

ESTOQUE DE CARBONO ORGÂNICO DO SOLO EM SISTEMAS  
AGROFLORESTAIS COM SERINGUEIRA NO SUL DO ESTADO DA  
BAHIA, BRASIL

**GERBELI DE MATTOS SALGADO**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE  
DARCY RIBEIRO

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ  
ABRIL – 2016

ESTOQUE DE CARBONO ORGÂNICO DO SOLO EM SISTEMAS  
AGROFLORESTAIS COM SERINGUEIRA NO SUL DO ESTADO  
DA BAHIA, BRASIL

**GERBELI DE MATTOS SALGADO**

“Tese apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Doutorado em Produção Vegetal.”

Orientador (a): Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Emanuela Forestieri da Gama-Rodrigues

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ  
ABRIL – 2016

## FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca do **CCT / UENF**

**181/2016**

Salgado, Gerbeli de Mattos

Estoque de carbono orgânico do solo em sistemas agroflorestais com seringueira no sul do Estado da Bahia, Brasil / Gerbeli de Mattos Salgado. – Campos dos Goytacazes, 2016.

70 f. : il.

Tese (Doutorado em Produção Vegetal) -- Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias. Laboratório de Solos. Campos dos Goytacazes, 2016.

Orientador: Emanuela Forestieri da Gama-Rodrigues.

Área de concentração: Matéria orgânica.

Bibliografia: f. 51-61.

1.  $\delta^{13}\text{C}$  2. CARBONO OCLUSO 3. *Euterpe oleraceae* 4. AGREGAÇÃO 5. AÇAÍ I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias. Laboratório de Solos II. Título

CDD

631.417

ESTOQUE DE CARBONO ORGÂNICO DO SOLO EM SISTEMAS  
AGROFLORESTAIS COM SERINGUEIRA NO SUL DA BAHIA,  
BRASIL

**GERBELI DE MATTOS SALGADO**

“Tese apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Doutorado em Produção Vegetal.”

Aprovada em \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2016

Comissão examinadora:

---

Prof. Cláudio Roberto Marciano (D.Sc., Solos e Nutrição de Plantas) – UENF

---

Prof. Gláucio de Mello Cunha (D.Sc., Produção Vegetal) – UFES

---

Prof. Antonio Carlos Gama-Rodrigues (D.Sc., Ciência do Solo) – UENF  
(Coorientador)

---

Prof.<sup>a</sup> Emanuela Forestieri da Gama-Rodrigues (Ph.D., Ciência do Solo) – UENF  
(Orientadora)

***Não se precipite em querer  
vencer. Há sempre um  
encanto a ser absorvido  
nos períodos dos  
preparos...  
Antes da vitória a luta!!!!***

*Pe. Fábio de Melo.*

***Dedico*** à minha família, em especial aos meus pais, Gerard e Isabel por toda dedicação, amor e incentivo.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus, pelo dom da vida e por ter me dado forças para continuar a batalha, ultrapassando todas as dificuldades impostas pela vida, por não ter me deixado desanimar, mesmo quando tudo parecia turbulência...

Aos meus pais, Gerard e Isabel, aos meus irmãos, Rafael e Sandro e à minha querida vó Lourdes, pelo apoio e incentivo no grande desafio de sair de casa e alçar novos voos em busca dos meus sonhos;

À minha orientadora Emanuela Forestieri da Gama-Rodrigues pela orientação, por ter acreditado no meu potencial e sempre ter me dado voto de confiança. Por ter contribuído com meu intelecto; pela amizade e carinho; e por todas as ajudas que foram importantes e valiosas na conclusão do meu trabalho e na construção da minha vida profissional;

A Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro e ao programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, pela oportunidade de realização do doutorado, e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Nível Superior (Capes), pela concessão da bolsa de estudos;

Ao meu coorientador, Antonio Carlos Gama-Rodrigues pela disponibilidade e colaboração para realização e conclusão do trabalho;

A Katia, pela ajuda e cooperação na realização das minhas análises e pelos cafezinhos e risadas mesmo nos dias de muito trabalho e cansaço;

Ao Ederaldo, pela coleta das minhas amostras, ajuda nas análises, por me acompanhar durante as aulas práticas, pela paciência de me ajudar na manutenção do sonificador e sempre estar disposto a ajudar;

A Vanilda, pela realização das análises de fertilidade, pelas boas rizadas e conversas;

Ao prof. Cláudio Marciano, por estar sempre disponível a ajudar com muita paciência e pelos ensinamentos em sala de aula e fora dela;

Aos meus amigos Paulo, Marlon e Adriano, que me acompanharam desde a graduação até o doutorado, pela troca de conhecimento, pelas risadas, companheirismo e acima de tudo pela amizade;

À minha querida amiga Michela, que mesmo com a distância nossa amizade sempre se manteve intacta e sempre esteve ao meu lado nos meus momentos difíceis, me incentivando, me motivando e acreditando na minha capacidade. Agradeço por nossas longas conversas ao telefone para chorar, sorrir e lembrar que Deus coloca anjos em nossas vidas;

Às amigadas que o doutorado permitiu que eu realizasse, Seldon, Marcus. À minha querida Laís, por nossas conversas científicas, risadas,... por ter me ouvido sempre que precisava desabafar e que sempre tinha uma palavra de incentivo e encorajamento;

À minha amiga Lígia, amizade construída durante minha estada em Campos, que vou levar para vida;

Às minhas companheiras de casa e de jornada Mirele e Franciele, por serem parceiras e pacientes durante os altos e baixos, por estarmos juntas nas risadas e lágrimas. Em especial à minha amiga Nay, que se tornou mais que amiga, uma irmã, por todo seu jeito carinhoso e atencioso, pelo companheirismo e palavras de carinho que sempre foram precisas e que vai ficar com minha querida Vic, motivos de alegria e muito amor na casa;

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para realização desse sonho.

