

ESTOQUE DE C E ABUNDÂNCIA NATURAL DE ^{13}C EM RAZÃO DA CONVERSÃO DE ÁREAS DE FLORESTA E PASTAGEM EM BIOMA MATA ATLÂNTICA

Denilson Dortzbach^{(1,2)*}, Marcos Gervasio Pereira⁽³⁾, Éverton Blainski⁽²⁾ e Antonio Paz González⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Departamento de Solos, Programa de Pós-graduação em Agronomia - Ciência do Solo, Seropédica, Rio de Janeiro, Brasil.

⁽²⁾ Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.

⁽³⁾ Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Departamento de Solos, Seropédica, Rio de Janeiro, Brasil.

⁽⁴⁾ Universidad de A Coruña, Facultad de Ciencias, Área de Edafología y Química Agrícola, *Campus Zapateira*, A Coruña, Espanha.

* Autor correspondente.

E-mail: denilson@epagri.sc.gov.br

RESUMO

Conversões da cobertura vegetal decorrentes do manejo podem alterar o estoque de carbono e a abundância natural de ^{13}C . Objetivou-se avaliar o estoque de C e a abundância natural de ^{13}C em áreas de sucessão de floresta (F) e pastagem (P), com diferentes tempos de uso, na Floresta Atlântica no Estado de Santa Catarina. Sete sucessões de uso entre F e P foram definidas por fotografias aéreas tomadas em 1957, 1978 e 2008, entrevistas com moradores e escolha de áreas com florestas em estágio médio de regeneração. As sucessões foram identificadas como FFP, FPF, FFP, FPP, PFF, PPF, PPP, em que a primeira letra se refere ao uso observado em 1957; a segunda, em 1978; e a terceira, em 2008. Foram coletadas amostras de solo nas camadas de 0,00-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40; 0,40-0,50; 0,50-0,60; 0,60-0,80 e 0,80-1,00 m. Quantificaram-se os teores de carbono orgânico total (COT), abundância de C ($\delta^{13}\text{C}$), densidade do solo (Ds) e estoque de carbono (ECOT). A conversão de F em P proporcionou aumento da Ds e reduções nos teores de COT e no ECOT do solo. O maior valor de ECOT ocorreu nas áreas atualmente ocupadas por florestas, mesmo tendo sido utilizadas como pasto anteriormente. Áreas de floresta secundária tenderam, em relação aos teores de COT, a um novo equilíbrio, dado que foram verificados teores de COT superiores aos quantificados em áreas de floresta primária. As áreas de floresta e pastagem, com diferentes idades de uso e nas diferentes profundidades de solo avaliadas, evidenciaram respostas na $\delta^{13}\text{C}$, resultando em diferentes assinaturas isotópicas, confirmando a mudança de uso de plantas C_3 para C_4 . Em pastagens com 50 anos de uso, na camada de 0,00-0,10 m, 66 % do COT

Recebido para publicação em 21 de agosto de 2014 e aprovado em 3 de julho de 2015.

DOI: 10.1590/01000683rbcsc20140531

do solo ainda é derivado da floresta original. A análise de componentes principais (ACP) indicou que o COT foi o atributo que melhor discriminou as alterações em razão do uso da terra, nas diferentes camadas de solo.

Palavras-chave: uso do solo, abundância natural de ^{13}C , análise da dinâmica.

ABSTRACT: CARBON STOCK AND NATURAL ABUNDANCE OF ^{13}C AS A FUNCTION OF CONVERSION OF FOREST AND GRASSLAND AREAS IN SOUTHERN BRAZIL

Conversions of plant cover resulting from management practices may alter carbon storage and the natural abundance of ^{13}C . The aim of this study was to evaluate C stocks and natural abundance of C ($\delta^{13}\text{C}$) in areas of forest (F) and pasture (P) sequences with different times of usage in an Atlantic Forest area, Santa Catarina, Brazil. Seven usage sequences of forest (F) and pasture (P) were defined through aerial photographs taken in 1957, 1978, and 2008; through interviews with residents; and through choice of areas with forests in an intermediate stage of regeneration. The sequences were identified as FFP, FPF, FFP, FPP, PFF, PPF, and PPF; in which the letters F or P refer to the usage observed in the years 1957, 1978, and 2008, respectively. Soil was sampled at the depths of 0.00-0.10, 0.10-0.20, 0.20-0.30, 0.30-0.40, 0.40-0.50, 0.50-0.60, 0.60-0.80, and 0.80-1.00 m. Natural abundance of soil ^{13}C ($\delta^{13}\text{C}$), total organic carbon (TOC), bulk density (BD), and carbon stock (CST) were quantified. Conversion of forest to pasture led to an increase in BD and reduction in TOC and CST in the soil. The highest CST value was observed in areas currently occupied by forest, even when previously used as pasture. The TOC in the areas with secondary forest showed a tendency toward new equilibrium, since TOC values were higher than those observed in primary forest areas. The forest and pasture areas showed variation in the isotopic signatures of $\delta^{13}\text{C}$ in the different land use times and soil depths, confirming the shift in cultivation from C_3 to C_4 plants. In pasture areas with 50 years of use, at the 0.00-0.10 m depth, 66 % of soil TOC is still derived from the original forest. Principal component analysis (PCA) indicated that TOC was the property that best discriminated the changes related to land use in the different soil depths.

Keywords: land use, natural abundance of ^{13}C , C fraction dynamics.

INTRODUÇÃO

O Bioma Floresta Atlântica é um dos ecossistemas mais degradados do mundo. O Estado de Santa Catarina está totalmente inserido nesse Bioma. Em 2012, nesse Estado, restavam apenas 23,23 % da cobertura vegetal original (Fundação SOS Mata Atlântica, 2014). Estudos realizados pela Fundação do Meio Ambiente de Santa Catarina, concluídos em 2009 (Fatma, 2014), apontaram para uma área total de 41,5 % da superfície do Estado coberta por florestas em estágio médio, avançado e, ou, primário; e, segundo Vibrans et al. (2011), o estado ainda apresenta cerca de 36 % da sua cobertura original.

A maior extensão da área ainda coberta por florestas no Estado é representada por fragmentos de Floresta Ombrófila Densa, que, em muitos locais, foi substituída por outros usos do solo, principalmente pastagens, ou foram descaracterizadas pela extração de espécies arbóreas de interesse econômico ou, ainda, foram abandonadas e entraram em processo de sucessão secundária. Dessa forma, essas florestas atualmente são caracterizadas por mosaicos vegetacionais compostos pelos mais diversos estágios de regeneração (Vibrans et al., 2011).

A substituição de ambientes de floresta por pastagens, assim como a conversão de áreas de pastagens em florestas secundárias, leva a importantes mudanças nos atributos físicos e químicos dos solos, podendo alterar os estoques e a qualidade da matéria orgânica do solo (MOS), especialmente o grau de oxidação e a sua labilidade. Perdas acentuadas de C após o desmatamento e o cultivo dos solos são acompanhados pelo consumo de frações orgânicas de mais lábeis, implicando no aumento do grau de aromaticidade da MOS, o que causa alterações na ciclagem global desse elemento, podendo comprometer a sustentabilidade desses agroecossistemas (Silva et al., 1999).

Com a introdução das pastagens, os estoques de C no solo podem decrescer nos primeiros anos da implantação e aumentar nos anos seguintes, até atingir valores próximos ou superiores aos existentes antes da conversão (Melo, 2003; Salimon et al., 2007). Entretanto, alguns trabalhos têm constatado decréscimo no teor da MOS em razão do tempo de conversão (Desjardins et al., 1994; Veldkamp, 1994).

Esse padrão de redução ocorre por causa da rápida mineralização do C biodegradável proveniente da floresta e de fatores que influenciam a taxa de mineralização do carbono orgânico total (COT), além

dos relacionados à atividade biológica do solo, às propriedades do ecossistema, aos mecanismos físicos de proteção de agregados do solo, à recalcitrância bioquímica e à duração da exposição da MOS aos decompositores (Koutika et al., 2000).

Nos ecossistemas naturais, a fonte de COT do solo tem uma única origem, proveniente de resíduos vegetais da vegetação nativa, enquanto nos agroecossistemas a taxa anual de COT pode ser derivada do material orgânico remanescente da vegetação nativa, da decomposição do sistema radicular e da aplicação de calcário e introduzida pelos resíduos culturais de plantas cultivadas (Carvalho et al., 2009).

Essa diferenciação das fontes de C derivadas da floresta e pastagem pode ser efetuada com o emprego de técnicas isotópicas com base na abundância natural do ^{13}C ($\delta^{13}\text{C}$). A utilização de traçadores isotópicos naturais é um método que está sendo aplicado para melhor compreensão da complexidade dessas transformações na paisagem. O uso do $\delta^{13}\text{C}$ para identificar a origem do C do solo pressupõe que sua matéria orgânica reflita o material vegetal do qual derivou (Ballesdent et al., 1987). Desse modo, essas variações podem ser usadas para identificar os efeitos antrópicos sobre a estrutura dos ecossistemas (Jantalia et al., 2007).

Grande parte das espécies de plantas em florestas tropicais possui ciclo fotossintético do tipo C_3 . As gramíneas possuem ciclo fotossintético do tipo C_4 , que discriminam menos e são mais enriquecidas em ^{13}C , e os valores de $\delta^{13}\text{C}$ situam-se entre -6 e -19 ‰; as de tipo C_3 absorvem menos o ^{13}C e mais o isótopo ^{12}C e, por isso, são mais empobrecidas em ^{13}C , cujos valores oscilam entre -20 e -34 ‰ (Smith e Epstein, 1971). Esse padrão de absorção de isótopos de C tem sido utilizado para estudar as modificações na relação isotópica do C do solo, decorrente da alteração da cobertura florestal.

No Brasil, essa técnica tem sido usada nos estudos de ciclagem da MOS em médio prazo, onde, comumente, florestas (ciclo fotossintético C_3) têm sido substituídas por culturas do ciclo fotossintético C_4 (Volkoff e Cerri, 1987; Bernoux et al., 1998; Jantalia et al., 2007; Balbinot, 2009; Pinheiro et al., 2010; Costa Júnior et al., 2011). Apesar de esses resultados e estudos já feitos, poucos são os trabalhos que evidenciam as alterações da composição isotópica do C do solo, decorrentes de mudanças de uso da terra na Mata Atlântica (Balbinot, 2009).

A partir do exposto, as hipóteses do estudo são: as diferentes formas de uso do solo proporcionam variações no ECOT do solo; e as técnicas isotópicas funcionam como ferramenta para avaliar a dinâmica do C no solo, demonstrando as modificações que as áreas foram submetidas, em razão da mudança da cobertura vegetal.

Objetivou-se avaliar as mudanças no ECOT e a abundância natural de ^{13}C ($\delta^{13}\text{C}$) em áreas de conversão de floresta e pastagem e de pastagem para floresta secundária com diferentes idades de uso, em comparação com a floresta primária, no Bioma Mata Atlântica do Sul do Brasil.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado nos municípios de Camboriú e Balneário Camboriú, onde está inserida a Bacia Hidrográfica do Rio Camboriú, com localização entre os paralelos $26^{\circ} 57' 15''$ e $27^{\circ} 9' 20''$ de latitude sul e entre os meridianos $48^{\circ} 33' 30''$ e $48^{\circ} 48' 45''$ de longitude oeste, em uma área de 25.824,83 ha, situada na região litorânea do Estado de Santa Catarina (Figura 1). A classificação climática da região, segundo Köppen, é Cfa, clima subtropical úmido de verões quentes. A área mapeada pertence à região da Floresta Ombrófila Densa, Formação Floresta Submontana, caracterizada pelo grande número de espécies que se desenvolvem em quatro estratos distintos (Gaplan, 1986). Os solos dominantes são Argissolos, Cambissolos e Gleissolos (Embrapa, 1998).

