. (2001), em experimentos conduzidos no Cerrado, após 23 anos de pastagem, observaram cerca de 50% do total de carbono contido na fração leve livre da camada superficial ainda era derivado da vegetação nativa do cerrado, indicando que uma parte da fração leve livre seria mais recalcitrante.

Tabela 9. Abundância natural de $\delta^{13}\text{C}$ e estoque de C na FL da MOS (0-30 cm) derivado da vegetação nativa (original) e gramíneas (incorporado).

Prof. (cm)	$\delta^{13}\text{C}$ da FL da MOS ‰	Mg C ha ⁻¹ derivado:	
		C Nativo	C Gramíneas
0-5	-20,08	0,58	1,30
5-10	-22,05	0,62	0,80
10-20	-22,56	1,17	1,32
20-30	-22,77	0,76	0,82
Total		3,13	4,24

Estudos demonstram que a substituição de florestas naturais por outros usos da terra pode levar a redução da MOS. Na Austrália, no norte de New South Wales, estudos relatam a diminuição de 23% do COS após reflorestamento com Eucalipto e coníferas em sítios anteriormente ocupados por florestas nativas (SPECHT & WEST, 2003). A substituição da floresta nativa por *Araucária bidwili* Hook e *Terminalia oblongata* na região subtropical da Austrália, levou a redução no carbono orgânico total e na fração mais lábil, além de causar mudanças na qualidade do C do solo (CHEN et al, 2004).

Os maiores estoques de C na fração leve livre da MOS nas coberturas vegetais estudadas, foram encontradas nas camadas mais superficiais da área de reflorestamento com leguminosas. No solo sob gramíneas, houve um aumento de 1,30 Mg C kg ha⁻¹ na camada de 0-5 cm e 0,8 Mg C ha⁻¹ na camada de 5-10, enquanto na área de reflorestamento as leguminosas promoveram um aumento de 2,75 Mg C ha⁻¹ na camada de 0-5 cm e 1,82 Mg C ha⁻¹ na camada de 5-10 cm respectivamente. Portanto, as leguminosas arbóreas proporcionaram um aumento de 100% no estoque de carbono da fração leve livre em relação às gramíneas nessas camadas, o que contribuiu para o aumento da MOS nessa área.

Assim o incremento da fração leve livre foi favorecido pela constante adição e decomposição da serapilheira. Os resultados indicam que após 17 anos da implantação de leguminosas na recuperação desta área degradada grande parte do C incorporado encontra-se na fração leve livre, e que com o passar do tempo tenderá a incorporação aumento no estoque de C no solo, estabilizando a ciclagem da MOS.

5, CONCLUSÕES

O uso de leguminosas arbóreas associadas a bactérias fixadoras de nitrogênio e fungos micorrízicos arbusculares na recuperação da área degradada foi eficiente em incrementar os estoques de C e N na fração leve da matéria orgânica do solo e o estoque de serapilheira.

Em 17 anos o conteúdo de C e N do perfil do solo (de 0 a 60 cm) aumentou em 10 Mg C ha⁻¹ e em 1,0 Mg N ha⁻¹ sob o plantio das leguminosas arbóreas, em relação a área de gramíneas. A relação C:N no solo variou ao redor de 12,5, evidenciando a grande importância do N na acumulação do sistema.