## SUMÁRIO

RESUMO .....	1
ABSTRACT .....	3
1. INTRODUÇÃO .....	5
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	9
2.1 Sistemas agroflorestais.....	9
2.2 Matéria orgânica.....	11
2.3 Estabilização e estoque do C.....	12
2.4 Origem do C através do estudo do $\delta^{13}\text{C}$ .....	14
3. MATERIAL E MÉTODOS .....	17
3.1 Descrição das áreas.....	17
3.2 Amostragem do solo.....	17
3.3 Carbono orgânico do solo.....	20
3.4 Fracionamento em classes de agregados.....	21
3.5 Dispersão ultrassônica dos agregados e determinação do carbono ocluso	23
3.5.1 Determinação da energia ótima para dispersão dos agregados.....	23
3.5.2 Determinação do carbono ocluso.....	27
3.6 Abundância natural do $^{13}\text{C}$ no solo – origem do C.....	27
3.7 Análise estatística.....	28

4 RESULTADOS.....	29
4.1 Carbono orgânico do solo.....	29
4.2 Distribuição dos agregados no solo e carbono orgânico do solo na classe de agregados.....	32
4.3 Carbono ocluso.....	34
4.4 Abundância natural do <sup>13</sup> C.....	37
5 DISCUSSÃO.....	39
5.1 Estoque de carbono do solo em profundidade.....	39
5.2 Distribuição dos agregados e carbono orgânico do solo nas classes de agregados .....	42
5.3 Carbono ocluso.....	45
5.4 Origem do carbono.....	46
6 RESUMO E CONCLUSÕES.....	49
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	51

## RESUMO

SALGADO, GERBELI DE MATTOS, D.Sc., Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Abril de 2016. Estoque de carbono orgânico do solo e sua origem em sistemas agroflorestais com seringueira no Sul da Bahia, Brasil. Orientadora: Dr<sup>a</sup> Emanuela Forestieri da Gama-Rodrigues.

Os sistemas agroflorestais possuem grande capacidade de estocar carbono orgânico no solo. Os objetivos desse estudo foram (i) avaliar a capacidade de sistemas agroflorestais com seringueira em estocar carbono orgânico no solo em 100 cm de profundidade; (ii) avaliar a distribuição e o acúmulo de C nos macroagregados, microagregado e fração silte+argila, até 100 cm de profundidade e (iii) avaliar o estoque de C ocluso nos agregados sob os diferentes sistemas estudados; (iv) avaliar a contribuição da cobertura vegetal da seringueira e do pasto no estoque de C, após alguns anos de instalação através do uso do isótopo <sup>13</sup>C. As áreas de estudo estão localizadas no Sul da Bahia, município de Una. Os sistemas analisados foram: floresta secundária, pasto, sistema agroflorestal (SAF), seringueira+açaí, plantio de seringueira e SAF seringueira+cacau. As análises foram realizadas em seis camadas do solo (0-10; 10-20; 20-40; 40-60; 60-80 e 80-100 cm de profundidade). Foi realizado o fracionamento do solo para obtenção das classes de agregados (macroagregado, microagregado e silte+argila) e, em seguida, a sonificação para obtenção do C ocluso. O carbono orgânico do solo (COS) foi determinado via combustão seca no solo, nas classes de agregados e nas classes de agregados após a sonificação (C

ocluo) nas seis camadas estudadas. O plantio de seringueira foi o sistema que mais estocou COS ( $181,07 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) e o SAF seringueira+cacau o que menos estocou COS ( $92,17 \text{ Mg ha}^{-1}$ ), ambos até 1 m de profundidade. A quantidade de macroagregados, de modo geral, foi maior que as de microagregados e da fração silte+argila até os 40 cm de profundidade, representando aproximadamente 51% das classes de agregados. A quantidade de microagregado foi de aproximadamente 41% e da fração silte+argila de 17% em 1 m de profundidade. A quantidade de C estocado nos macroagregados foi maior que a estocada nos microagregados e na fração silte+argila, com uma predominância de até 40 cm de profundidade. A partir desta profundidade a quantidade de C estocado foi maior no microagregado e o C estocado na fração silte+argila manteve-se menor que nas demais classes, aumentando com a profundidade. Os valores de  $\delta^{13}\text{C}$  para a floresta secundária variaram entre -26,74 a -24,64 ‰. No pasto o  $\delta^{13}\text{C}$  variou entre -23,19 a -24,58 ‰, o que mostra a ocorrência da substituição do tipo de carbono,  $\text{C}_3$  para  $\text{C}_4$ , principalmente em superfície. O carbono ocluído nos macroagregados não apresentou diferença estatística entre os sistemas até 80 cm de profundidade. Nesta fração a quantidade de C ocluído foi maior no solo superficial, diminuindo com a profundidade. O oposto ocorreu com o C ocluído nos microagregados, que aumentou com a profundidade apesar de não ter apresentado diferença estatística entre os sistemas de estudo. Com o estudo pode concluir que a seringueira possui grande potencial em estocar COS, tanto solteira, quanto consorciada. Sua adoção em SAFs, proporciona melhor qualidade do solo, uma vez que mantém a quantidade de macroagregados em maior quantidade, bem como o COS estocado nessa fração. O estudo da origem do C, através do  $\delta^{13}\text{C}$  é de grande importância no entendimento da dinâmica do C dentro de um sistema.

Palavras-chave:  $\delta^{13}\text{C}$ , carbono ocluído, *Euterpe oleraceae*, agregação, açai.

## ABSTRACT

SALGADO, GERBELI DE MATTOS D.Sc., Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. April, 2016. Stock of soil organic carbon and its origin in agroforestry systems with rubber trees in southern Bahia, Brazil. Advisor: Dr<sup>a</sup> Emanuela Forestieri da Gama-Rodrigues.