Inicialmente, foi realizada a análise de uso e cobertura das terras, com base nos anos de 1957, 1978 e 2008. O processamento digital das imagens foi feito no *software* ArcGIS[®] 10.1, da Esri. Para análise de arquivos dos anos de 1957 e 1978, utilizaram-se fotografias aéreas pancromáticas na escala de 1:25.000, georreferenciadas, do levantamento aerofotogramétrico de Santa Catarina - vôo Cruzeiro do Sul de 1957 e 1978, disponível no acervo aerofotogramétrico da Empresa de Pesquisa Agropecuária e de Extensão Rural de Santa Catarina (Epagri). Para análise do uso da terra de 2008, o método foi estruturado a partir da visão sinóptica da área, utilizando-se uma imagem do sensor *QuickBird*, ortorretificada, datada de 2008, com resolução espacial de 0,60 m, que foi gerada pela fusão das bandas multiespectrais com a banda pancromática.

Na análise do uso e da cobertura das terras de 1957, 1978 e 2008, foram delimitados os polígonos por meio da vetorização em tela nas três imagens. Após a análise das classes no Sistema de Informação Geográfica, os polígonos, nas três datas, foram submetidos a uma edição final.

Foram determinadas e identificadas nove classes de uso da terra em 2008; oito, em 1978; e oito, em 1957, por meio dos padrões de cor, textura e aspectos associados. Com os dados já editados, foram elaborados os mapas de uso da terra dos municípios de Camboriú e Balneário Camboriú, para os anos de 1957, 1978 e 2008. A partir da análise multitemporal das imagens classificadas,

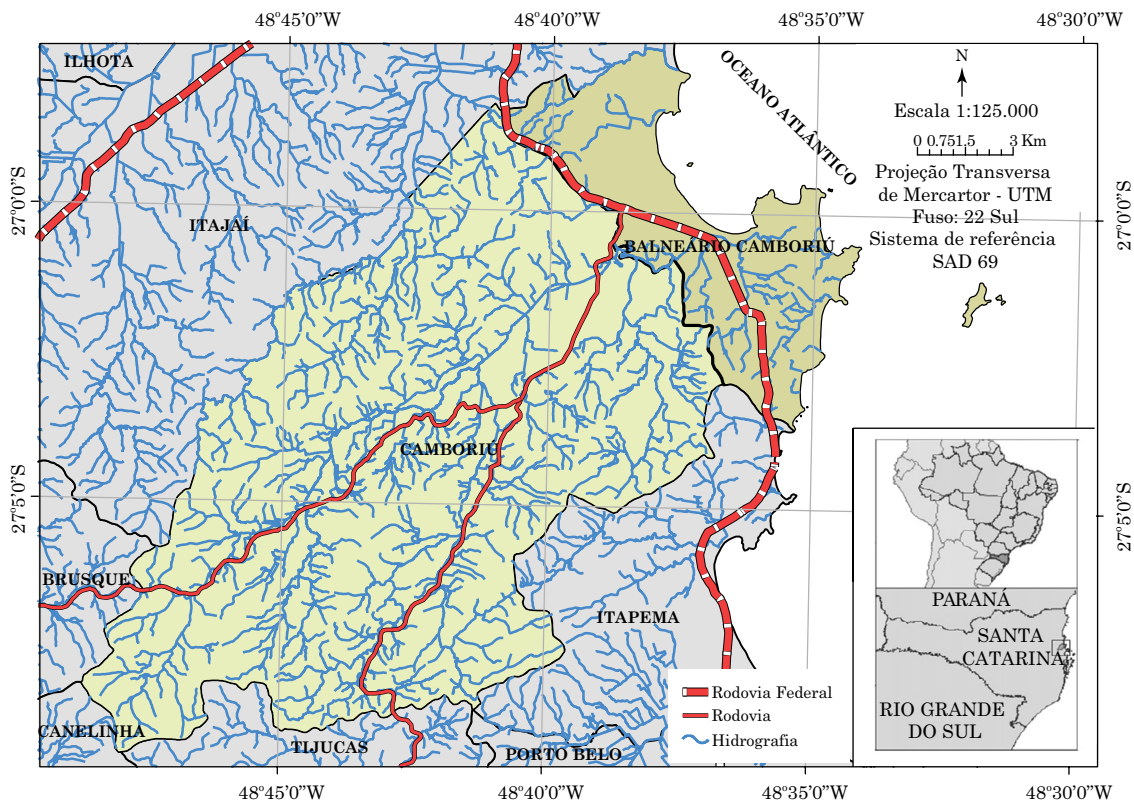


Figura 1. Localização dos municípios de Balneário Camboriú e Camboriú, SC.

foi possível descrever a variação das características da paisagem no decorrer do tempo.

Por meio do *software* ArcGIS®, foi realizada a análise da dinâmica do uso da terra nos períodos considerados, conduzido por meio de tabulação cruzada entre imagens temáticas de datas consecutivas. Fizeram-se as combinações entre todos os usos ocorrentes nas três datas e, a partir dessa análise, foram selecionadas as sucessões que apresentaram a maior representatividade. Dessa forma, selecionaram-se sete sucessões de uso relacionadas à floresta e pastagem, que representaram mais de 75 % das mudanças ocorridas (Quadro 1).

Essas sucessões de uso das terras foram definidas como tratamentos, sendo mapeadas e plotadas para identificação no campo (Figura 2). A representação dos tratamentos é composta por três letras: a primeira refere-se a 1957; a segunda, a 1978 e a terceira, a 2008.

Foram selecionadas três áreas (repetições) para cada tratamento (FFF, FPF, PFF, PPF, FPP, FFP, PPP), definidas pela observação no mapa e entrevista com moradores. Para os tratamentos FPF, PFF PPF, selecionaram-se florestas em estágio intermediário (médio), e as coletas foram realizadas no terço médio das encostas, em áreas de Argissolos.

Quadro 1. Diferentes formas de uso ou cobertura vegetal nos períodos estudados, com as respectivas áreas

Combinações			Área ha (%)
1957	1978	2008	
F ⁽¹⁾	F	F	11.429 (44,26)
F	P ⁽²⁾	F	2.347 (9,09)
P	F	F	1.806 (6,99)
P	P	F	1.479 (5,73)
F	F	P	940 (3,64)
P	P	P	790 (3,06)
F	P	P	633 (2,45)

⁽¹⁾ F: floresta; e ⁽²⁾ P: pastagem.

As coordenadas decimais e a altitude dos pontos de coleta são apresentadas no quadro 2.

A classe P refere-se a áreas em uso como pastagem para gado de corte com lotação média de 1,5 unidade animal (UA) ha⁻¹, durante o ano todo. O solo é recoberto por gramínea, principalmente por *Panicum maximum* cv. colômbio, com poucas plantas herbáceas e alguns arbustos. Essas pastagens foram estabelecidas após corte e queimada da floresta. As

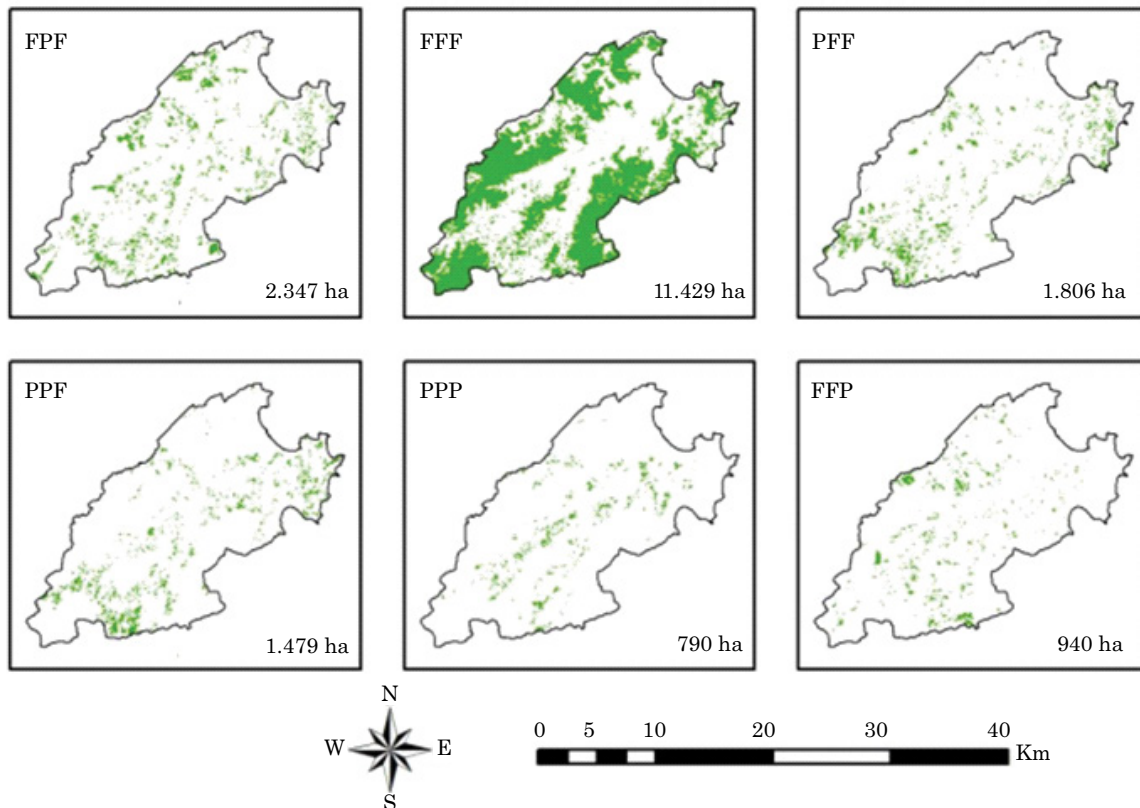


Figura 2. Mapas representando a localização das combinações de uso das terras mais representativas, com áreas (ha), nos municípios de Camboriú e Balneário Camboriú, em que FFF: uso com floresta a mais de 70 anos; FPF: área ocupada nos últimos 25 anos por floresta, antecedida por um período de 25 anos por pastagem e anteriormente por floresta; PFF: uso com florestas nos últimos 50 anos e pastagem no período anterior a 1957; PPF: área ocupada nos últimos 25 anos com floresta, antecedida por pastagem; PPP: uso com pastagem a mais de 70 anos; e FFP: uso com pastagem nos últimos 25 anos.

áreas não recebem qualquer tipo de adubação e o aporte de nutrientes nos pastos ocorre somente em razão das excretas dos animais.

O tratamento FFF representa áreas de Floresta Ombrófila Densa Submontana, no sopé das encostas das Serras Litorâneas, em estágio avançado e, ou, primário, que se diferenciam das demais, pelo fato de, nas outras áreas, ter havido completa mudança no uso da terra, ou seja, a vegetação florestal original foi completamente removida para implantar as pastagens; em outras áreas ocorreu posteriormente a regeneração da floresta secundária.

Os tratamentos de acordo com a sucessão e o tempo (anos) de uso, compreendendo o período de mais de 70 anos, até o ano de coleta (2013) encontram-se na figura 3. O tratamento PFF, por exemplo, representa áreas ocupadas por florestas nos últimos 50 anos, antecedidas por um período superior a 70 anos com pastagem. FPF trata-se de área ocupada nos últimos 25 anos por floresta, antecedida por um período de 25 anos por pastagem e anteriormente por floresta.

Foram coletadas amostras com estrutura alterada e amostras com estrutura preservada nas camadas de 0,00-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40; 0,40-0,50; 0,50-0,60; 0,60-0,80; e 0,80-1,00 m. Para as amostras com estrutura alterada, para cada profundidade de solo, foi coletada uma amostra composta, formada a partir de três amostras simples, com três repetições para cada tratamento avaliado. Após a coleta, as amostras foram identificadas e acondicionadas em sacos plásticos, sendo, em seguida, transportadas para o laboratório, secas ao ar, destorroadas e passadas por peneira de 2 mm de malha, obtendo-se a terra fina seca ao ar (TFSA), material que foi utilizado para realizar as análises. As amostras com estrutura preservada foram coletadas em anéis volumétricos metálicos de 0,05 m de altura e 0,06 m de diâmetro (Embrapa, 1997).