A maior contribuição do C derivado das leguminosas no estoque de C ocorreu até a camada de 10 cm de profundidade. Os resultados demonstram que o plantio de leguminosas manteve o C original do solo e proporcionou a incorporação de C derivado da serapilheira e raízes nas camadas superficiais, contribuindo assim para a recuperação do solo degradado.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, B.J.R.; OLIVEIRA, O.C.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R.M. Métodos isotópicos. In: SANTOS, G.A.; CAMARGO, F.A.O. (Org.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Gênese, Porto Alegre, p. 337-357, 1999.
- ANDRADE, A. G. **Ciclagem de nutrientes e arquitetura radicular de leguminosas arbóreas de interesse para revegetação de solos degradados e estabilização de encostas**. Tese (Doutorado em Agronomia - Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 1997. 166p.
- ANDRADE, A.G.; COSTA, G.S.; FARIA, S.M. Decomposição e deposição da serapilheira em povoamentos de *Mimosa caesalpinifolia*, *Acacia mangium* e *Acacia holosericea* com quatro anos de idade em Planossolo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.777-785, 2000.
- ARATO, H. D.; MARTINS, S. V.; FERRARI, S. H. S. Produção e decomposição de serapilheira em um sistema agroflorestal implantado para recuperação de área degradada em Viçosa-MG. **Revista Árvore**, v. 27, n. 5, p. 715-721, 2003.
- BAKER, J.M.; OCHSNER, T.E.; VENTEREA, R.T.; GRIFFIS, T.J. Tillage and soil carbon sequestration-what do we really know? **Agriculture, Ecosystem & Environment**, v.118, n.1, p.1-5, 2007.
- BALESDENT, J.; MARIOTTI, A.; GUILLET, B. Natural ^{13}C abundance as a tracer for studies of soil organic matter dynamics. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 19, p. 25-30, 1987.
- BALESDENT, J.; WAGNER, G.H.; MARIOTTI, A.: Soil organic matter turnover in long-term field experiment as revealed by carbon-13 natural abundance. **Soil Science Society of America Journal**, v.52, p. 118–124, 1988.
- BALESDENT, J.; MARIOTTI, A. Measurement of soil organic matter turnover using ^{13}C natural abundance. In: BOUTTON, T.W.; YAMASAKI, S. (Eds.). **Mass spectrometry of soil**. Marcel Dekker, New York, p. 83-111, 1996.
- BALIEIRO, F.B. **Dinâmica de nutrientes e da água em plantios puros e consorciado de *Pseudosamanea guachapele* Harm (Kunth) e *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden**. Tese (Doutorado em Agronomia - Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2002. 122p.
- BALIEIRO, F.C.; FRANCO, A.A.; PEREIRA, M.G.; CAMPELLO, E.F.C.; FARIA, S.M.; ALVES, B.J.R.; DIAS, L.E. Deposição e decomposição de serapilheira sob plantios de eucalipto e guachapele aos sete anos. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO**, 29, 2003, Ribeirão Preto, Anais,... Jaboticabal: UNESP, 2003.
- 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.
- BATJES, N.H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. **European Journal of Soil Science**, v.47, p. 151-163, 1996.

- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da material orgânica. In: SANTOS, G.A., CAMARGO, F.A.O. (Eds.), **Fundamentos da matéria orgânica: Ecossistemas tropicais e subtropicais**. Genesis Press, Porto Alegre, RS, Brazil, p.9-26. 1999.
- BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A. Armazenamento de carbono em frações lábeis da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, p. 677-683, 2004.
- BERG, B. Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils. **Forest Ecology and Management**, v.133, p.13-22, 2000.
- BINKLEY, D.; GIARDINA, C. Nitrogen fixation in tropical forest plantations. In: NAMBIAR, E.K.S.; BROWN, A.G. (Ed.). **Management of soil, nutrients and water in tropical plantation forests**. Camberra: Aciar, p.297-337, 1997.
- BINKLEY D. How nitrogen-fixing trees change soil carbon. In: BINKLEY, D.; MENYAILO, O. (Eds.). **Tree Species Effects on Soils: Implications for Global Change**. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, the Netherlands, pp. 155–164, 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. **Australian Journal of Agricultural Research**, v.46, n.7, p.1459-1466, 1995.
- BLAIR, N. ; CROCKER, G.J. Crop rotation effects on soil carbon and physical fertility of two Australian soils. **Australian Journal of Soil Research**, v. 38, p.71-84, 2000.
- BLANCO-CANQUI, H.; LAL, R. No-tillage and soil-profile carbon sequestration: An on-farm assessment. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 72, p.693-701, 2008.
- BODDEY, R.M, JANTALIA, C.P, MACEDO, M.O, OLIVEIRA, O.C, 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. (Eds.), **Carbon sequestration in soils of Latin America**. Food Products Press, New York, p. 305-319. 2006.
- BODDEY, R.M.; JANTALIA, C. P.; CONCEIÇÃO, P.C.; ZANATTA, J.A.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; DIECKOW, J.; DOS SANTOS, H.P.; DENARDIN, J.E.; AITA, C.; GIACOMINI, S.J.; ALVES, B.J.R.; URQUIAGA, S. Carbon accumulation at depth in Ferralsols under zero-till subtropical agriculture. **Global Change Biology**, Illinois, v. 16, n. 2, p. 784-795, 2010.
- BOONE, D. R. Light-fraction soil organic matter: origin and contribution to net nitrogen mineralization. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.26, p.1459-1468, 1994.
- BOUTTON, T.W. Stable carbon isotope ratios of natural materials. II. Atmospheric, terrestrial, marine, and freshwater environments. In: COLEMAN, D.C.; FRY, B. (Eds). **Carbon isotope techniques**. New York: Academic Press. p. 155-171, 1991.
- BREMNER J.M.; MULVANEY C.S. Nitrogen - Total. In: PAGE, A. L.; MILLER, R. H.; KEENEY, D. R. (Eds.). **Methods of Soil Analysis, Part 2. Chemical and microbiological properties**, Madison: American Society of Agronomy, Inc, p. 595-641. 1982.
- BREMER, E, ELLERT, B.H, JANZEN, H.H. Total and light fraction carbon dynamics during four decades after cropping changes. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.59, p. 1398- 1403, 1995.