Agroforestry systems have great capacity to stock organic carbon in the soil. The objectives of this study were (i) assess the ability of agroforestry systems with rubber stock in soil organic carbon at 100 cm deep; (ii) evaluate the distribution and the C accumulation in macroaggregates, microaggregates and fraction silt+clay, up to 100 cm deep and (iii) evaluate the stock of C occluded in macroaggregates and microaggregates under the different systems studied; (iv) evaluate the contribution of vegetation cover of the rubber tree and pasture in the stock of C, after a few years of installation through the use of isotope <sup>13</sup>C. The study areas are located in the south of Bahia, in the city of Una. The systems analyzed were: secondary forest, pasture, rubber+açaí, agroforestry system (AFS), rubber system and rubber+cocoa AFS. The analyzes were performed on six soil depth (0-10; 10-20; 20-40; 40-60; 60-80 and 80-100 cm depth). It was conducted soil fractionation to obtain the aggregate classes (macroaggregate, microaggregate and silt+clay) and then sonication for obtaining C occluded. The soil organic carbon (SOC) was determined by dry combustion in the soil, in aggregate classes and C occluded in six depths studied. The rubber tree plantation was the system more stockpiled COS (181.07 Mg ha<sup>-1</sup>) and the SAF

rubber+cocoa the least stockpiled COS (92.17 Mg ha<sup>-1</sup>) both up to 1 m deep. The amount of macroaggregates, in general, is greater than the microaggregates and silt+clay fraction to the 40 cm depth, representing approximately 51% of the aggregate classes. The amount of microaggregate was approximately 41% and silt+clay fraction 17% at 1 m depth. The amount C stocked in macroaggregates was greater than that stored in the microaggregates silt and clay + fraction, with a predominance of up to 40 cm depth. From this depth the amount of C stored was higher in microaggregate and C stocked in the silt+clay fraction remained lower than in other classes, increasing with depth. The  $\delta^{13}\text{C}$  values for secondary forest varied from -26.74 to -24.64 ‰. In the pasture the  $\delta^{13}\text{C}$  varied from -23.19 to -24.58 ‰, which shows the occurrence of the change of type of carbon, C<sub>3</sub> to C<sub>4</sub>, especially surface. The C occluded in macroaggregates no statistical difference between the systems up to 80 cm deep. In this fraction the amount of C occluded was higher in the topsoil, with decreasing depth. The opposite occurred with the C occluded in microaggregates, which increased with depth despite not having presented statistical difference between the study systems. With the study we can conclude that the rubber tree has great potential in stock SOC, both single, as intercropped. Its adoption of AFS, provides improved soil quality, since it keeps the amount of macroaggregates in greater quantity and COS stored in this fraction. The study of the C source through  $\delta^{13}\text{C}$  is of great importance in understanding the dynamics C within a system.

Keywords:  $\delta^{13}\text{C}$ , occluded carbon, *Euterpe oleraceae*, aggregation, açai.



## 1.INTRODUÇÃO

Com o advento da revolução industrial, entre os séculos XVIII e XIX, o homem iniciou uma constante emissão de gases na atmosfera, atualmente conhecidos por gases do efeito estufa (GEE), que resultaram no aquecimento global.

A emissão dos GEE elevou de forma significativa às concentrações de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) e óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) na atmosfera terrestre. Em 2011 as concentrações desses gases foram, respectivamente de 391 ppm, 1.803 ppb e 324 ppb, ultrapassando os níveis pré-industriais em 40, 150 e 20%, respectivamente. A elevada concentração desses gases na atmosfera teve como consequência o aumento da temperatura do globo terrestre, que segundo o IPCC em seu último relatório, em 2014, revelou que caso as emissões desses gases continuem aumentando no ritmo atual, a temperatura do globo terá um aumento médio entre 2,6 e 4,8° C mais alta até o final do século (IPCC 2014).

Devido a estes impactos, é crescente o interesse em métodos para mitigar as emissões dos gases do efeito estufa, e o solo tem sido sugerido como potencial dreno para o carbono (C) atmosférico (Mondini e Sequi, 2008), uma vez que o carbono orgânico do solo (COS) representa o principal reservatório terrestre (Lal, 2008). O solo, quando manejado adequadamente, pode atuar como sumidouro de C, dependendo das práticas de cultivo e manejos aplicados (Dolan et al., 2006).

Os estoques de C do solo são controlados por uma variedade de fatores climáticos e biogeoquímicos, que são diretamente influenciados por mudanças no uso e ocupação da terra. Há conversão de ecossistemas nativos, em especial, quando alterados por atividades antrópicas, o equilíbrio dinâmico é rompido e normalmente as entradas de matéria orgânica (MO) são menores que as saídas, conduzindo a uma redução da quantidade e modificando a qualidade da MO do solo, conseqüentemente o estoque de C (Cerri et al., 2008).

Os sistemas agroflorestais (SAFs) possuem um grande potencial de sequestrar C no solo devido à sua grande capacidade de aporte e retenção de matéria orgânica (Roshetko et al., 2002; Sharrow e Ismail 2004; Sanchez, 2000). Essa matéria orgânica (MO) presente em grande quantidade nos SAFs, além de ser de grande importância para a manutenção da qualidade do solo, serve como fonte de C para o mesmo. A estimativa do potencial em escala global de sistemas agroflorestais em sequestrar C é de 1,1 a 2,2 Pg de C durante 50 anos, na parte aérea e no solo (Dixon, 1995), entretanto, esse potencial dos sistemas agroflorestais para sequestrar carbono no solo varia de acordo com o modelo, composição das espécies, idade das espécies componentes, localização geográfica, fatores ambientais e práticas de manejo (Jose, 2009).

A MO tem estreita relação com os atributos do solo, exercendo direta influência sobre a agregação e indireta sobre as demais propriedades físicas do solo, sendo um dos principais atributos a formação de macroagregados estáveis, que está ligado à qualidade do solo (Bayer e Mielnickzuk, 1999).