As análises de granulometria e de Ds foram realizadas, segundo Embrapa (1997). A análise de COT e a de abundância isotópica ($\delta^{13}\text{C}$) foram feitas no Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA), USP.

Quadro 2. Coordenadas decimais e altitude dos pontos de coleta dos tratamentos FFF, PFF, FPF, FFP, PPF, FPP e PPP, com três repetições (R1, R2 e R3)

Tratamento		R1	R2	R3
FFF	Latitude (°)	-27,124223	-27,073517	-27,108475
	Longitude (°)	-48,696132	-48,727235	-48,787928
	Altitude (m)	31	44	33
PFF	Latitude (°)	-27,100626	-27,092556	-27,065794
	Longitude (°)	-48,713436	-48,699781	-48,718768
	Altitude (m)	31	32	33
FPF	Latitude (°)	-27,094953	-27,070376	-27,070374
	Longitude (°)	-48,735210	-48,729755	-48,729753
	Altitude (m)	79	25	25
FFP	Latitude (°)	-27,068070	-27,094953	-27,054437
	Longitude (°)	-48,729538	-48,735210	-48,681542
	Altitude (m)	24	79	28
PPF	Latitude (°)	-27,082313	-27,107025	-27,105217
	Longitude (°)	-48,733386	-48,773840	-48,770616
	Altitude (m)	47	60	109
FPP	Latitude (°)	-27,067879	-27,069620	-27,105010
	Longitude (°)	-48,723862	-48,729646	-48,745899
	Altitude (m)	25	24	44
PPP	Latitude (°)	-27,092311	-27,092556	-27,079366
	Longitude (°)	-48,701035	-48,699781	-48,729220
	Altitude (m)	31	32	37

FFF: uso com floresta a mais de 70 anos; FPF: área ocupada nos últimos 25 anos por floresta, antecedida por um período de 25 anos por pastagem e anteriormente por floresta; PFF: uso com florestas nos últimos 50 anos e pastagem no período anterior a 1957; PPF: área ocupada nos últimos 25 anos com floresta, antecedida por pastagem; PPP: uso com pastagem a mais de 70 anos; FFP: uso com pastagem nos últimos 25 anos; e FPP: uso com pastagem nos últimos 25 anos.

A $\delta^{13}\text{C}$ foi determinada em amostras de aproximadamente 300 mg de TFSA, finamente moída e passada por malha de 100 mesh, com precisão de quatro casas decimais. Em seguida, essas foram acondicionadas em cápsulas de estanho e avaliadas por meio um espectrômetro de massa isotópica de fluxo contínuo (espectrômetro de massa Finnigan Delta Plus acoplado em um autoanalisador de C total Carlo Erba EA 1108 – Internacional PDB).

A conversão de sistemas naturais em áreas agrícolas altera a dinâmica do C, comumente com uma diminuição de seu estoque de C (ECOT). Para definir o ECOT (Mg ha^{-1}), levaram-se em consideração massas iguais de solo entre os tratamentos, utilizando-se como referência o tratamento FFF (correção por massa equivalente), uma vez que, quando compactadas, amostras retiradas em camadas de solo da pastagem, por exemplo, deixam de ser diretamente comparáveis com amostras na floresta, para uma mesma profundidade de solo. Dessa forma, buscou-se eliminar o efeito dos sistemas de uso e manejo do solo na Ds, seguindo-se orientações de Ellert e Bettany

(1995). Os ECOT foram calculados com base em massas equivalentes de solo (Sisti et al., 2004), que foram usados como referência à massa do solo do tratamento FFF.

$$C_s = \sum_{i=1}^{n-1} C_{ti} + \left[M_{tn} - \left(\sum_{i=1}^n M_{ti} - \sum_{i=1}^n M_{si} \right) \right] \times C_{tn}$$

em que C_s é o estoque de C total, corrigido em razão da massa de solo de uma área de referência; $\sum_{i=1}^{n-1} C_{ti}$ é o somatório dos estoques de C do solo da primeira à penúltima camada amostrada, no tratamento considerado (Mg ha^{-1}); $\sum_{i=1}^n M_{ti}$ M_{tn} é a massa do solo da última camada amostrada no tratamento (Mg ha^{-1}); $\sum_{i=1}^n M_{si}$ é o somatório da massa total do solo amostrado sob o tratamento (Mg ha^{-1}); $\sum_{i=1}^n M_{ti}$ somatório da massa total do solo amostrado na área de referência (Mg ha^{-1}); e C_{tn} é o teor de C do solo na última camada amostrada (Mg C Mg^{-1} de solo).

Antes da correção pela massa de solo, os estoques de C de cada uma das camadas, em todas as áreas estudadas, foram calculados pela expressão matemática proposta por Veldkamp (1994): $\text{ECOT} = (\text{COT} \times D_s \times e)/10$, em

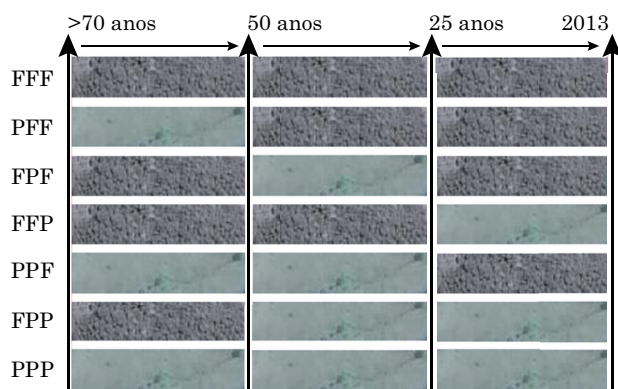


Figura 3. Representação da composição dos tratamentos FFF, PFF, FPF, FFP, PPF, FPP e PPP, em relação ao tempo de uso das terras, >70 anos, 50 anos, 25 anos, até 2013 (ano da coleta do solo). FFF: uso com floresta a mais de 70 anos; FPF: área ocupada nos últimos 25 anos por floresta, antecedida por um período de 25 anos por pastagem e anteriormente por floresta; PFF: uso com florestas nos últimos 50 anos e pastagem no período anterior a 1957; PPF: área ocupada nos últimos 25 anos com floresta, antecedida por pastagem; PPP: uso com pastagem a mais de 70 anos; FFP: uso com pastagem nos últimos 25 anos; e FPP: uso com pastagem nos últimos 25 anos.

que ECOT é o estoque de C orgânico em determinada profundidade (Mg ha^{-1}); COT, o teor de C orgânico total na profundidade amostrada (g kg^{-1}); Ds, a densidade do solo da profundidade (Mg m^{-3}); e, a espessura da camada considerada (m).

O cálculo da razão de estratificação (RE) do ECOT foi feito conforme o método proposto por Franzluebbbers (2002), onde, em cada ponto amostrado, o valor de ECOT da camada superficial do solo (0,00-0,10 m) foi dividido pelo valor das camadas subsuperficiais (0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40; 0,40-0,50 e 0,50-0,60 m). Determinou-se a variação do ECOT (ΔECOT), que foi obtida pela diferença entre a RE determinada nos tratamentos PFF, FPF, FFP, PPF, FPP e PPP e a RE determinada para o tratamento FFF (0,00-0,10 m), correspondendo à taxa de sequestro no solo.

O percentual de C derivado de floresta e da pastagem foi obtido por meio de cálculo de diluição isotópica, conforme está evidenciado a seguir:

$$C_p = \frac{\delta - \delta_o}{\delta_c - \delta_o} \times 100$$

$$C_f = 100 - C_p$$

em que δ é $\delta^{13}\text{C}$ da amostra de solo analisada; δ_c , o valor de $\delta^{13}\text{C}$ de planta C_4 (-12,4 ‰) (Balbinot, 2009); e δ_o , o valor de $\delta^{13}\text{C}$ do solo sob floresta.

A partir da matriz de correlação entre os atributos, foi realizada a análise de componentes principais (ACP). Considerou-se proporção de variação acumulada mínima de 75 %. Para a identificação dos pontos das combinações e sua relação com as variáveis, fez-se a construção de um gráfico *biplot* (Gabriel, 1971), utilizando os escores dos dois primeiros componentes principais (CP).

Realizaram-se teste de médias de cada variável, correlação de Pearson e regressão linear múltipla. As análises estatísticas foram feitas, usando-se o *software* Assistat versão 7.7 beta (2011) e *Microsoft Excel*.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Verificaram-se diferenças na densidade do solo entre os tratamentos e as diferentes profundidades de solo analisados (Figura 4).

Comparando-se as coberturas vegetais, é possível observar, na profundidade de 0,00-0,10 m, que a Ds nas áreas que no último período apresentava cobertura florestal (FFF, PFF, FPF, PPF) diferiram em relação às áreas de pastagem (FFP, FPP, PPP). Para as áreas de floresta, os valores variaram entre 0,79 e 0,92 Mg m^{-3} , na camada superficial, enquanto nas de pastagem as pressões mecânicas exercidas pelo pisoteio do gado proporcionaram valores mais elevados de Ds nessa camada, apresentando valores médios entre 1,12 e 1,20 Mg m^{-3} (Figura 4).

Esse padrão de maiores valores de Ds em áreas de pastagem também foi observado por Freitas et al. (2012), os quais, avaliando a Ds de um Neossolo Quartzarênico Órtico em quatro sistemas de manejo: floresta nativa, agrofloresta, pasto e outra área recentemente convertida para uso agrícola, verificaram que as áreas de pastagem apresentaram os maiores valores médios de Ds, o que é explicado pela carga animal de 1,3 UA ha^{-1} , incluindo bovinos e equinos que pastam na área, durante anos. Entretanto, comparando áreas de pastagem de *B. humidicola* com nove anos de uso e consorciada com leguminosa, com uma área de mata adjacente, Tarré et al. (2001) não encontraram diferenças significativas entre os sistemas avaliados, apesar da tendência de os maiores valores serem encontrados nas áreas de pastagens.

O período de cinco anos não foi suficiente para reverter o padrão da Ds em áreas de conversão de pastagem degradada para o sistema plantio direto, como mencionado por Frazão et al. (2008); esses autores enfatizaram o efeito da degradação quando os solos foram utilizados com pastagem. Os períodos superiores a 25 anos com florestas (PPF e FPF), neste estudo, promoveram reduções nos valores de

D, que aproximaram dos valores observados para as áreas sob cobertura florestal (Figura 4).

Na camada de 0,10-0,20 m, as diferenças entre áreas de pastagem e floresta ficaram menos evidentes, sendo os maiores valores de Ds observados para o tratamento PPP, seguido do tratamento PFF (Figura 4). Trabalhando com pastagens sob Latossolo Vermelho, Marchão et al. (2007) concluíram que os incrementos nos valores médios da Ds aconteceram nas primeiras camadas do solo, principalmente na camada de 0,00-0,05 m, em razão do pisoteio animal. Revisando os efeitos do impacto do manejo na produção animal sobre o solo, Cantarutti et al. (2001) apresentaram que, em geral, a compactação por causa do tráfego animal ocorre nos primeiros centímetros do solo, podendo esses efeitos estenderem-se até os 0,15 m, padrão também observado neste estudo.

A Ds, em profundidade, apresentou o mesmo padrão em todos os tratamentos, verificando-se aumentos, com os maiores valores, na maioria dos casos, observados nas profundidades acima de 0,60 m (Figura 4). No trabalho sobre atributos físicos e teor de COT em um Argissolo Vermelho sob distintos sistemas de uso e manejo, Silva et al. (2006) também verificaram que a Ds aumentou em profundidade, independentemente do sistema de manejo, e apresentou correlação negativa com o teor de COT, possivelmente por influência dos constituintes orgânicos na agregação do solo.

Carbono do solo

Assim como a Ds, o teor de COT apresentou diferenças tanto entre os tratamentos como em profundidade. Os maiores valores médios foram observados na camada superficial dos tratamentos PFF, FFF e PPF (Quadro 3), demonstrando maior aporte de MOS nos sistemas utilizados por floresta, exceto o tratamento PPF, que apresentou menores valores (Figura 5).