- BROWN, S.; LUGO, A.E. Effects of clearing and succession on the carbon and nitrogen content of soils in Puerto Rico and U.S. Virgin Islands. **Plant and Soil**, v. 124, p. 53-64, 1990.
- BROWN, S.; LUGO, A.E. Rehabilitation of tropical lands: a key sustaining development. **Restoration ecology**, v.2, p.97-111, 1994.
- BURESH, R.J. DE DATTA, S.K. Nitrogen dynamics and management in rice-legume cropping systems. **Advances in Agronomy**, v. 45, p. 1-5, 1991.
- BUYANOVSKY, G.A.; ASLAM, M.; WAGNER, G.H. Carbon turnover in soil physical fractions. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, p.1167-1173, 1994.
- CADISCH, G.; IMHOF, H.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R.M.; GILLER, K.E. Carbon turnover ($\delta^{13}\text{C}$) and nitrogen mineralization potential of particulate light soil organic matter after rainforest clearing. **Soil Biology and Biochemistry**, v.28, n.12, p. 1555-1567, 1996.
- CADISCH, G.; OLIVEIRA, O.C.; CANTARUTTI, R.; CARVALHO, E.; URQUIAGA, S. The role of legume quality in soil carbon dynamics in savannah ecosystems. In: BERGSTROM, L.; KIRCHMANN, H. **Carbon and nutrient dynamics in natural and agricultural tropical ecosystems**. Oxon: CAB International, p. 47-70. 1998
- CADISCH, G.; MUTUO, P.; MERCADO, A.; HAIRIAH, K.; NYAMUGAFATA, P.; BOYE, A.; ALBRECHT, A. Organic matter management in tropical agroforest systems: soil quality, soil C storage and soil atmosphere exchange. In: GAMA-RODRIGUES, A.C.; BARROS, N.F.; GAMA-RODRIGUES, E.F.; FREITAS, M.S.M.; VIANA, A.P.; JASMIN, J.M.; MARCIANO, C.R.; CARNEIRO, J.G.A. **Sistemas agroflorestais: bases científicas para o desenvolvimento sustentável: resumos**. Campos dos Goytacazes: Universidade Estadual do Norte Fluminense, p 275-290. 2006.
- CAMARGO, F.A.O.; SANTOS, G.A.; GUERRA, J.G.M. Macromoléculas e substâncias húmicas. In: SANTOS, G.A.; CAMARGO, F.A.O. (Eds). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Genesis, p 27-40. 1999.
- CAMPELLO, E. F. C. Sucessão vegetal na recuperação de áreas degradadas. In: DIAS, L. E.; MELLO, J. V. M. (Eds.). **Recuperação de áreas degradadas**. Viçosa: UFV, Departamento de Solos; Sociedade Brasileira de Recuperação de Áreas Degradadas, p. 183-196, 1998.
- CAMPOS, D.V.B de. **Uso da técnica de ^{13}C e fracionamento físico da matéria orgânica em solos sob cobertura de pastagens e cana-de-açúcar na região da Mata Atlântica**. Tese (Doutorado em Agronomia – Ciência do Solo). Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2003. 220p.
- CANELLAS, L.P.; BERNER, P.G.; SILVA, S.G.; SILVA, M.B.; SANTOS, G.A. Frações da matéria orgânica em seis solos de uma topossequencia no Estado do Rio de Janeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, p.133-143, 2000.
- CERRI, C.C.; FELLER, C.; BALESSENT, J.; VITÓRIA, R.L.; PLENECASSAGNE, A. Application du traçage isotopique naturel en ^{13}C , à l'étude de la dynamique de la matière organique dans les sols. **Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris, Série II**, n.9, p.423-428, 1985.
- CHEN, C.R.; XU, Z.H.; MATHERS, N.J. Soil carbon pools in adjacent natural and plantation forests of subtropical Australia. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.68, p.282-291, 2004.