O conceito de agregação do solo proposto por Tisdall e Oades (1982) explica o entendimento da interação entre a MO do solo e os agregados. Neste modelo, partículas primárias livres e agregados do tamanho de silte são unidos por agentes ligantes persistentes, como MO humificada ou complexos com cátions polivalentes, óxidos e aluminossilicatos, formando microagregados (20 a 250  $\mu\text{m}$ ). Esses microagregados estáveis são unidos por agentes ligantes temporários (raízes ou hifas de fungos) e transientes (polissacarídeos derivados de microrganismos ou plantas), resultando em macroagregados (> 250  $\mu\text{m}$ ). Dessa forma, os microagregados foram classificados como mais estáveis e menos suscetíveis a práticas agrícolas de manejo do que os macroagregados.

A estabilidade de agregados e o teor de MO no solo são interdependentes. A MO atua para formar e estabilizar os agregados e estes, por sua vez, atuam no sentido de proteger a MO por oclusão (Balesdent et al., 2000).

A oclusão do C no interior dos agregados é um dos principais mecanismos de proteção e estabilização da MO do solo (Christensen, 2000). Esse C pode ficar ocluído no interior dos agregados e sua estabilização depende da presença de agentes ligantes como os depositados pelas raízes e hifas de fungos (Tisdall e Oades, 1982).

O C ocluído é espacialmente protegido da decomposição devido a: (i) redução do acesso dos microrganismos e suas enzimas; (ii) redução e difusão de enzimas no espaço intra-agregado; e (iii) restrição da decomposição aeróbia devido ao contato reduzido com o oxigênio (Lützow et al., 2006).

A dinâmica desse C estocado pelos sistemas pode ser estudada através da determinação dos isótopos estáveis do C. Utilizando-se a técnica de isótopos é possível avaliar a influência da cobertura do solo no estoque de carbono quando ocorrem mudanças no uso da terra, pois a relação do  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  incorporada pela biomassa vegetal, funciona como uma digital de identificação da fonte de carbono que está sendo depositada no solo. Como exemplo, quando ocorre a substituição de uma floresta natural ( $\text{C}_3$ ) por uma área com pasto ou cultivo agrícola com fonte de carbono  $\text{C}_4$ , é possível analisar o quanto a fonte nova de carbono está contribuindo para o estoque atual e a dinâmica do C após introdução da nova cobertura.

Diante disso, o presente estudo tem como objetivos: (i) avaliar a capacidade de sistemas agroflorestais com seringueira em estocar carbono orgânico no solo em 100 cm de profundidade; (ii) avaliar a distribuição e o acúmulo de C nos macroagregados, microagregado e fração silte+argila, até 100 cm de profundidade; (iii) avaliar o estoque de C ocluído nos agregados sob os diferentes sistemas estudados e (iv) avaliar a contribuição da cobertura vegetal da seringueira e do pasto no estoque de C, após alguns anos de instalação através do uso do isótopo  $^{13}\text{C}$ .

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Sistemas agroflorestais e sequestro de carbono

Sistemas agroflorestais (SAFs) ou agroflorestas podem ser definidos como sendo uma forma de múltiplos cultivos sustentáveis que sejam compostos de, pelo menos, uma espécie arbórea e uma ou mais espécies destinadas à produção agrícola (anual ou perene) e/ou criação de animais, interagindo biologicamente entre si (Nair,1993; Nair et al., 2008; Schoeneberger, 2009 ; Somarriba, 1992).

De modo geral, tendo em vista o conceito de produção sustentável, os SAFs são utilizados com alguns dos seguintes objetivos: diversificação da produção; diminuição dos efeitos da sazonalidade; incremento dos níveis da matéria orgânica no solo; fixação biológica de nitrogênio atmosférico; ciclagem de nutrientes; modificação do microclima e otimização dos sistemas de produção (Somarriba, 1992). Esse tipo de integração entre árvores, culturas agrícolas, e/ou animais em um sistema agroflorestal tem o potencial para melhorar a fertilidade do solo, reduzir a erosão, melhorar a qualidade da água, aumentar a biodiversidade, e potencial em sequestrar carbono no solo e em sua biomassa (Garrity, 2004; Jose, 2009; Nair et al., 2009).

Os SAFs também têm como característica a prestação de serviço ambiental, pois este nada mais é que a valorização econômica do uso dos benefícios ambientais que um sistema pode trazer (Andrade e Romeiro, 2009).

Os sistemas agroflorestais possuem um grande potencial em estocar C acima e abaixo do solo devido à grande quantidade de materiais orgânicos que são adicionados em superfície e em profundidade (Montagnini e Nair, 2004 ; Muñoz e Beer, 2001; Oelbermann e Voroney, 2007). A estimativa do potencial em escala global de sistemas agroflorestais em sequestrar C é de 1,1 a 2,2 Pg durante 50 anos, na parte aérea e no solo (Dixon, 1995). Entretanto, esse potencial varia de acordo com o modelo, composição das espécies, idade das espécies componentes, localização geográfica, fatores ambientais e práticas de manejo (Jose, 2009).

A prática de manejo adotada nos SAFs, onde o revolvimento do solo não ocorre ou é minimamente praticado, pode potencialmente mitigar e reduzir as quantidades de carbono atmosférico, ou seja, sequestrando-o, capturando-o e mantendo-o o maior tempo possível na biomassa e no solo (Cotta et al., 2008; Gama-Rodrigues et al., 2010; Montagnini e Nair, 2004).

O potencial dos sistemas agroflorestais para sequestrar carbono varia de acordo com o tipo de sistema, composição de espécies, idade das espécies e de seus componentes, localização geográfica, fatores ambientais, e manejo (Jose, 2009). A escolha dos componentes que irão formar um SAF deve ser selecionada não apenas pelos benefícios agrícolas e ambientais que irão proporcionar, mas também pelos benefícios econômicos que podem gerar ao produtor.