Os valores observados nos tratamentos PFF e PPF, onde, em algum momento, as áreas de floresta foram convertidas em pastagem, evidenciam que períodos superiores a 25 anos podem favorecer recuperação do COT perdido em razão do desmatamento. Entretanto, para o tratamento FPF, não foi observado esse padrão. Como essas áreas foram utilizadas durante 25 anos, entre dois períodos, com floresta, pode-se pressupor que essas poderiam apresentar menor fertilidade natural ou outro impedimento, que, conseqüentemente, contribuiu para menor produção vegetal, refletindo em menores aportes de MOS. Uma explicação para esse padrão pode ser o resultado do abandono das áreas e a posterior regeneração de floresta. Adicionalmente, o manejo pode ter contribuído para a baixa entrada de material orgânico associado a uma alta oxidação da matéria orgânica.

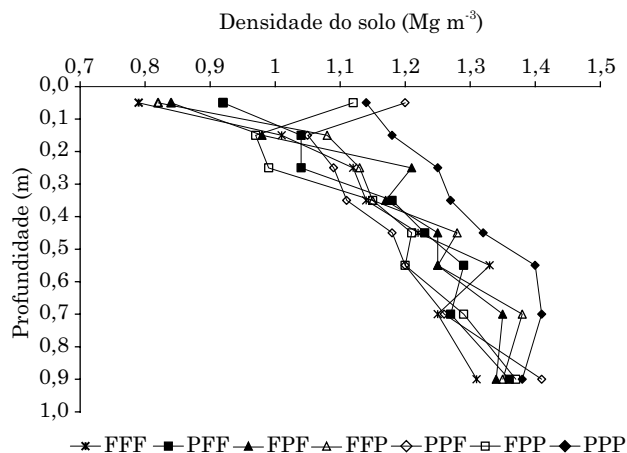


Figura 4. Densidade do solo para os tratamentos FFF, PFF, FPF, FFP, PPF, FPP e PPP, em diferentes profundidades, em que FFF: uso com floresta a mais de 70 anos; FPF: área ocupada nos últimos 25 anos por floresta, antecedida por um período de 25 anos por pastagem e anteriormente por floresta; PFF: uso com florestas nos últimos 50 anos e pastagem no período anterior a 1957; PPF: área ocupada nos últimos 25 anos com floresta, antecedida por pastagem; PPP uso com pastagem a mais de 70 anos; FFP uso com pastagem nos últimos 25 anos; e FPP: uso com pastagem nos últimos 25 anos.

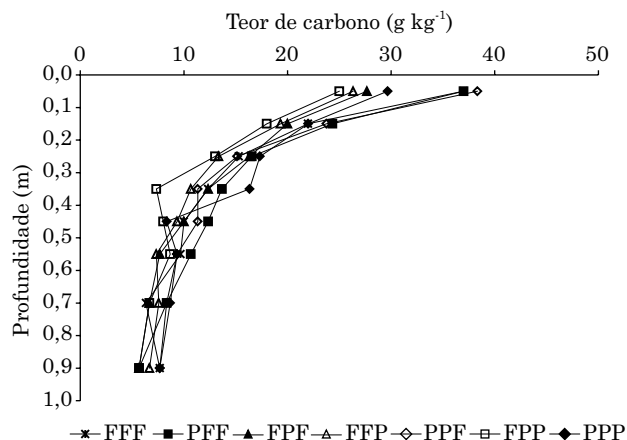


Figura 5. Teores de carbono orgânico total (COT) nos tratamentos FFF, PFF, FPF, FFP, PPF, FPP e PPP, em diferentes profundidades, em que FFF: uso com floresta a mais de 70 anos; FPF: área ocupada nos últimos 25 anos por floresta, antecedida por um período de 25 anos por pastagem e anteriormente por floresta; PFF: uso com florestas nos últimos 50 anos e pastagem no período anterior a 1957; PPF: área ocupada nos últimos 25 anos com floresta, antecedida por pastagem; PPP: uso com pastagem a mais de 70 anos; FFP: uso com pastagem nos últimos 25 anos; e FPP: uso com pastagem nos últimos 25 anos.

Quadro 3. Razão de estratificação (RE) do estoque de carbono (ECOT) entre as camadas em cada tratamento e variação do RE do ECOT (Δ ECOT) dos tratamentos PFF, FPF, FFP, PPF, FPP e PPP, em relação ao tratamento FFF, nas profundidades de 0,00-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40; 0,40-0,50 e 0,50-0,60 m

Prof. m	RE entre as camadas							RE entre os tratamentos (Δ ECOT)					
	FFF	PFF	FPF	FFP	PPF	FPP	PPP	FFF-PFF	FFF-FPF	FFF-FFP	FFF-PPF	FFF-FPP	FFF-PPP
(0,00-0,10;0,10-0,20)	1,33	1,23	1,05	1,08	1,16	1,07	1,07	1,20	1,33	1,68	1,35	1,51	1,46
(0,00-0,10;0,20-0,30)	1,71	1,63	1,20	1,48	1,51	1,39	1,19	1,59	1,51	2,31	1,75	1,96	1,62
(0,00-0,10;0,30-0,40)	2,10	1,97	1,27	2,27	1,97	1,73	1,55	1,92	1,60	3,55	2,28	2,45	2,11
(0,00-0,10;0,40-0,50)	2,42	2,00	2,29	1,93	1,82	1,83	1,79	1,95	2,89	3,00	2,12	2,59	2,42
(0,00-0,10;0,50-0,60)	2,32	2,13	1,88	1,66	2,05	2,14	2,13	2,08	2,37	2,58	2,37	3,03	2,88

FFF: uso com floresta a mais de 70 anos; FPF: área ocupada nos últimos 25 anos por floresta, antecedida por um período de 25 anos por pastagem e anteriormente por floresta; PFF: uso com florestas nos últimos 50 anos e pastagem no período anterior a 1957; PPF: área ocupada nos últimos 25 anos com floresta, antecedida por pastagem; PPP: uso com pastagem a mais de 70 anos; FFP: uso com pastagem nos últimos 25 anos; e FPP: uso com pastagem nos últimos 25 anos.

Avaliando a dinâmica do C após desmatamento e uso com pastagem, na Amazônia, Cerri et al. (1996) observaram diminuição de 20 a 30 % no C total, nos primeiros anos após o desmatamento e queima, havendo recuperação progressiva; e, após 20 anos de uso com pastagem bem manejada, o COT ultrapassou os valores iniciais em 5 a 15 %. Os teores de COT do solo de sistemas nativos refletem o equilíbrio das entradas e saídas em determinado regime edafoclimático (Martins-Neto e Matsumoto, 2010), mas, isso não representa necessariamente o limite superior no ECOT (Six et al., 2002).

Outros estudos também relataram valores mais elevados de COT nos solos de floresta (Cardoso et al., 2010), em relação à pastagem, proporcionado pelo maior aporte global de matéria orgânica. Entretanto, os trabalhos encontrados na literatura, muitas vezes, são contraditórios em relação às diferenças entre os teores de C encontrados em solos de floresta e pastagens, pois esses dependem do estoque inicial e manejo adotado nas pastagens (Roscoe et al., 2000; Salimon et al., 2007).

Os resultados do presente estudo são discordantes dos observados por Guo e Gifford (2002), os quais, trabalhando com dados da literatura mundial relacionada ao ECOT e mudança de uso da terra, evidenciaram que a mudança de floresta para pastagem elevou o estoque de C em 8 %. Os teores de COT encontrados em pastagem podem ser próximos ou até superiores aos verificados em áreas de floresta, principalmente nas camadas mais superficiais; em profundidade, há tendência de aumento dos estoques de C nas áreas de floresta (Alves et al., 2008). Os altos valores de COT presentes nas pastagens não se relacionam à quantidade de material produzido, mas, sim, a MOS a ser degradada, como argumentado por Oliveira et al. (2008). Dessa forma, as pastagens que produzem materiais mais resistentes à degradação, como ligninas e polifenóis,

podem garantir maior permanência do COT em um sistema, em relação a outro.

Os menores valores de C observados na maioria das áreas de pastagens podem estar relacionados ao manejo inadequado ou à ocorrência de pastagens degradadas, o que reflete em menor quantidade de material vegetal no sistema. No Brasil, mais da metade das pastagens utilizadas para pecuária encontram-se em algum estágio de degradação, resultando em baixa produção de biomassa vegetal e resíduos orgânicos, refletindo em menores teores e estoques de COT (Carvalho et al., 2011).

Em revisão que incluiu mais de uma centena de estudos conduzidos em 17 países, Conant et al. (2001) relataram a importância do manejo da pastagem para o efetivo acúmulo de C, tanto com a utilização de fertilização como pelo uso de espécies produtivas; além disso, o manejo animal adequado foi indutor de aumento do sequestro de C do solo em até 0,3 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ de C. A alta intensidade de pastejo no sul do Brasil causou perdas de 1,0 Mg ha⁻¹ C e 52 kg ha⁻¹ N em três anos de integração lavoura pecuária, mesmo com a adição de fertilizantes (Souza et al., 2009).

De maneira geral, os teores de COT tenderam a diminuir em profundidade (Figura 5), padrão observado em vários trabalhos da literatura, o que é decorrente dos maiores aportes de MOS nas camadas superficiais. Em profundidade, foram verificados, na maioria dos casos, diminuição nos teores de COT; no intervalo entre 0,50 e 1,00 m, não foram constatadas diferenças entre os tratamentos, apresentando que os resíduos adicionados aos solos têm maior efeito nas camadas superficiais.

Estoque de carbono do solo

Os valores de ECOT variaram de 18,97 a 30,31 (Mg ha⁻¹ C), na camada superficial (0,00-0,10 m) (Figura 6). Os tratamentos FFF, PFF e PPF evidenciaram os maiores valores, quando

comparados aos demais. Os valores de ECOT na camada superficial do solo demonstraram-se superiores em comparação às camadas mais profundas, o que é concordante com o fato da maior deposição de resíduos na superfície do solo. Esse padrão é similar aos resultados obtidos por Cardoso et al. (2010), os quais avaliaram os ECOT em solos sob florestas nativas e pastagens do Bioma Pantanal. Outros autores verificaram valores iguais ou maiores sob áreas de pastagem (Pendell et al., 2006).

Até a camada de 1,00 m, o maior ECOT está nas áreas atualmente ocupadas por florestas, mesmo que no passado tenham sido utilizadas por pastagens (Figura 6). Essas áreas tenderam a novo equilíbrio, algumas vezes superiores às áreas que sempre foram utilizadas por florestas, resultado de fatores ambientais e antrópicos.

Em estudo realizado em Itabela, Bahia, avaliando o C estocado no solo em área de pastagem degradada e produtiva com diferentes idades de uso, comparativamente ao solo de floresta nativa, Costa et al. (2009) não observaram diferença significativa para os valores de ECOT, entre os ambientes de mata, pasto degradado e pasto produtivo, com idades de uso distintas, nas diferentes camadas de solo avaliadas.

Na camada de 0,10-0,20 m, observou-se diminuição nos valores de ECOT, chegando a 25 % de redução no tratamento FFF (Figura 6). Nessa camada de solo, foram verificadas diferenças entre

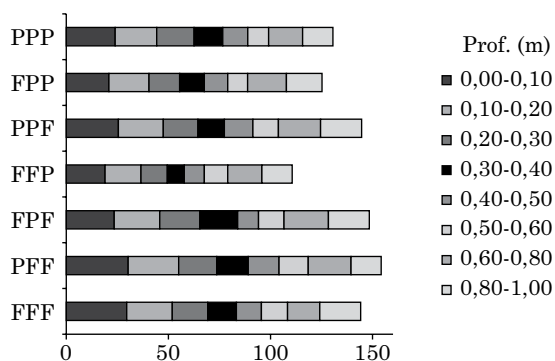


Figura 6. Estoque de carbono do solo (ECOT) nas sequências de uso do solo de FFF, PFF, FFP, FFP, PPF, FFP e PPP, em diferentes profundidades. FFF: uso com floresta a mais de 70 anos; FFP: área ocupada nos últimos 25 anos por floresta, antecedida por um período de 25 anos por pastagem e anteriormente por floresta; PFF: uso com florestas nos últimos 50 anos e pastagem no período anterior a 1957; PPF: área ocupada nos últimos 25 anos com floresta, antecedida por pastagem; PPP: uso com pastagem a mais de 70 anos; FFP: uso com pastagem nos últimos 25 anos; e FFP: uso com pastagem nos últimos 25 anos.

o tratamento PFF (24,71 Mg ha⁻¹ C), em comparação aos tratamentos FFP (17,64 Mg ha⁻¹ C) e FFP (19,56 Mg ha⁻¹ C). Na camada de 0,50-0,60 m, não foram observadas diferenças entre os tratamentos.