- CHRISTENSEN, B.T. Physical fractionation of soil organic matter in primary particle size and density separates. **Advances in Soil Science**, v. 20, p. 1-90, 1992.
- CHRISTOPHER, S.F.; LAL, R. Nitrogen Management affects carbon sequestration in north American cropland soils. **Critical Reviews in Plant Sciences**, v. 26, p. 45-64, 2007.
- CORAZZA, E.J.; SILVA, J.E.; RESK, D.V.S.; GOMES, A.C. Comportamento de diferentes sistemas de manejo como fonte ou depósito de carbono em relação à vegetação do cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 425-432, 1999.
- COSTA, G.S. **Ciclagem de nutrientes em uma área degradada revegetada com leguminosas arbóreas e em um fragmento florestal em crescimento secundário (capoeira)**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Fluminense, Niterói. 1998. 87p.
- COUTINHO, R.O. **Estoques de carbono e emissão de n₂o no sistema solo-planta em região da Mata Atlântica**. (Mestrado em Agronomia - Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2009. 80p.
- CRASWELL, E.T, LEFROY, R.D.B. The role and function of organic matter in tropical soils. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, 61, p. 7-18, 2001.
- CUNHA, G.C.; GRENDENE, L.A.; DURLO, M.A.; BRESSAN, D.A. Dinâmica nutricional em floresta estacional decidual com ênfase aos minerais provenientes da decomposição da serapilheira. **Ciência Florestal**, 3(1), p. 35-64, 1993.
- DIAS, L. E.; FRANCO, A. A. ; CAMPELLO, E. F. C. In: M. BALENSIEFER; A. J, DE ARAÚJO ; N. C. ROSOT (Eds.). Dinâmica da matéria orgânica e de nutrientes em solo degradado pela extração de bauxita e cultivado com *Eucalyptus pellita* e *Acacia mangium*. **Anais: Simpósio Sul-Americano I e Simpósio Nacional II de Recuperação de Áreas Degradadas**. FUFEP, Curitiba, Pp. 515-525, 1994.
- DIEZ, J.A.; POLO, A.; CERRI, C.C.; ANDREUX, F. Influência do pousio e da pastagem sobre a dinâmica de nutrientes em Oxisolos recentemente desflorestados na Amazônia Oriental. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 26, p. 77-83, 1991.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro). **Manual de métodos de análises de solo**. Rio de Janeiro.1997. 212p. (Embrapa-CNPS. Documentos,1).
- EWEL, J.J. Litterfall and leaf decomposition in a tropical forest succession in eastern Guatemala. **Journal of Ecology**, v. 64, p. 293-308, 1976.
- FERREIRA, D.F. **Sisvar versão 4.6**. Lavras: DEX/UFLA, 2003. 32 p.
- FRANCO, A.A.; CAMPELLO, E.F.C.; SILVA, E.M.R.; FARIA, S.M. DE. **Revegetação dos solos degradados**. EMBRAPA-CNPAB, Rio de Janeiro, 1992. 9p. (Comunicado técnico n.9)
- FRANCO, A.A.; CAMPELLO, E.F.C.; SILVA, E.M.R.; FARIA, S.M. de. Uso de leguminosas florestais noduladas e micorrizadas como agentes de recuperação e manutenção da vida do solo: um modelo tecnológico. **Ecologia Brasiliensis**, UFRJ,1994. 616p.
- FRANCO, A.A.; DE 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.
- FRAZÃO, L.A.; PICCOLO, M.C.; FEIGL, B.J.; CERRI, C.C.;CERRI, C.E.P. Inorganic nitrogen, microbial biomass and microbial activity of a sandy Brazilian Cerrado soil under different land uses. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v.135, p.161-167, 2010.

- FREIXO, A.A. **Fracionamento físico e espectroscopia de infravermelho na caracterização da matéria orgânica de LATOSSOLOS sob diferentes sistemas de preparo e rotação de culturas.** (Mestrado em Agronomia- Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2000. 80p.
- FREIXO, A.A.; DE MACHADO, P.L.O.A.; SANTOS, H. P.; SILVA, C.A.; FADIGAS, F.S. Soil organic carbon and fractions of a Rhodic Ferrasol under the influence of tillage and crop rotation systems in southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, v.64, p.221-230, 2002.
- FROUFE, L.C.M. **Decomposição de serapilheira e aporte de nutrientes em plantios puros e consorciados de *Eucalyptus grandis* Maiden, *Pseudosamanea guachapele* Dugand e *Acacia mangium* Willd.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 1999. 73p.
- GAMA-RODRIGUES, E.F.; BARROS, N.F.; GAMA-RODRIGUES, A.C.; SANTOS, G.A. Nitrogênio, carbon e atividade da biomassa microbiana do solo em plantações de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 29, p.893-901. 2005.
- 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 carbono no solo e na biomassa de plantações de eucalipto na Região Centro-Leste de Minas Gerais. Viçosa, MG.** Tese (Doutorado em Agronomia), Universidade Federal de Viçosa, 2005. 159p.
- GAVINELLI, E.; FELLER, C.; LARRÉ-LARROUY, M.C.; BACYE, B.; DJEGUI, N. A routine method to study soil organic matter by particle-size fractionation: examples for tropical soils. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**, v. 26, n. 11/12, p. 1749-1760, 1995.
- GOLCHIN, A.; OADES, J.M.; SKJEMSTAD, J.O.; CLARKE, P. Structural and dynamic properties of soil organic matter as reflected by ¹³C natural abundance, pyrolysis mass spectrometry and solid-state ¹³C NMR spectroscopy in density fractions of an Oxisol under forest and pasture. **Australian Journal of Soil Research**, v.33, p.59-76, 1995.
- GREGORICH, E.G.; ELLERT, B.H. Light fraction and macroorganic matter in mineral soils. In: Soil sampling and methods of analysis (ed. M.R. CARTER). **Canadian Society of Soil Science**, Lewis Publication, Boca Raton, p. 379-408, 1993.
- 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.
- GUGGENBERGER, G.; ZECH, W. Soil organic matter under primary forest, pasture, and secondary forest succession, Región Huetar Norte, Costa Rica. **Forest Ecology and Management**, v. 124, p. 93-104, 1999.
- HANDAYANTO, E.; CADISCH, G.; GILLER, K.E. Manipulation of quality and mineralization of tropical legume tree pruning by varying nitrogen supply. **Plant and Soil**, v.176, p.149-160, 1995.
- JANZEN, H.H.; CAMPBELL, C.A.; BRANDT, S.A.; LAFOND, G.P.; TOWNLEYSMITH, L. Light fraction in soils from long-term crop rotations. **Soil Science Society of America Journal**, Madison,, v. 56, n.6, p. 1799-1806, 1992.