A seringueira (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg) é um exemplo de espécie arbórea que vem sendo usada em SAF's, consorciada ou não, com diversas culturas como: açaí (*Euterpe oleraceae*), cacau (*Theobroma cacao*), acerola (*Malpighia glabra*), guaraná (*Paullinia cupana* Kunth), pimenta-do-reino (*Piper nigrum*), urucum (*Bixa orellana*), milho (*Zea mays*), feijão (*Phaseolus vulgaris*), entre outras (Abdo et al., 2012; Cotta et al., 2008 ; Monroe et al., 2016 e Schroth et al., 2001).

A seringueira possui uma grande aptidão para uso em sistemas agroflorestais, pois antes mesmo da primeira sangria realizada nas plantas para extração do látex, pode-se inserir cultivos nas entre linhas da cultura, uma vez que seu espaçamento proporciona espaço suficiente para adoção de consórcio com outras culturas (Abdo et al., 2012). O cultivo da seringueira, além de poder proporcionar o consórcio, também pode gerar renda ao produtor através da extração do látex, exploração da madeira, pode ser utilizada como quebra vento e

na comercialização do C devido à sua capacidade de estocar na biomassa e no solo.

## 2.2 Matéria orgânica

De forma geral, o conceito de matéria orgânica do solo abrange todos os materiais orgânicos encontrados em solos, independente da sua origem ou estado de decomposição, podendo ser matéria orgânica viva (plantas, biomassa microbiana e de biomassa da fauna), matéria orgânica dissolvida, matéria orgânica particulada, húmus e matéria inerte ou altamente carbonizada (carvão e materiais orgânicos carbonizados) (Baldock e Skjemstad 1999).

A matéria orgânica (MO) serve como indicador chave da qualidade do solo formada por um conjunto de variáveis químicas, físicas e biológicas (Doran, 1997; Reeves, 1997). Muitas vezes, a MO é expressa em termos de carbono (C), (Greenland, et al., 1992), pois é um de seus principais constituintes (Baldock e Skjemstad, 1999). Sua adição ao solo ocorre pela deposição de resíduos orgânicos, principalmente de origem vegetal, acumulado nas plantas via fotossíntese, em que se capta o CO<sub>2</sub> atmosférico, fixando-o no tecido vegetal. Através da liberação de exsudatos radiculares no perfil do solo, durante o crescimento dos vegetais, parte do C fixado fotossinteticamente é depositado no solo e o restante é incorporado pela deposição de folhas ou de toda parte aérea das plantas, após a sua senescência (Pillon et al., 2002) .

Os SAFs são sistemas com grande produção de biomassa vegetal, tanto na parte aérea das plantas utilizadas, quanto na radicular, uma vez que as raízes das espécies arbóreas penetram no solo mais profundamente, que as de plantas de sistemas agrícolas, o que afeta de forma diferente a ciclagem dos nutrientes, estrutura e umidade do solo (Gliessman, 2009). A seringueira, por exemplo, que vem sendo utilizada como componente de sistemas agroflorestais, possui uma grande capacidade de produção de biomassa e de estocar C na sua biomassa e no solo, podendo variar de 50 a 114 Mg ha<sup>-1</sup> de C na biomassa e de 60,1 a 181,07 Mg ha<sup>-1</sup> de C no solo (De Blécourt et al., 2013; Cotta et al., 2008; Diniz et al., 2015; Fernandes et al., 2007; Maggioletto et al., 2014; Wauters et al., 2008; Yang et al., 2004). Essa variação que ocorre entre os valores encontrados é devido à diversidade das metodologias aplicadas, assim como a variação da idade da planta, clima, geografia, solo e manejo.

Saengruksawong et al. (2012), em estudos com seringueira na Tailândia, relatam que a espécie pode chegar a produzir 3,2 kg de biomassa aérea por árvore com 1 ano de idade, podendo chegar a 264,9 kg por árvore aos 20 anos. Os mesmos autores relataram que em 20 anos a seringueira pode chegar a produzir 14,21 Mg ha<sup>-1</sup> de biomassa radicular e estocar 80,57 Mg ha<sup>-1</sup> de C em sua biomassa. Estudos realizados em um Latossolo na Zona da Mata mineira, com seringueira de 15 anos, mostraram que a espécie pode chegar a acumular 62.746 kg ha<sup>-1</sup> de C em sua biomassa (Carmo et al., 2004).

Outras espécies também são consideradas grandes produtoras de biomassa, com grande potencial em estocar C, como o cacauzeiro, que associado à eritrina pode chegar a uma média de 39,27 Mg ha<sup>-1</sup> de C armazenados na biomassa. De acordo com Gama-Rodrigues et al. (2010), sistemas agroflorestais com cacau podem chegar a estocar 300 Mg ha<sup>-1</sup> C em 100 cm de profundidade, sendo semelhante ao estocado em uma floresta natural. Monroe et al. (2016) encontraram estoque de C em sistemas de cacau cabruca e cacau+eritrina superiores aos estocados em uma floresta secundária.

### 2.3 Estabilidade e estoque do carbono orgânico do solo

O armazenamento de carbono (C) no globo terrestre é dividido principalmente em cinco compartimentos: oceânico, geológico, pedológico (solo), biótico (biomassa vegetal e animal) e atmosférico. Todos esses compartimentos estão interconectados, e o C circula entre eles (Lal et al., 1995; Lal, 2004).

Estima-se que a quantidade de C estocada no solo até um metro de profundidade esteja em torno de 1.576 Pg, distribuídos em 12,8 bilhões de hectares, nos continentes (Eswaran et al., 1993) e que contém, em média, 2,5 vezes mais C orgânico que a vegetação e 2 vezes mais que a atmosfera (Batjes, 1998). Pressupõe-se que a metade do C estocado no solo, cerca de 787 Pg, seja referente aos solos sob florestas (Dixon, 1995), enquanto os sistemas com pastagens contêm cerca de 500 Pg (Scharpenseel, 1997), e nas áreas de cultivo agrícola, 170 Pg de C (Paustian et al., 2000).