Nas camadas mais profundas, as sucessões FFF, FFP e PFF diferiram das PFF, PPP e FFP. Aumento no ECOT, em profundidade, em áreas de mata nativa e de pastagem, por causa da diferença na espessura das camadas de solo avaliadas também foi observado por Costa et al. (2009). As camadas mais superficiais do solo são mais suscetíveis às variações do ECOT, em razão da ação dos microrganismos decompositores da MOS, que atuam não somente na formação e estabilização de agregados, mas também na ciclagem de nutrientes (Silveira et al., 2006).

O estoque de C contribui de forma mais estável para o acúmulo desse no solo, nas camadas mais profundas, o que pode ser explicado pelo menor efeito dos fatores climáticos, pelas características intrínsecas do resíduo e pela menor perturbação do solo (Oliveira et al., 2008).

Quando se avaliou o ECOT até a profundidade de 1,0 m, observaram-se maiores valores no tratamento PFF, com 154 Mg ha⁻¹ C, superiores aos quantificados no tratamento FFF (148 Mg ha⁻¹ C) (Figura 6). Os menores valores foram notados no tratamento FFP, com 112 Mg ha⁻¹ C, até a profundidade de 1,0 m.

Razão de estratificação

Avaliando a razão de estratificação do ECOT 0,00-0,10:0,10-0,20, verificou-se que os sistemas FFP, FFP, PPP e FFP apresentaram os menores valores, e pode-se afirmar que nesses tratamentos ocorreu menor aporte de CO na camada superficial, em relação aos demais (Quadro 3).

Os maiores valores foram observados nos tratamentos FFF e PFF, que possuem mais C armazenado no solo de camadas de maior profundidade. Esse padrão pode ser resultado do maior aporte de serapilheira na camada superficial, em razão da ação da floresta, o que resulta em valores mais elevados nessa estratificação. A alta RE de C do solo reflete diretamente ao solo alta qualidade superficial, que leva à maior infiltração da água e rápida transmissão dessa no perfil do solo e maior estabilidade dos agregados (Franzluebbers, 2002; Sá e Lal, 2009).

Na RE do ECOT 0,00-0,10:0,50-0,60, as diferenças entre os tratamentos diminuem, continuando os maiores valores sendo observados em solos do tratamento FFF; e os menores, no tratamento FFP (Quadro 3). Os maiores valores do tratamento FFF em todas as camadas confirmam a maior conservação da qualidade física do solo.

O ΔECOT apresentou valores menores na camada superficial do tratamento PFF, demonstrando que entre os tratamentos esse é o que apresenta maior

sequestro de C. Em contrapartida, os tratamentos ultimamente utilizados com P apresentaram valores mais elevados, o que comprova as perdas de COT com a substituição do uso do solo, que podem apresentar, por exemplo, efeito em curto prazo nas emissões de CO_2 , podendo existir efeito combinado em curto e longo prazos. Em sistemas de manejo recentemente estabelecidos predominam os efeitos de curta duração; em sistemas de longa duração prevalecem os efeitos de alterações das propriedades do solo (Oliveros, 2008).

Abundância natural de ^{13}C

Quanto aos valores de $\delta^{13}\text{C}$, o tratamento FFF, representado pela floresta pouco alterada, cuja principal característica é de não ter sido convertida em outro uso, apresentou os menores valores de $\delta^{13}\text{C}$, sendo verificada variação de $-28,35\text{‰}$ (0,00-0,10 m) a $-26,20\text{‰}$ (0,60-0,80 m), demonstrando o predomínio de plantas C_3 (Figura 7). Esses valores estão próximos aos obtidos por Tarré et al. (2001), Balbinot (2009) e Pinheiro et al. (2010), em estudos também realizados na Floresta Atlântica, assim como os realizados em outros biomas brasileiros (Roscoe et al., 2000; Jantalia et al., 2007; Martinelli et al., 2009; Costa Júnior et al., 2011; Araújo et al., 2011).

A ocorrência de enriquecimento de $\delta^{13}\text{C}$ em profundidade em todos os tratamentos avaliados (Figura 7) foi observada, padrão também verificado por outros trabalhos (Salimon, 2003; Telles et al., 2003). Esse incremento em profundidade pode estar relacionado tanto com a migração e redeposição de partículas de argila que normalmente carregam maior valor de $\delta^{13}\text{C}$, resultando nos aumentos nos valores de $\delta^{13}\text{C}$ em profundidade, como as diferenças que ocorrem nas taxas de decomposição de resíduos orgânicos com diferentes assinaturas de $\delta^{13}\text{C}$, como celulose e hemicelulose, que são frequentemente 1-2 ‰ mais enriquecidos em $\delta^{13}\text{C}$, enquanto a lignina é 2-6 ‰ inferior em relação ao valor $\delta^{13}\text{C}$ do tecido total da planta (Liu et al., 2013). Um fator que pode contribuir nesse incremento dos valores em profundidade pode ser atribuído ao fato de o $\delta^{13}\text{C}$ de CO_2 diminuir entre 1-2 ‰ ao longo dos últimos 130 anos, como resultado da queima de combustíveis fósseis e mineralização (Liu et al., 2013).

O enriquecimento de $\delta^{13}\text{C}$ em profundidade se deve aos seguintes fatores: à decomposição de substratos orgânicos que poderia envolver um efeito isotópico normal, dessa forma, os produtos microbianos tornar-se-iam mais enriquecidos em $\delta^{13}\text{C}$ em comparação aos substratos; à ocorrência de pequenas variações inter e intramoleculares de $\delta^{13}\text{C}$ nas plantas e nos organismos; às variações climáticas globais e locais, onde os valores $\delta^{13}\text{C}$ estão sendo modificados no tempo; MOS mais antiga é mais enriquecida com $\delta^{13}\text{C}$; e à tendência de os valores de $\delta^{13}\text{C}$ aumentarem na humificação (Ballesdent et al., 1987).

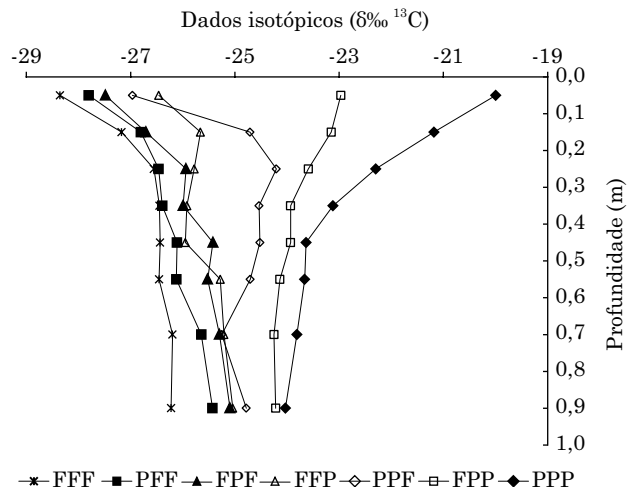


Figura 7. Abundância natural de ^{13}C no solo sob os diferentes tratamentos de uso de floresta e pastagem, nos tratamentos FFF, PFF, PPF, FFP, PPF, FFP e PPP, até 1 m de profundidade. FFF: uso com floresta a mais de 70 anos; FFP: área ocupada nos últimos 25 anos por floresta, antecedida por um período de 25 anos por pastagem e anteriormente por floresta; PFF: uso com florestas nos últimos 50 anos e pastagem no período anterior a 1957; PPF: área ocupada nos últimos 25 anos com floresta, antecedida por pastagem; PPP: uso com pastagem a mais de 70 anos; FFP: uso com pastagem nos últimos 25 anos; e FPP: uso com pastagem nos últimos 25 anos.

Nos demais tratamentos (PFF, PPF, FPF, FFP, FPP e PPP), a MOS é composta por dois tipos de resíduos de material vegetal; as plantas com rota metabólica C_3 , que apresentam valor de $\delta^{13}\text{C}$ entre -21 e -35‰ , e as plantas C_4 , que tem valores entre -9 e -17‰ (Martinelli et al., 1998).

Quando comparadas as áreas de floresta (FFF) e pastagem (PPP), observou-se a influência da mudança na cobertura vegetal predominante C_3 para gramínea C_4 , sendo os valores de $\delta^{13}\text{C}$ da área de pastagem maiores em comparação à área de floresta (Figura 7). O incremento foi mais pronunciado na camada superficial $8,36\text{‰}$, mas também detectável nas camadas mais profundas, chegando a $2,19\text{‰}$ na de $0,80$ - $1,00$ m. Estudando solos sob Cerrado e Floresta amazônica, também observou resultados de enriquecimento de $\delta^{13}\text{C}$ do solo em profundidade de camadas (Nardoto, 2005).

No tratamento PPP, onde ocorreu a utilização contínua com pastagem em período superior a 50 anos, a composição do C proveniente da floresta é de 48% na camada superficial, 60% na camada de $0,10$ - $0,20$ m, percentual que vai aumentando em profundidade, alcançando 84% na camada mais profunda (Quadro 4). Diferindo desse padrão,

Jantalia et al. (2007), avaliando a influência de diferentes sistemas de uso e manejo do solo, com 12 anos de implantação em Latossolo Vermelho em Planaltina, DF, não observaram diferenças estatísticas entre os tratamentos em comparação à área de Cerrado, para os valores de $\delta^{13}\text{C}$. Em estudo com um Latossolo Amarelo no Amazonas, Bonde et al. (1992) verificaram que o C da pastagem correspondeu a 11,4; 21,4; e 34,6 % do COT. Esses valores indicam que houve diminuição de 3,2; 22,6; e 20,0 % do teor de C remanescente da floresta após 4, 10 e 15 anos de implantação das pastagens e que são inferiores aos encontrados por Cerri (1989), que constatou diminuição de 38 e 42,5 % em pastagens com dois e oito anos, respectivamente.

Para os tratamentos PFF, FPF e FFP, onde foi observado apenas um período curto de uso com pastagem, não foram verificadas diferenças entre as combinações em todas as profundidades (Figura 7). Nas áreas PFF, compostas nos últimos 50 anos por florestas e por um período anterior com pastagem, não foi verificada diferença na assinatura $\delta^{13}\text{C}$, e o mesmo padrão foi observado com a combinação FPF, composto por um período final de 25 anos com floresta, antecedido por um período de 25 anos de pastagem e anteriormente área de floresta.

Esses resultados indicam que períodos de 25 anos cultivados com pastagem, intercalados com áreas de floresta, não são suficientes para refletir diferenças significativas na assinatura do $\delta^{13}\text{C}$, principalmente em razão da presença do C antigo da floresta. Essa maior permanência do C do solo proveniente da floresta pode ser em razão da menor taxa de perda de C remanescente da floresta, relacionada aos atributos físicos do solo como a textura e estrutura, como também por causa da reduzida taxa de decomposição da MOS, provavelmente em razão da atuação

ineficiente dos microrganismos no processo de decomposição, que depende de condições adequadas.

Esses resultados demonstram que são necessários longos períodos de uso sob pastagem para se observarem diferenças significativas, principalmente quando esse cultivo estiver intercalado entre longos períodos com cultivos de plantas de C_3 .