- JASTROW, J.D.; MILLER, R.M.; BOUTTON, T.W. Carbon dynamics of aggregate-associated organic matter estimated by carbon-13 natural abundance. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.60, p.801- 807, 1996.
- LAL, R. Agricultural activities and the global carbon cycle. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.70,n.2, p.103-116, 2004.
- LEIFELD, J.; KÖGEL-KNABNER, I. Soil organic matter fractions as early indicators for carbon stock changes under different land-use? **Geoderma**, v.124, p.143-155, 2005.
- LEITE, L.F.C.; MENDONÇA, E.S.; NEVES, J.C.L.; MACHADO, P.L.O.A.; GALVÃO, J.C.C. Estoques totais de carbono orgânico e seus compartimentos em argissolo sob floresta e sob milho cultivado com adubação mineral e orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p. 821-832, 2003.
- LIMA, E.; BODDEY, R.M, DÖBEREINER, J. Quantification of biological nitrogen fixation associated with sugar cane using a ^{15}N aided nitrogen balance. **Soil Biology and Biochemistry**, v.19, p.165-170, 1987.
- LIMA, A.M.N.; SILVA, I.R.; NEVES, J.C.L.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; MENDONÇA, E.S.; SMYTH, T.J.; MOREIRA, M.S.; LEITE, F.P. Soil organic carbon dynamics following afforestation of degraded pastures with eucalyptus in Southeastern Brazil. **Forest Ecology and Management**, v.235, p. 219-231, 2006.
- LIMA, A.M.N.; SILVA, I.R.; NEVES, J.C.L.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; MENDONÇA, E.S.; 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**, Viçosa, v.32, p.1053- 1063, 2008.
- LUDLOW, M.M.; TROUGHTN, J.H.; JONES, R.J. A technique for determining the proportion of C_3 and C_4 species in plant samples using stable natural isotopes of carbon. *Journal of Agriculture Science*, v.87, p. 625-632, 1976.
- LUGO, A.E.; BROWN, S, Tropical forest as sinks of atmospheric carbon. **Forest Ecology and Management**, v. 54, p. 239-255, 1992.
- MACEDO, R.O. **Impacto da introdução das leguminosas *Arachis pintoi* e *Stylosanthes guianensis* na ciclagem de nitrogênio em pastagens de *Brachiaria decumbens* no Cerrado**. Tese (Doutorado em Agronomia - Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2003. 112 p.
- MACEDO, M.O, CAMPELLO, E.F.C, ANDRADE, A.G, FARIA, S.M. de. Establishment of legume trees on heaps of blast furnace slag. **Floresta Ambiente**, v.13, p.20–25, 2006.
- MACEDO, M.O. **Estoque de carbono, nitrogênio e fertilidade do solo em áreas em recuperação com leguminosas e em um sistema de agricultura itinerante de alta produtividade**. Tese (Doutorado em Agronomia - Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2007. 82p.
- MACEDO, M.O.; RESENDE, A.S.; GARCIA, P.C.; 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.
- MAGID, J, CADISCH, G, GILLER, K. Short and medium term plant litter decomposition in a tropical Ultisol elucidated by physical fractionation in a dual ^{13}C and ^{14}C isotope study. **Soil Biology and Biochemistry**, v.34, p. 1273-1281, 2002.