O sequestro de C no solo depende de uma série de fatores, tais como o tipo de solo (estrutura, textura e composição mineralógica), o uso da terra, a entrada anual de C pela biomassa, o clima. O carbono presente no solo encontra-se em compartimentos, ou seja, em reservatórios que determinam sua

estabilização e proteção contra o ataque por microrganismos (Ludwig et al., 2003). Três mecanismos podem influenciar a proteção e estabilização da matéria orgânica no solo (Christensen, 2000):

- (i) Oclusão no interior dos agregados ou em poros muito finos que dificultam o acesso dos microrganismos;
- (ii) Complexação de compostos orgânicos em sítios de adsorção dos minerais presentes na matriz do solo ou em óxidos de Fe e Al e
- (iii) A recalitrância intrínseca dos compostos e moléculas.

A proteção da MO está relacionada com a estabilidade dos agregados do solo, onde o conceito de agregação proposto por Tisdall e Oades (1982) explica o entendimento da interação entre a MO do solo e os agregados. Neste modelo, partículas primárias livres e agregados do tamanho de silte são unidos por agentes ligantes persistentes, como MO humificada ou complexos com cátions polivalentes, óxidos e aluminossilicatos, formando microagregados (20 a 250  $\mu\text{m}$ ). Esses microagregados estáveis são unidos por agentes ligantes temporários (raízes ou hifas de fungos) e transientes (polissacarídeos derivados de microrganismos ou plantas), resultando em macroagregados (> 250  $\mu\text{m}$ ). Dessa forma, os microagregados foram classificados como mais estáveis e menos suscetíveis a práticas agrícolas de manejo do que os macroagregados. Oades (1984) acrescentou uma alteração a esse modelo, na qual propõe que raízes e hifas atuam como núcleos de formação de macroagregados e, por serem ligantes temporários, ao se decomporem, formam fragmentos recobertos por mucilagens e incrustados de argilas, dando origem a novos agregados.

Devido a MO atuar como um eficiente agente cimentante por conter ligações de cátions polivalentes entre seus polímeros e as superfícies inorgânicas do solo, leva a formação e estabilização de macroagregados em solos com maiores teores de MO (Tisdal e Oades, 1982).

Apesar da grande adição de biomassa na superfície do solo a entrada de C através das raízes é apontada como principal fonte de C, pois o carbono derivado das raízes é mantido no solo de forma mais eficiente (Schmidt et al., 2011) devido à sua constituição mais lignificada, fazendo com que esse material seja decomposto de forma mais lenta que os outros tipos de biomassa. A estabilidade do C derivado das raízes também está relacionada à sua associação com fungos e bactérias que, junto com os exsudatos radiculares, proporcionam a

formação de agregados, bem como sua associação com os minerais do solo, tornando o C mais estável dentro do perfil (Chimento e Amaducci, 2015; Rasse et al., 2005; Schmidt et al., 2011; Six et al., 2002; Tate et al., 1993).

O estoque de carbono orgânico em profundidade no solo é de extrema importância, uma vez que, segundo Jobbágy e Jackson (2000), os horizontes mais profundos do solo são responsáveis por mais da metade do C acumulado, tendo o sistema radicular das plantas como o principal responsável pela entrada de C nas camadas mais profundas do solo (Chimento e Amaducci, 2015; Rasse et al., 2005; Rumpel e Kögel-Knabner, 2011).

As raízes com crescimento ativo influenciam fisicamente a agregação do solo por: (i) exercerem pressões laterais induzindo à agregação; (ii) promoverem a remoção contínua da água durante a transpiração das plantas, o que resulta na secagem localizada do solo e coesão das partículas ao seu redor (Six et al., 2002). Os macroagregados são formados em torno das raízes ativas, semelhantes às hifas fúngicas, pois as raízes podem formar estruturas mecânicas para formação de macroagregados através do emaranhamento das partículas e produção de agentes cimentantes (Jastrow e Miller., 1998).

Além das raízes liberarem agentes cimentantes, juntamente com elas desenvolvem-se fungos e bactérias que proporcionam a formação de agregados estáveis, devido à decomposição dos resíduos associados aos agentes ligantes que servem como estabilizadores dos agregados (Tisdall e Oades 1982).

#### 2.4 Origem do carbono através do estudo do $\delta^{13}\text{C}$

As estimativas dos reservatórios e das taxas de ciclagem de C nos sistemas naturais e agrossistemas são fundamentais para o entendimento da dinâmica e cálculo do fluxo do C entre o solo e a atmosfera (Bernoux et al., 1998). Com isso, nos dias atuais, uma técnica que vem sendo muito utilizada para analisar a dinâmica do C nos sistemas é a da abundância natural do  $^{13}\text{C}$ , principalmente para determinar a fonte de C na conversão de um sistema para o outro (Balesdent et al., 1987; Balesdent e Mariott, 1996; Bernoux et al., 1998).

O C ocorre na natureza sob três formas isotópicas, sendo duas estáveis,  $^{12}\text{C}$  e  $^{13}\text{C}$ , e uma radioativa,  $^{14}\text{C}$ , em uma proporção média no planeta de 100:1,1:10<sup>-12</sup>, respectivamente (Santos et al., 2008). O  $^{12}\text{C}$  é o mais leve e possui a maior proporção em relação ao total de C na natureza, 98,89 %, e o  $^{13}\text{C}$

participa com 1,11% do total. Essas proporções se mantêm relativamente estáveis em qualquer resíduo orgânico e as medidas do C isotópico são realizadas através da quantificação da relação do  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  das amostras. Essa razão é medida tendo como referência uma rocha padrão chamada PDB (*Pee Dee belemnite*, da Carolina do Norte) que apresenta o valor de R-padrão igual a 0,01124. A partir dos valores de R-amostra e R-padrão, obtém-se como resultado a quantificação do índice  $\delta^{13}\text{C}$  das amostras, que são expressos na casa dos milhares (‰) (Santos et al., 2008).