Para o tratamento FFP, composto nos últimos 25 anos de pastagem e anteriormente ocupado por um longo período com florestas, pode-se inferir que houve incorporação de C novo da pastagem até a camada de 0,20 m, alcançando 12 e 10 % nas camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente, de C proveniente de plantas C_4 ; nas demais profundidades o enriquecimento foi insignificante.

Em um Argissolo Amarelo da região amazônica, em ambientes de pastagens com 3; 5; 20; e 81 anos de uso, cultivadas nos últimos anos com *B. brizantha* (Höchst) Stapf braquiário, Neill et al. (1996) encontraram contribuições relativas de C derivado de gramíneas de 13; 22; 44; e 63 %, respectivamente. Entretanto, nas áreas de pastagens de *P. maximum* Jacq cv. *Colonião*, com 13 e 41 anos de uso, os valores encontrados foram 42 e 31 %, respectivamente, o que sugere que nem sempre com os anos de uso ocorrem aumentos na quantidade de C proveniente da pastagem.

Os solos de áreas experimentais com pastos de *B. humidicola*, bem manejados, com 1, 7 e 10 anos de uso apresentaram incremento médio de C derivado da gramínea da ordem de 7, 27 e 30 %, respectivamente, até a profundidade de 0,30 m (Tarré et al., 2001). Entretanto, quando os mesmos experimentos foram conduzidos a partir de pastagens mal formadas e improdutivas com a mesma gramínea, com 12 anos de uso anterior, os valores registrados após 1, 7 e 10 anos de experimento foram de 12, 30 e 34 %, respectivamente, concluindo-se

Quadro 4. Percentual de carbono proveniente de floresta (F) e pastagem (P), em diferentes profundidades, para os tratamentos FFF, PFF, FPF, FFP, PPF, FPP e PPP

Prof.	FFF		PFF		FPF		FFP		PPF		FPP		PPP	
	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P
m	%													
0,00-0,10	100	0	97	3	95	5	88	12	91	9	66	34	48	52
0,10-0,20	100	0	98	2	97	3	90	10	83	17	73	27	60	40
0,20-0,30	100	0	99	1	96	4	95	5	84	16	79	21	70	30
0,30-0,40	100	0	100	0	97	3	96	4	86	14	82	18	76	24
0,40-0,50	100	0	98	2	93	7	97	3	86	14	82	18	80	20
0,50-0,60	100	0	98	2	93	7	92	8	88	12	84	16	80	20
0,60-0,80	100	0	96	4	94	6	93	7	93	7	86	14	83	17
0,80-1,00	100	0	94	6	92	8	92	8	90	10	86	14	84	16

FFF: uso com floresta a mais de 70 anos; FPF: área ocupada nos últimos 25 anos por floresta, antecedida por um período de 25 anos por pastagem e anteriormente por floresta; PFF: uso com florestas nos últimos 50 anos e pastagem no período anterior a 1957; PPF: área ocupada nos últimos 25 anos com floresta, antecedida por pastagem; PPP: uso com pastagem a mais de 70 anos; FFP: uso com pastagem nos últimos 25 anos; e FPP: uso com pastagem nos últimos 25 anos.

que o maior incremento de C está relacionado tanto com o tempo de uso com gramíneas quanto com a diferença entre as espécies utilizadas.

Em áreas com remanescentes de Floresta Atlântica, pastos produtivos com 2, 9 e 18 anos de uso e pasto mal manejado com 18 anos, em um Argissolo Amarelo, Costa et al. (2009) observaram que após 28 anos de uso com pastagem bem e mal manejada, em média, 62 % do C orgânico do solo ainda era derivado da floresta original, que foi relacionado tanto com a maior humificação da MOS remanescente da floresta quanto com a maior proteção dela em relação à MOS proveniente do pasto. Nesse caso, o aporte constante de material orgânico de melhor qualidade e ciclagem mais rápida do pasto bem manejado fez com que esse fosse preferencialmente degradado pelos microrganismos.

Em área de Floresta Densa e pastagem de *B. brizantha* (*braquiarião*) de 20 anos em Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico, Araújo et al. (2011) verificaram que a porcentagem de C derivado de pastagem foi expressiva na camada superficial do sistema com 20 anos de uso, com proporções que chegaram a 70 % do C total. Avaliando a origem da matéria orgânica em solos de uma planície aluvial do Quaternário (Cambissolos e Gleissolos), Manfrinato et al. (2002) observaram que, após 20 anos de uso com pastagens, 70 % do C orgânico do solo ainda era derivado da floresta original, sendo essa ocorrência explicada pelo manejo utilizado na conversão da mata para a pastagem.

Estudando a abundância natural de $\delta^{13}\text{C}$ do solo em uma área cultivada há nove anos sob lavoura seguida de 20 anos sob pastagem, comparando-a a uma vegetação nativa no Bioma Cerrado, em Latossolo Vermelho Distrófico em Rio Verde, GO, Costa Júnior et al. (2011) verificaram com auxílio das análises isotópicas que houve substituição de 83 % do C original durante os 29 anos de cultivo. O constante aporte de resíduos vegetais, assim como a manutenção do C no interior dos macro e mesoagregados, é importante fator para que ocorra o acúmulo de C nesse tipo de solo.

O tratamento PPF, representado por áreas que nos últimos 25 anos foram compostas por floresta, precedidas por um longo período de pastagem, apresentou diferenças em relação à FFF nas profundidades entre 0,10 e 0,60 m, evidenciando valores mais enriquecidos, o que demonstra remanescente de C proveniente da pastagem; mesmo essas áreas estando ocupadas por florestas nos últimos anos. Na camada de 0,10-0,20 m, 17 % do C é proveniente de P (Quadro 4); na de 0,00-0,10 m, observou-se a introdução de C proveniente da Floresta.

Para o tratamento FPP, composto por área de pastagem nos últimos 50 anos, foram observadas diferenças em relação aos tratamentos FFF, PFF, FPF, FPP em todas as profundidades, com 34 % do C

relacionado com plantas C_4 na camada de 0,00-0,10 m, chegando a 14 % na de 0,80-1,00 m. Quando os ciclos sob pastagem são contínuos e por períodos mais elevados, como 50 anos, as contribuições de C proveniente de pastagem são mais pronunciadas, inclusive nas camadas mais profundas.

A análise da abundância isotópica do C no solo tem se evidenciado importante ferramenta para detectar diferentes isótopos de C provenientes de floresta e de pastagens na mesma área (Tarré et al., 2001). Entretanto, apenas o tempo de uso das terras com pastagem não pode ser considerado como a única característica responsável pelo incremento de C derivado de gramínea aos solos. O tipo de manejo e o de gramínea utilizados, bem como as características ligadas ao ambiente, também devem ser considerados.

Análise de componentes principais

Por meio da ACP realizada nas oito profundidades, verificou-se que o modelo explica mais de 75 % dos resultados encontrados (Figura 8). Na camada superficial, são observadas as maiores correlações entre as variáveis, principalmente entre COT e ECOT (covariantes), como Ds e abundância natural de ^{13}C . Nas camadas inferiores a 0,10 m, a Ds não se relacionou com ECOT.

Na camada de 0,00-0,10 m (Figura 8a), a CP F1 modelou 66 % da informação associada às variáveis, enquanto a F2 explicou mais 26 % da informação. A correlação entre a CP F1 foi forte e positiva com a COT (0,892) e ECOT (0,867) e negativa para Ds (-0,792) e $\delta^{13}\text{C}$ (-0,693). A CP F2 apresentou maior correlação com $\delta^{13}\text{C}$ (0,633).

A maior parte da variância da matriz de dados é explicada pelas CP F1 e F2, cujo menor valor foi observado na camada de 0,50-0,60 m, explicando 76,52 % de toda variação (Figura 8f), chegando a 93,16 % na camada de 0,10-0,20 m (Figura 8b).

As variáveis COT e ECOT estão fortemente correlacionadas entre si em todas as camadas avaliadas, mas são independentes das variáveis Ds, exceto na camada 0,20-0,30 m, e $\delta^{13}\text{C}$. Ds e $\delta^{13}\text{C}$ apresentam correlação nas camadas superficiais até a profundidade de 0,20 m.

Pela análise da dispersão dos pontos no gráfico dos escores das CP, em razão das combinações de uso da terra, verificou-se que existem áreas com maiores teores de COT nas diferentes combinações, assim como algumas áreas se correlacionam mais fortemente com a $\delta^{13}\text{C}$. Os pontos do tratamento PPP apresentaram-se mais separados quando comparados aos demais tratamentos, ao contrário dos relacionados à floresta, que se evidenciaram mais concentrados.

Esse padrão inversamente proporcional entre COT e Ds demonstrou que à medida que os teores de COT aumentam no sistema, os valores de Ds

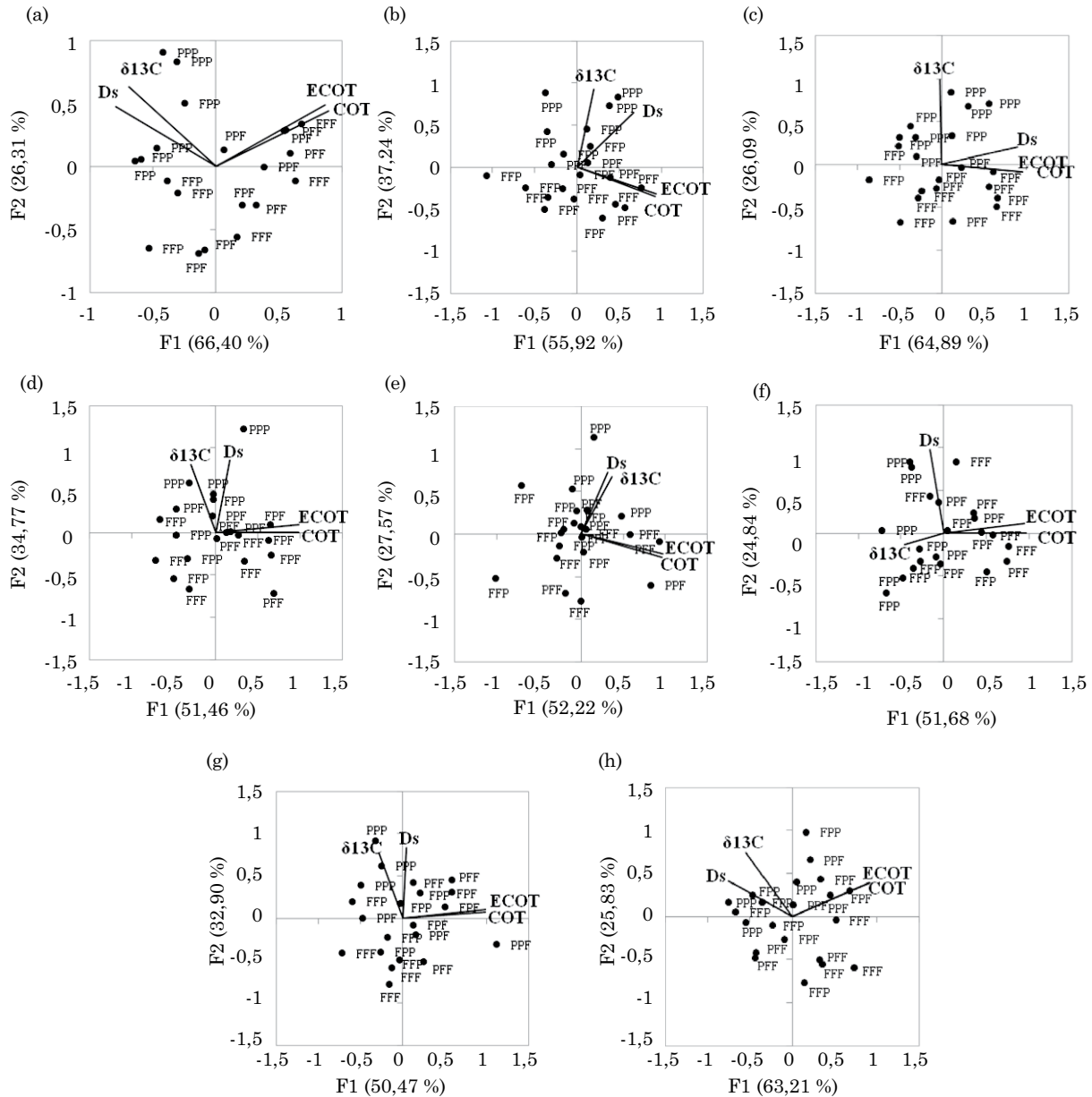


Figura 8. Gráfico *biplot* bidimensional da ACP para carbono orgânico total (COT), estoque de carbono (ECOT), densidade do solo (Ds) e abundância isotópica de ^{13}C ($\delta^{13}C$). F1 (componente principal 1) e F2 (componente principal 2). Nas camadas 0,00-0,10 m (a), 0,10-0,20 m (b), 0,20-0,30 m (c), 0,30-0,40 m (d), 0,40-0,50 m (e), 0,50-0,60 m (f), 0,60-0,80 m (g) e 0,80-1,00 m (h), para os tratamentos FFF, PFF, FFP, FFP, PFF, FFP e PPP. FFF: uso com floresta a mais de 70 anos; FFP: área ocupada nos últimos 25 anos por floresta, antecedida por um período de 25 anos por pastagem e anteriormente por floresta; PFF: uso com florestas nos últimos 50 anos e pastagem no período anterior a 1957; PFF: área ocupada nos últimos 25 anos com floresta, antecedida por pastagem; PPP: uso com pastagem a mais de 70 anos; FFP: uso com pastagem nos últimos 25 anos; FFP: uso com pastagem nos últimos 25 anos.