- MANZATTO, H.R.H. **Dinâmica da matéria orgânica em solo Glei Pouco Húmico cultivado com arroz inundado no vale do São João. Itaguaí.** (Mestrado em Agronomia - Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 1990. 143p.
- MARTIN, A.; MARIOTTI, A.; BALESSENT, J.; LAVELLE, P.; VUATTOUX, R. Estimate of organic matter turnover rate in a savanna soil by ¹³C natural abundance measurements. **Soil Biology and Biochemistry**, v.22, n.4, p.517-523, 1990.
- MARTIUS, C.; HÖFER, H.; GARCIA, M.V.B.; RÖMBKE, J.; HANAGARTH, W. Litterfall, litter stocks and decomposition rates in rainforest and agroforest sites in central Amazonia. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.68, p.137-154, 2004.
- MATHERS, N.J.; MENDHAM, D.S.; O'CONNELL, A.M.; GROVE, T.S.; XU, Z.; SAFFIGNA, P.G. How does residue management impact soil organic matter composition and quality under *Eucalyptus globules* plantations in southwestern Australia? **Forest Ecology and Management**, v. 179, p. 253-267, 2003.
- MCLAUCHLAN, K.K. Effects of soil texture on soil carbon and nitrogen dynamic after cessation of agriculture. **Geoderma**, v.136, p.289-299, 2006.
- MIELNICZUK, J. Matéria Orgânica e a sustentabilidade de sistemas agrícolas. In: SANTOS, G.A.; CAMARGO, F.A.O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo. Ecossistemas tropicais e subtropicais.** Genesis, Porto Alegre. RS, p.1-8, 1999.
- MOLINA, J.A. E.; CHENG, H. H.; NICOLARDOT, B.; CHAUSSOD, R.; HOUOT, S. Biologically active soil organics: a case of double identity. In: DORAN, J.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F.; STEWART, B. A. (ed). **Defining soil quality for a sustainable environment.** SSSA Special Publication Number 35 SSSA/ASA, Madison, p. 169-177, 1994.
- MONTEIRO, M.T.; GAMA-RODRIGUES, E.F. Carbono, nitrogênio e atividade da biomassa microbiana em diferentes estruturas de serapilheira de uma floresta natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, p.819-826, 2004.
- MOREIRA, A.; COSTA, D.G. Dinâmica da matéria orgânica na recuperação de clareiras da floresta amazônica. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.39, n.10, p.1013- 1019, 2004.
- MYERS, N.; MITTERMEIER, R. A.; MITTERMEIER, C. G.; FONSECA, G. A. B. DA ; KENT, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, v. 403, p. 853-858, 2000.
- NEILL, C.; FRY, B.; MELILLO, J.; STEUDLER, P.; MORAES, F.L. ; CERRI, C.C. Forest- and pasture-derived carbon contributions to carbon stocks and microbial respiration of tropical pasture soils. **Oecologia**, v.107, p.113-119, 1996.
- 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 the southwestern Brazilian Amazon. **Ecological Applications**, v.7, n.4, p.1216-1225, 1997.
- NEPSTAD, D.C.; CARVALHO, C.R.; DAVIDSON, E.A.; JIPP, P.H.; LEFEBVRE, P.A.; NEGREIROS, G.H.; SILVA, E.D.; STONE, T.A.; TRUMBORE, S.E.; VIEIRA, S. The role of deep roots in the hydrological and carbon cycles of Amazonian forests and pastures. **Nature**, v. 372, p.666-669, 1994.
- PAIXÃO, F.A.; SOARES, C.P.B.; JACOVINE, L.A.G.; SILVA, M.L.; LEITE, H.G.; SILVA, G.F. Quantificação do estoque de carbono e avaliação econômica de diferentes alternativas de manejo em um plantio de eucalipto. **Revista Árvore**, v.30, n.3, p.411-420, 2006.