A aplicação do estudo do índice  $\delta^{13}\text{C}$  é possível devido às diferenças fotossintéticas existentes entre as plantas, já que existem plantas de ciclo fotossintético  $\text{C}_3$  e  $\text{C}_4$ . As plantas que realizam o ciclo  $\text{C}_3$  ou ciclo de Calvin-Benson geram como produto de sua carboxilação duas moléculas de 3-ácido fosfoglicérico (PGA) com 3 átomos de C cada. Já as de ciclo  $\text{C}_4$ , geram como produto final uma molécula de ácido dicarboxílico com 4 átomos de C (Alves et al., 2006).

As plantas que apresentam ciclo  $\text{C}_3$ , característico de matas e florestas, possuem um valor de  $\delta^{13}\text{C}$  entre -32 e -22 ‰, apresentando valor médio de -27 ‰. Já as plantas de ciclo  $\text{C}_4$ , típico de gramíneas e algumas culturas agrícolas, apresentam um valor de  $\delta^{13}\text{C}$  entre -17 a -9 ‰, com valor médio próximo a -13 ‰. Os valores encontrados nas culturas são mais negativos do que os encontrados no  $\text{CO}_2$  atmosférico, que é em torno de -7,4 ‰ (Bernoux et al., 1998; Farquhar et al., 1989 e Roscoe et al., 2000).

Então, com análise do índice  $\delta^{13}\text{C}$  é possível avaliar a influência da cobertura do solo no estoque de carbono quando ocorrem mudanças no uso da terra, já que  $\delta^{13}\text{C}$  funciona como uma digital de identificação da fonte de carbono que está sendo depositada no solo. Como exemplo, quando ocorre a substituição de uma floresta natural fonte de  $\text{C}_3$  por uma área com pasto ou cultivo agrícola com fonte de carbono  $\text{C}_4$ , é possível analisar o quanto a nova fonte de carbono está contribuindo para o estoque atual no solo, assim como a dinâmica do carbono orgânico depois da introdução de uma nova cobertura. Vicente et al. (2013), usando a técnica de isótopo de  $^{13}\text{C}$ , mostraram que em uma área com pastagem o estoque de COS foi de 175,66  $\text{Mg ha}^{-1}$ , entretanto, apenas 19 % desse C foi de origem  $\text{C}_4$ , os demais eram de origem  $\text{C}_3$  proveniente da cobertura

vegetal anterior à implantação do pasto, que era uma floresta. Os mesmos autores também verificaram que em um plantio de seringueira a maior contribuição para o estoque do COS foi de origem  $C_3$  da seringueira, que foi responsável por mais de 90% do C estocado e com menor contribuição de  $C_4$ , cobertura anterior à instalação do sistema seringueira, que era um pasto.

Maggiotto et al (2014) verificaram que após 15 anos de instalação de um sistema de seringueira o COS chegou a mais de 80 % de  $C_3$ , em uma área onde anteriormente o predomínio era de  $C_4$  proveniente do cultivo de pasto.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Descrição das áreas

As áreas de estudo estão localizadas no município de Una, Sul do Estado da Bahia, Brasil, distribuídas em um Latossolo Vermelho de baixa fertilidade natural (Quadro 2). O clima da região é AF (Köppen), com pluviosidade média de 2000 mm e temperatura média de 25 °C.

As áreas experimentais apresentavam aproximadamente 1 ha cada e antes da instalação dos sistemas as áreas eram compostas por floresta secundária.

Os sistemas utilizados foram:

- 1) Floresta secundária: usada como referência para os demais sistemas;
- 2) Pasto: composto por *Brachiaria decumbens*, com 8 anos de idade; antes do pasto a área passou por período de abandono com predomínio de plantas daninhas;
- 3) SAF Seringueira (*Hevea brasiliensis*) + açai (*Euterpe oleracea*): SAF com 30 anos de idade, composto por seringueiras e açai. As seringueiras, encontravam-se com espaçamento de 7x3 m, com um total de 476 plantas ha<sup>-1</sup> e no centro da entre linha o açai com 7x3 m, com um total de 476 plantas ha<sup>-1</sup>. O plantio do açai tinha como objetivo a produção de palmito.
- 4) Plantio de Seringueira: sistema com 40 anos de idade, com espaçamento de 7x3 m, totalizando 476 plantas ha<sup>-1</sup>. O sub-bosque do plantio de seringueira era composto por gramíneas.

5) SAF seringueira + cacau (*Theobroma cacao*): SAF com 35 anos de idade, composto por seringueiras e cacauzeiros. As seringueiras estavam dispostas em espaçamento de 15x3 m, totalizando 222 plantas ha<sup>-1</sup> e no centro da linha da seringueira encontravam-se, duas linhas de cacau com espaçamento de 3x3 m, totalizando 1100 plantas ha<sup>-1</sup> de cacau. Nesse sistema o cacauzeiro não apresentou desenvolvimento esperado e compatível com a idade do sistema.

### 3.2 Amostragem do solo

As amostras de solo foram coletadas em abril de 2012, início do período chuvoso da região. Na parte central de cada sistema, foram delimitadas quatro parcelas de 30 m<sup>2</sup> distantes entre si por aproximadamente 100 m, onde foi aberta uma trincheira de 1 x 1 x 1,5 m, entre as linhas das culturas. Em cada trincheira o solo foi coletado em seis camadas (0-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60- 80 e 80-100 cm de profundidade), totalizando 24 amostras por área.

Amostras indeformadas foram coletadas em anéis volumétricos de 100 cm<sup>3</sup>, utilizadas para a determinação da densidade do solo (Embrapa, 1997), sendo os valores utilizados para o cálculo do estoque de carbono. Também foram coletadas amostras deformadas utilizadas para análise granulométrica do solo, através do método da pipeta (Quadro 1) e análises químicas, que foram realizadas apenas na profundidade 0-10 cm (Quadro 2).