tendem a diminuir, possivelmente por influência dos constituintes orgânicos na estruturação e agregação do solo. Os valores mais elevados de Ds encontrados nas camadas mais profundas podem ser explicados pela redução nos teores de MO em profundidade; tal aporte de MO pode diminuir os valores de Ds em razão do tempo (Pires et al., 2011).

Como a $\delta^{13}C$ é com base na qualidade do C introduzido no sistema (C_3 e C_4) e não pela quantidade de COT, este teve pouca influência na CP F1 e, dessa forma, é mais bem explicada pela CP F2, sendo um componente exclusivamente influenciado por essa variável. Os autovetores apresentaram orientação semelhante ao verificado na camada de 0,80-1,00 m

(Figura 8h), porém nessa camada, a dispersão deles ocorre de forma distinta, não sendo observada diferença em relação ao tratamento PPP. O tratamento FFF é mais bem explicado pela F1, compondo 22 % das contribuições observadas na F1, enquanto o tratamento PPP é mais bem explicado no F2, correspondendo a 38 % das contribuições. Nessa camada, foi observada a maior dispersão dos autovalores.

Na camada de 0,10-0,20 m (Figura 8b), a distribuição dos autovalores se assemelha com a observada na de 0,40-0,50 m (Figura 8e), significando que nessa camada as variações ocorridas entre os tratamentos são explicadas pela variável COT.

Na camada de 0,20-0,30 m (Figura 8c), observou-se forte correlação entre as variáveis COT, ECOT e Ds. A $\delta^{13}\text{C}$ apresentou correlação forte com F2 (0,972), contribuindo com 94 % das observações dessa CP.

Na profundidade 0,30-0,40 m (Figura 8d), o CP F1 explicou 51 % da variância dos dados, e o CP F2 discriminou 35 % da variância presente. Os resultados indicaram que as amostras de solos coletados no tratamento FPF posicionaram-se ao longo de escores positivos do eixo CP F1, evidenciando que nessa profundidade esse tratamento é fortemente influenciado pelo COT. O tratamento PPP é explicado na CP F2, apresentando que a Ds não é modificada pelo sistema de uso, como também é observado nas profundidades de 0,50-0,60 m (Figura 8f) e 0,60-0,80 m (Figura 8g).

Dessa forma, os resultados de ACP apresentaram aspectos distintos em razão do uso da terra nas diferentes profundidades, sendo mais discriminatório na camada superficial de 0,00-0,10 m e nas camadas mais profundas, a partir dos 0,50 m. Entre os atributos avaliados, o ECOT foi o que melhor discriminou as alterações avaliadas, onde são perceptíveis os menores teores de ECOT, em áreas atualmente utilizadas por pastagem, e maiores teores, em florestas.

A variância contida em cada CP gerada, na camada de 0,00-1,00 m, que é expressa pelos autovalores da matriz padronizada, associados ao eixo F1 e F2. As variáveis são representadas por setas, que indicam a direção do gradiente máximo, em que o comprimento da seta é proporcional à correlação da variável com os eixos e à sua importância na explicação da variância projetada em cada eixo (Theodoro et al., 2003). Nesse sentido, destacam-se, para correlação com o eixo F1, as variáveis relacionadas com a COT; ECOT apresentaram autovetores positivos. No eixo F2, as variáveis ^{13}C e Ds apresentaram autovetores positivos.

O posicionamento das áreas em relação aos F1 e F2 reflete a contribuição individual de cada variável para definir o valor de cada componente. Dessa forma, o COT e ECOT, que ocupam posições no plano F1, são influenciados entre si, visto que esses ocupam as mesmas posições no plano do círculo das correlações (Figura 9).

As maiores correlações observadas (Quadro 5) foram fortes e positivas entre ECOT e COT, e entre Ds e $\delta^{13}\text{C}$. As demais correlações foram fracas e negativas. A regressão linear múltipla evidenciou que as variáveis que explicam o ECOT são o COT e a Ds, pois apresentaram significância $\leq 0,05$. A variável apresenta maior poder de explicação é o COT, considerando os maiores valores da estatística t (24,57) e beta padronizado 1,012. Pelo valor do R^2 , observou-se que as variáveis independentes explicam 97,6 % da variação da variável dependente (ECOT). O erro-padrão residual evidenciou que os valores observados estão variando em média 1,67 % em torno dos valores previstos, sendo dessa forma considerado um modelo adequado para o estudo.

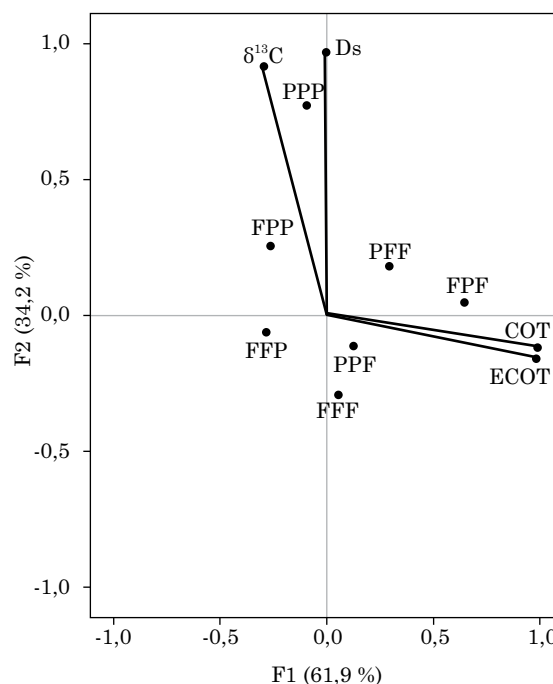


Figura 9. Gráfico *biplot* bidimensional da ACP para o valor médio na camada de 0,00-1,00 m para carbono orgânico total (COT), densidade do solo (Ds) e abundância isotópica de ^{13}C ($\delta^{13}\text{C}$), e soma da camada 0,00-1,00 m para o estoque de carbono (ECOT). F1 (componente principal 1) e F2 (componente principal 2), para os tratamentos FFF, PFF, FPF, FFP, PPF, FPP e PPP. FFF: uso com floresta a mais de 70 anos; FPF: área ocupada nos últimos 25 anos por floresta, antecedida por um período de 25 anos por pastagem e anteriormente por floresta; PPF: uso com florestas nos últimos 50 anos e pastagem no período anterior a 1957; PPF: área ocupada nos últimos 25 anos com floresta, antecedida por pastagem; PPP: uso com pastagem a mais de 70 anos; FFP: uso com pastagem nos últimos 25 anos; e FPP: uso com pastagem nos últimos 25 anos.

Quadro 5. Correlação de Pearson entre as variáveis $\delta^{13}\text{C}$, densidade do solo (Ds), carbono orgânico total (COT) e estoque de carbono (ECOT)

	$\delta^{13}\text{C}$	Ds	COT	ECOT
$\delta^{13}\text{C}$	1,000	0,821	-0,396	-0,410
Ds	0,821	1,000	-0,119	-0,177
COT	-0,396	-0,119	1,000	0,986
ECOT	-0,410	-0,177	0,986	1,000

CONCLUSÕES

Áreas atualmente utilizadas com floresta apresentaram maiores teores de COT, quando comparadas com as de pastagem.

Maiores reduções do ECOT do solo ocorreram na camada superficial das áreas atualmente utilizadas por pastagens, o que pode ser decorrente do manejo inadequado adotado. O maior armazenamento de COT ocorreu nas áreas atualmente ocupadas por florestas, mesmo que no passado tenham sido utilizadas por pastagens. Áreas de floresta secundária tenderam a um novo equilíbrio, algumas vezes, com ECOT superiores aos das áreas de florestas primárias.

A razão de estratificação indicou menor aporte de COT na camada superficial dos tratamentos FPF, FPP, PPP e FFF, assim como o tratamento PFF apresentou maior sequestro de C.

As análises de $\delta^{13}\text{C}$ demonstraram que a conversão da floresta em pastagem e pastagem em floresta contribuiu para mudanças nas proporções de C originado da floresta e do adicionado pelo pasto, tanto em profundidade como em relação aos diferentes tempos de uso do solo. Entretanto, essa conversão do C é um processo lento, dado que foi verificado, em pastagens com 50 anos de uso, que 66 % do COT na camada superficial do solo ainda são derivados da floresta original.

Os resultados de ACP apresentaram aspectos distintos, em razão do uso da terra, para as diferentes profundidades, sendo mais discriminatório na camada superficial e nas camadas mais profundas. Entre os atributos avaliados, o ECOT melhor discriminou as alterações avaliadas, sendo perceptíveis os menores valores de ECOT em áreas atualmente utilizadas por pastagem e o maior armazenamento de C na área sob uso contínuo com floresta.

REFERÊNCIAS

Alves BJR, Urquiaga S, Jantalia CP, Boddey RM. Dinâmica do carbono em solos sob pastagem. In: Santos GA, Silva LS, Canellas LP, Camargo FAO, editores. Fundamentos da matéria orgânica

do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais. 2ª. ed. Porto Alegre: Metrópole; 2008. p.561-9.

Araújo E, Ker JC, Mendonça ES, Silva IR, Oliveira EK. Impacto da conversão floresta - pastagem nos estoques e na dinâmica do carbono e substâncias húmicas do solo no bioma amazônico. Acta Amaz. 2011;41:103-14.

Assistat Versão 7.6 beta. 2011. [Acessado em 06 jun. 2014]. Disponível em: <http://www.assistat.com/indexp.html>.

Balbinot R. Carbono, nitrogênio e razões isotópicas $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ no solo e vegetação de estágios sucessionais de Floresta Ombrófila Densa Submontana [tese]. Curitiba: Universidade Federal do Paraná; 2009.

Baltesdent J, Mariotti A, Guillet B. Natural abundance as a tracer for studies of Soil organic-matter dynamics. Soil Biol Biochem. 1987;19:25-30.

Bernoux M, Arrrouayas D, Volkoff B, Jolivet C. Bulk densities of Brazilian Amazon soils related to other soil properties. Soil Sci Soc Am J. 1998;62:743-9.

Bonde TA, Christensen BT, Cerri CC. Dynamics of soil organic matter as reflected by natural ^{13}C abundance in particle size fractions of forested and cultivated Oxisols. Soil Biol Biochem. 1992;24:275-7.