- PARFITT, R.L.; THENG, J.S.; WHITTON, J.S. ; SHEPHERD, T.G. Effects of clay minerals and land use on organic matter pools. **Geoderma**, v.75, p.1-12, 1997.
- PARROTTA, J.A.; TURNBULL, J.W. ; JONES, N. Catalyzing native forest regeneration on degraded tropical lands. **Forest Ecology and Management**, v.99, p.1-7, 1997.
- PEOPLES, M.B. ; CRASWELL, E.T. Biological nitrogen fixation: investments, expectations and actual contributions to agriculture. **Plant and Soil**, v. 141, p. 13-39, 1992.
- PINHEIRO, E.F.M.; PEREIRA, M.G.; ANJOS, L.H.C.; MACHADO, P.L.O.A. Fracionamento densimétrico da matéria orgânica do solo sob diferentes sistemas de manejo e cobertura vegetal em Paty do Alferes (RJ). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p.731-737, 2004.
- PUGNAIRE, F. I.; HAASE, P.; PUIGDEFÁBREGAS, J. Facilitation between higher plant species in a semiarid environment. **Ecology**, v.77, n.5, p.1420-1426, 1996.
- RANGEL, O.J.P.; SILVA, C.A. Estoques de carbono e nitrogênio e frações orgânicas de latossolo submetido a diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, p.1609- 1623, 2007.
- RESENDE, A.S; MACEDO, M.O; CAMPELLO, E.F.C; FRANCO, A.A. Recuperação de áreas degradadas através da reengenharia ecológica. Ed. Vozes. In: **Dimensões Humanas de Biodiversidade**, p. 315-340, 2006.
- RESH, S.C.; BINKLEY, D.; PARROTTA, J.A. Greater soil carbon sequestration under nitrogen-fixing trees compared with Eucalyptus species. **Ecosystems**, v.5, n.3, 217–231, 2002.
- RIBEIRO JÚNIOR, J.I. **Análises estatísticas no SAEG**. Viçosa: UFV, 2001. 301p.
- ROSCOE, R; BUURMAN, P.; VELTHORST, E.J.; PEREIRA, J.A.A. Effects of fire on soil organic matter in a cerrado *sensu-stricto* from Southeast Brazil as revealed by changes in ¹³C. **Geoderma**, v.95, p.141-160, Amsterdam, 2000.
- ROSCOE, R.; BUURMAN, P.; VELTHORST, E J; VASCONCELLOS, C.A. Soil organic matter dynamics in density and particle size fractions as revealed by the ¹³C/¹²C isotopic ratio in a Cerrado's oxisol. **Geoderma**, v.104, p.185-202, 2001.
- ROSCOE, R.; MACHADO, P.L.O.A. **Fracionamento físico do solo em estudos da matéria orgânica**. Embrapa Dourados, 88p, 2002.
- ROSSI, J.P.; MATHIEU, J.; COOPER, M.; GRIMALDI, M. Soil macrofaunal biodiversity in Amazonian pastures: Matching sampling with patterns. **Soil Biology and Biochemistry**, v.38, p.2178-2187, 2006.
- SALIMONI, C.I.; WADT, P.G.S.; MELO, A.W.F. Dinâmica do carbono 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.
- SANCHEZ, P.A.; VILLACHICA, J.H.; BANDY, D.E. Soil fertility after clearing a tropical rainforest in Peru. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.47, p.1171-1178, 1983.
- SILVA JUNIOR, M.C.; SACARANO, F.R.; SOUZA CARDEL, F. Regeneration of an Atlantic Forest formation in the under store of a *Euclyptus grandis* plantation in southeastern Brazil. **Journal Tropical Ecology**, v.11, p.147-152,1995.

- SILVA, G.T.A.; MATOS, L.V.; NÓBREGA, P.O.; CAMPELLO, E.F.C.; RESENDE, A.S.; Chemical composition and decomposition rate of plants used as green manure. **Scientia Agricola**, v.65, p. 298-305, 2008
- SILVA, G.T.A.; RESENDE, A.S.; CAMPELLO, E.F.C.; DIAS, P.F.; FRANCO, A.A. Importância da fixação biológica de nitrogênio na sustentabilidade de sistemas agroflorestais. In: GAMA-RODRIGUES, A. C.; BARROS, N. F.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; FREITAS, M. S. M.; VIANA, A. P.; JASMIN, J. M.; MARCIANO, C. R.; CARNEIRO, J. G. A. (Eds.). **Sistemas agroflorestais: bases científicas para o desenvolvimento sustentável**. UENF, Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, p.257-274, 2006.
- SILVER, W.L.; OSTERTAG, R.; LUGO, A.E. The potential for carbon sequestration through reforestation of abandoned tropical agricultural and pasture lands. **Restoration Ecology**, v.8, p.394-407, 2000.
- SISTI, C. P. J.; SANTOS, H. P.; 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**, v. 76, p. 39-58. 2004.
- SIX, J.; ELLIOT, E.T.; PAUSTIAN, K. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. **Soil Science Society of America Journal**, v.63, p.1350-1358, 1999.
- SIX, J.; GUGGENBERGER, G.; PAUSTIAN, K.; HAUMAIER, L.; ELLIOTT, E.T.; ZECH, W. Source and composition of soil organic matter fractions between and within soil aggregates. **European Journal of Soil Science**, v.52, p.607-618, 2001.
- SIX, J, FELLER, C, DENEFF, K, OGLE, S.M, MORAES-SÁ, J.C, ALBRECHT, A. Soil organic matter. biota and aggregation in temperate and tropical soils: effects of no-tillage. **Agronomie**, v.22, p.755-775, 2002.
- SKJEMSTAD, J.O, LE FEUVRE, R.P, PREBBLE, R.E. Turnover of soil organic matter under pasture as determined by ^{13}C natural abundance. **Australian Journal of Soil Research**, v.28, p.267-276, 1990.
- SMITH, B.N.; EPSTEIN, S. Two categories of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios for higher plants. **Plant Physiology**, v.47, p.380-384, 1971.
- SOHI, S.; MAHIEU, N.; GAUNT, J. ^{13}C NMR to verify modelable soil organic matter fractions defined by physical location. In: **World Congress of Soil Science**, 16, 1998, Montpellier. Anais.... Montpellier. 1 CD-ROOM, 1998.
- SOHI, S. P.; MAHIEU, N.; ARAH, J. R. M.; POWLSON, D. S.; MADARI, B.; GAUNT, J.L. A procedure for isolating soil organic matter fractions suitable for modeling. **Soil Science Society of America Journal**, v.65, p.1121-1128, 2001.
- SOUZA, J.S. **Dinâmica espacial e temporal do fluxo de CO_2 do solo em floresta de terra firme na Amazônia central**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Pesquisas da Amazônia, Manaus, 62p, 2004.
- SPECHT, A.; WEST, P.W. Estimation of biomass and sequestered carbon on farm forest plantation in northern New South Wales, Australia. **Biomass & Bioenergy**, v. 25, p.363-379, 2003.
- SWIFT, R.S. Sequestration of carbon by soils. **Soil Science**, v.166, p.858- 871, 2001.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant Physiology**. Sinauer Associates, Inc, Publishers. Sunderland, Massachussetts, 792 p, 1998.

TARRÉ, R.; MACEDO, R.; CANTARURI, R. B.; REZENDE, C. de P.; PEREIRA, J.M.; FERREIRA, E.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. The effect of the presence of a forage legume on nitrogen and carbon levels in soils under *Brachiaria* pastures in the Atlantic forest region of the south of Bahia, Brazil. **Plant and Soil**, v. 234, p. 15-26, 2001.

TERRASTAT. Land resource potential and constraints statistics at country and regional level. Disponível em www.fao.org/ag/agl/agll/terrastat Acesso em 20 de novembro, 2009.

TIESSEN, H.; STEWART, J.W.B. Particle-size fractions and their use in studies of soil organic matter. II. Cultivation effects on organic matter composition in size fractions. **Soil Science Society of America Journal**, v.47, p.509-514, 1983.

TIESSEN, H, CUEVAS E, CHACON, P. The role of soil organic matter in sustaining soil fertility. **Nature**, v.371, p.783-785, 1994.

URQUIAGA, S.; ALVES, B.J.R.; CAMPOS, D.V.B.; BODDEY, R.M. Aplicação de técnicas de ¹³C em estudos de seqüestro de carbono em solos agrícolas In: ALVES, B.J.R.; URQUIAGA, S.; AITA, C. BODDEY, R.M.; JANTALIA, C.P.; CAMARGO, F.O. (Eds). **Manejo de sistemas agrícolas: impacto no seqüestro de carbono e nas emissões de gases de efeito estufa**. Genesis, Porto Alegre, 216p, 2006.

VANDENBYGAART, A.J, GREGORICH E. G, ANGERS D. A. Influence of agricultural management on soil organic carbon: a compendium and assessment of Canadian studies. **Canadian Journal of Soil Science**, v.83, p.363-380, 2003.

VELOSO, H.P.; RANGEL-FILHO, A.L.R.; LIMA, J.C.A. **Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal**. Rio de Janeiro: Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 1991. 123 pp.

VITAL, A.R.T, GUERRINI, I.A, FRANKEN, W.K, FONSECA, R.C.B. Produção de serapilheira e ciclagem de nutrientes de uma floresta estacional semidecidual em zona ripária. **Revista Árvore**, v.28, n.6, p.793-800, 2004.

VITORELLO, V.A.; CERRI,C.C.; ANDERSON,F.; FELLER,C.; VICTORIA,R.L. Organic matter and natural carbon-13 distribution in forested and cultivated Oxisols. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.53, p.773-778, 1989.

VITOUSEK, P.M, MATSON. P.A, CLEVE. K.V. Nitrogen availability and nitrification during succession: primary, secondary and oldfield seres. **Plant and Soil**, v.115, p.229-239, 1989.

WARD, S.C. Soil development on rehabilitated bauxite mines in south-west Australia. **Australian Journal Soil Research**, v.38, p.453-464, 2000.

WILCKE, W. ; LILIENFEIN, J. Soil carbon-13 natural abundance under native and managed vegetation in Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, v.68, p.827-832, 2004.

WU, T.; SCHOENAU, J.J.; LI, F.; QIAN, P.; MALHI, S.S.; SHI, Y. ; XU, F. Influence of cultivation and fertilization on total organic carbon and carbon fractions in soils from the Loess Plateau of China. **Soil & Tillage Research**, v.77, p.59-68, 2004.

ZHOU, G.; LIU, S.; ZHANG, D.; TANG, X.; ZHOU, C.; YAN, J.; MO, J. Old-growth forest can accumulate carbon in soils. **Science**, v.314, p.1417, 2006.