Cantarutti RB, Nascimento Jr D, Costa OV. Impacto animal sobre o solo: compactação e reciclagem de nutrientes. In: Mattos WRS, editor. A produção animal na visão dos brasileiros. Piracicaba: FEALQ; 2001. p.826-37.

Cardoso EL, Silva MLN, Silva CA, Curi N, Freitas DAF. Estoques de carbono em solos sob florestas nativas e pastagens do bioma Pantanal. Pesq Agropec Bras. 2010;9:1028-35.

Carvalho AJ, Carneiro JES, Ferreira LR, Cecon PR, Santos MV. Efeito da época de semeadura de *Brachiaria decumbens* e de dessecantes em pré-colheita sobre o rendimento de grãos do feijoeiro e a biomassa forrageira em cultivo consorciado. Ci Agrotec. 2011;35:893-9.

Carvalho JLN, Cerri CEP, Feigl BJ, Picollo MC, Godinho VP, Cerri CC. Carbon sequestration in agricultural soils in the Cerrado region of the Brazilian Amazon. Soil Till Res. 2009;103:342-9.

Cerri CC, Bernoux M, Volkoff B, Moraes JL. Dinâmica do carbono nos solos da Amazônia. In: Alvarez V VH, Fontes LEF, Fontes MPF, editores. Os solos nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentável. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; 1996. p.61-9.

Cerri CC. Dinâmica da matéria orgânica em solos de pastagens. In: Anais do Simpósio sobre Ecossistemas de Pastagens; 1989; Jaboticabal. Jaboticabal: FUNEP/UNESP; 1989. p.135-47.

Conant RT, Paustian K, Elliott ET. Grassland management and conversion into grassland: effects on soil carbon. Ecol Appl. 2001;11:343-55.

Costa Júnior C, Piccolo MC, Siqueira Neto M, Camargo PB, Cerri CC, Bernoux M. Carbono total e ^{13}C em agregados do solo sob vegetação nativa e pastagem no bioma cerrado. R Bras Ci Solo. 2011;35:1241-52.

Costa OV, Cantarutti RB, Fontes LEF, Costa LM, Nacif PGS, Farias JC. Estoque de carbono do solo sob pastagem em área de Tabuleiro Costeiro no sul da Bahia. R Bras Ci Solo. 2009;33:1137-45.

- Desjardins T, Andreux F, Volkoff B, Cerri CC. Organic carbon and ¹³C contents in soils and soil size-fractions, and their changes due to deforestation and pasture installation in eastern Amazonia. *Geoderma*. 1994;61:103-18.
- Ellert BH, Bettany JR. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. *Can J Soil Sci*. 1995;75:529-38.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado de Santa Catarina [CD-ROM]. Rio de Janeiro: 1998.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise do solo. 2ª. ed. Rio de Janeiro: 1997.
- Franzluubbers AJ. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil Till Res*. 2002;66:95-106.
- Frazão LA, Piccolo MC, Fiegl BJ, Cerri CC, Cerri CEP. Propriedades químicas de um Neossolo Quartzarênico sob diferentes sistemas de manejo no Cerrado mato-grossense. *Pesq Agropec Bras*. 2008;43:641-8.
- Freitas IC, Santos FCV, Custodio Filho RO, Silva NR, Correchel V. Resistência à penetração em Neossolo Quartzarênico submetido a diferentes formas de manejo. *R Bras Eng Agric Amb*. 2012;16:1275-81.
- Fundação do Meio Ambiente - Fatma. Atlas da cobertura vegetal de Santa Catarina. [Acessado em 6 mar. 2014]. Disponível em: <http://www.fatma.sc.gov.br/conteudo/atlas-da-cobertura-vegetal-de-santa-catarina>.
- Fundação SOS Mata Atlântica/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. Atlas dos Remanescentes Florestais da Mata Atlântica: período 2011-2012. [Acessado em 21 jul. 2014]. Disponível em: http://www.sosma.org.br/link/atlas2011-12/ATLAS_apresentacao_2011_2012_COLETIVA.pdf.
- Gabinete de Planejamento e Coordenação Geral de Santa Catarina - Gaplan. Atlas de Santa Catarina. Rio de Janeiro: Aerofoto Cruzeiro; 1986.
- Gabriel KR. The biplot graphic display of matrices with application to principal component analysis. *Biometrika*. 1971;58:453-67. [Acessado em 20 jul. 2014]. Disponível em: <http://biomet.oxfordjournals.org/content/58/3/453.abstract>.
- Guo LB, Gifford RM. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Global Change Biol*. 2002;8:345-60.
- Jantalia CP, Resck DVS, Alves BJR, Zotarelli L, Urquiaga S, Boddey RM. Tillage effect on C stocks of a clayey Oxisol under a soybean-based crop rotation in the Brazilian Cerrado. *Soil Till Res*. 2007;95:97-109.
- Koutika LS, Choné Th, Andreux F, Cerri CC. Carbon decomposition of the topsoils and soil fractions under forest and pasture in the western Brazilian Amazon basin, Rondônia. *Biol Fertil Soils*. 2000;30:284-7.
- Liu N, Gallino R, Bisterzo S, Davis AM, Savina MR, Pellin MJ. The ¹³C-pocket structure in AGB models: Constraints from zirconium isotope abundances in single mainstream sic grains. *Astrophys J*. 2013;788:163.
- Manfrinato W, Piccolo MC, Cerri CC, Bernoux M, Cerri CEP. Monitoring carbon stocks in soil of a forest-pasture chronosequence and determining its origin with isotope technology in Guaraqueçaba (PR). In: Proceedings of the International Symposium on Forest Carbon Sequestration and Monitoring; 2002; Taiwan. Taiwan: Taiwan Forest Research Institute; 2002. p.1-10.
- Marchão RL, Balbino LC, Silva EM, Santos Jr JDG, Sá MAC, Vilela L, Becquer T. Qualidade física de um Latossolo Vermelho sob sistemas de integração lavoura-pecuária no Cerrado. *Pesq Agropec Bras*. 2007;42:873-82.
- Martinelli LA, Ometto JPHB, Ferraz ESB, Victoria RL, Camargo PB, Moreira MZ. Desvendando questões ambientais com isótopos estáveis. São Paulo: Oficina de Textos; 2009.
- Martinelli LA, Almeida S, Brown IF, Moreira MZ, Victoria RL, Sternberg LSL, Ferreira CAC, Thomas WW. Stable carbon isotope ratio of tree leaves, boles and fine litter in a Tropical Forest in Rondônia, Brazil. *Oecologia*. 1998;114:170-9.
- Martins-Neto FL, Matsumoto SN. Qualidade do solo e nutrição de plantas em sistemas de produção de café (*Coffea arabica* L.). *Coffee Sci*. 2010;5:206-13.
- Melo AWF. Avaliação do estoque e composição isotópica do carbono do solo do Acre [dissertação]. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"; 2003.
- Nardoto GB. Abundância natural de ¹⁵N na Amazônia e Cerrado - implicações para a ciclagem de nitrogênio [tese]. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"; 2005.
- Neill C, Fry B, Melillo J, Steudler P, Moraes FL, Cerri CC. Forest-and pasture-derived carbon contributions to carbon stocks and microbial respiration of tropical pasture soils. *Oecologia*. 1996;107:113-9.
- Oliveira JT, Moreau AMSS, Paiva AQ, Menezes AA, Costa OV. Características físicas e carbono orgânico de solos sob diferentes tipos de uso da terra. *R Bras Ci Solo*. 2008;32:2821-9.
- Oliveros CFL. Emissões de CO₂ do solo sob preparo convencional e plantio direto em Latossolo Vermelho do Rio Grande do Sul [dissertação]. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria; 2008.
- Pendell DL, Williams JR, Rice CW, Nelson RG, Boyles SB. Economic feasibility of no-tillage and manure for soil carbon sequestration in corn production. *J Environ Qual*. 2006;35:1364-73.
- Pinheiro EFM, Lima E, Ceddia MB, Urquiaga S, Alves BJR, Boddey RM. Impact of pre-harvest burning *versus* trash conservation on soil carbon and nitrogen stocks on a sugarcane plantation in the Brazilian Atlantic forest region. *Plant Soil*. 2010;333:71-80.
- Pires LF, Rosa JA, Timm LC. Comparação de métodos de média da densidade do solo. *Acta Scient Agron*. 2011;33:161-70.
- Roscoe R, Buurman P, Velthorst EJ, Pereira JAA. Effects of fire on soil organic matter in a "cerrado sensu-stricto" from Southeast Brazil as revealed by changes in δ¹³C. *Geoderma*. 2000;95:141-60.
- Sá JCM, Lal R. Stratification ratio of soil organic matter pools as an indicator of carbon sequestration in a tillage chronosequence on a Brazilian Oxisol. *Soil Till Res*. 2009;103:46-56.
- Salimon CI, Wadt PGS, Melo AWF. Dinâmica do carbono na conversão de florestas para pastagens em Argissolos da Formação Geológica Solimões, no Sudoeste da Amazônia. *R Biol Ci Terra*. 2007;7:29-38.

- Salimon CI. Respiração do solo sob florestas e pastagens na Amazônia Sul-Occidental, Acre [tese]. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz; 2003.
- Silva CA, Anderson SJ, Vale FR. Carbono, nitrogênio e enxofre em frações granulométricas de dois Latossolos submetidos à calagem e adubação fosfatada. R Bras Ci Solo. 1999;23:593-602.
- Silva EC, Muraoka T, Buzetti S, Veloso MEC, Trivelin PCO. Aproveitamento do nitrogênio (¹⁵N) da crotalaria e do milho pelo milho sob plantio direto em Latossolo Vermelho de Cerrado. Ci Rural. 2006;36:739-46.
- Silveira RB, Melloni R, Melloni EGP. Atributos microbiológicos e bioquímicos como indicadores da recuperação de áreas degradadas, em Itajubá/MG. Cerne. 2006;12:48-55.
- Sisti CPJ, Santos HP, Kohhann R, Alves BJR, Urquiaga S, Boddey RM. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. Soil Till Res. 2004;76:39-58.
- Six J, Conant RT, Paul EA, Paustian K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. Plant Soil. 2002;241:155-76.
- Smith BN, Epstein S. Two categories of ¹³C/¹²C ratios for higher plants. Plant Physiol. 1971;47:380-4.
- Souza ED, Costa SEVGA, Anghinoni I, Carvalho PCF, Andriqueti M, Cao E. Estoques de carbono orgânico e de nitrogênio no solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto, submetido a intensidades de pastejo. R Bras Ci Solo. 2009;33:1829-36.
- Tarré R, Macedo R, Cantarutti RB, Rezende CP, Pereira JM, Ferreira E, Alves BJR, Urquiaga S, Boddey RM. 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 Soil. 2001;234:15-26.
- Telles EDC, Camargo PB, Martinelli LA, Trumbore SE, Costa ES, Santos J, Higuchi N, Oliveira Jr RC. Influence of soil texture on carbon dynamics and storage potential in tropical forest soils of Amazonia. Global Biogeochem Cycles. 2003;17:1040.
- Theodoro VCA, Alvarenga MIN, Guimarães RJ, Souza CAS. Alterações químicas em solo submetido a diferentes formas de manejo do cafeeiro. R Bras Ci Solo. 2003;27:1039-47.
- Veldkamp E. Organic carbon turnover in three tropical soils under pasture after deforestation. Soil Sci Soc Am J. 1994;58:175-80.
- Vibrans AC, Sevegnani L, Uhlmann A, Schorn LA, Sobral M, Gasper AL, Lingner DV, Brogni E, Klemz G, Godoy MB, Verdi M. Structure of mixed ombrophylous forests with *Araucaria angustifolia* (Araucariaceae) under external stress in Southern Brazil. R Biol Trop. 2011;59:1371-87.
- Volkoff B, Cerri CC. Carbon isotopic fractionation in subtropical Brazilian grassland soils - comparison with tropical forest soils. Plant Soil. 1987;102:27-31.