Quadro 1. Atributos físicos dos solos até 100 cm de profundidade, sob os diferentes sistemas agroflorestais, floresta e pasto.

Profundidade	Frações granulométricas e Densidade do solo (Ds)	Sistemas				
		Floresta secundária	Pasto	Seringueira	Seringueira+ açai	Seringueira+ cacau
0-10 cm	Areia (%)	45,69	53,70	42,41	43,87	35,87
	Silte (%)	14,20	3,66	9,21	7,17	6,82
	Argila (%)	40,11	42,64	48,38	48,95	57,30
	Ds (g dm <sup>-3</sup> )	1,03	1,54	1,22	1,15	1,16
10-20 cm	Areia (%)	42,83	52,67	37,89	42,31	30,95
	Silte (%)	14,94	9,10	7,25	7,40	7,56
	Argila (%)	42,23	38,23	54,87	50,29	61,50
	Ds (g dm <sup>-3</sup> )	1,20	1,43	1,34	1,28	1,20
20-40 cm	Areia (%)	38,52	46,90	31,91	36,87	26,76
	Silte (%)	7,97	7,38	7,18	6,88	6,53
	Argila (%)	53,50	45,73	60,92	56,25	66,72
	Ds (g dm <sup>-3</sup> )	1,34	1,50	1,38	1,36	1,26
40-60 cm	Areia (%)	32,60	43,13	27,57	32,89	23,95
	Silte (%)	5,98	5,03	3,89	7,84	5,06
	Argila (%)	61,42	51,84	68,54	59,27	70,99
	Ds (g dm <sup>-3</sup> )	1,36	1,46	1,36	1,34	1,26
60-80 cm	Areia (%)	35,04	38,79	25,93	29,35	21,80
	Silte (%)	1,05	5,04	8,85	4,71	6,81
	Argila (%)	61,42	56,16	65,22	65,94	71,38
	Ds (g dm <sup>-3</sup> )	1,22	1,38	1,28	1,30	1,15
80-100 cm	Areia (%)	31,60	40,89	25,63	29,35	20,59
	Silte (%)	2,17	5,35	5,11	4,71	3,76
	Argila (%)	66,23	53,76	69,26	70,25	75,64
	Ds (g dm <sup>-3</sup> )	1,24	1,37	1,28	1,32	1,18

Quadro 2. Atributos químicos dos solos até 100 cm de profundidade, sob os diferentes sistemas agroflorestais, floresta e pasto.

Parâmetros	Floresta secundária	Pasto	Seringueira+ açáí	Seringueira	Seringueira+ cacau
pH (H <sub>2</sub> O)	4,52	4,60	3,70	3,50	3,70
P (mg dm <sup>-3</sup> )	0,80	1,60	4,40	11,20	5,80
K (cmolc dm <sup>-3</sup> )	0,08	0,10	0,06	0,08	0,07
Ca (cmolc dm <sup>-3</sup> )	0,16	1,15	0,14	0,42	0,50
Mg (cmolc dm <sup>-3</sup> )	0,48	0,53	0,14	0,22	0,62
Al (cmolc dm <sup>-3</sup> )	1,40	0,30	1,20	2,20	1,80
H+Al (cmolc dm <sup>-3</sup> )	11,20	9,90	9,70	14,90	10,90
N (g kg <sup>-1</sup> )	1,40	1,20	0,60	1,70	2,10
SB (cmolc dm <sup>-3</sup> )	0,72	1,78	0,34	0,72	1,19
T	11,92	11,68	10,04	15,62	12,09
V%	6,04	15,24	3,39	4,61	9,84

### 3.3 Carbono orgânico do solo

O carbono orgânico do solo (COS) foi determinado em seis camadas: 0-10; 10-20; 20-40; 40-60; 60-80 e 80-100 cm de profundidade. Para determinação do COS as amostras deformadas coletadas, foram secas ao ar e passadas em peneira de 2 mm. Em laboratório, uma subamostra foi macerada em almofariz, passada em peneira de 150 µm e seca em estufa de circulação de ar a 60° C por 96 h (Figura 1). Em seguida foi analisado o teor de COS por combustão seca usando um sistema analisador elementar automatizado Perkin-Elmer Series II 2400 CHNS/O Analyze.

Os resultados do teor de COS foram ajustados pelo teor de argila de acordo com Moraes et al (1996), pois as variações nos níveis de COS são altamente associadas ao teor de argila (Equação 1).

$$C \text{ (g kg}^{-1}\text{)}_{\text{corrigido}} = C \text{ (g kg}^{-1}\text{)}_{\text{tratamento}} \times \left[ \frac{\% \text{ argila (referência)}}{\% \text{ argila (tratamento)}} \right] \quad (1)$$

Bem como, a compactação do solo, o que se faz necessário, também, uma correção pelas diferenças da densidade do solo de cada profundidade, usando a floresta secundária como referência (Ellert e Bettany, 1995), de acordo com a equação 2, calculou-se a espessura e compactação da camada do solo a ser considerada.

$$\text{Espessura (cm)}_{\text{corrigida}} = \left[ \frac{\text{densidade (referência)}}{\text{densidade (tratamento)}} \text{ (g cm}^{-3}\text{)} \right] \times \text{espessura (cm)}_{\text{tratamento}} \quad (2)$$

Após as correções, o estoque de COS foi determinado através da multiplicação do C corrigido, espessura da camada e densidade do solo, de acordo com a equação 3.

$$\text{Estoque do COS (Mg ha}^{-1}\text{)} = C_{\text{corrigido}} \times \text{espessura}_{\text{corrigida}} \times \text{densidade}_{\text{tratamento}} \times 0,01 \quad (3)$$

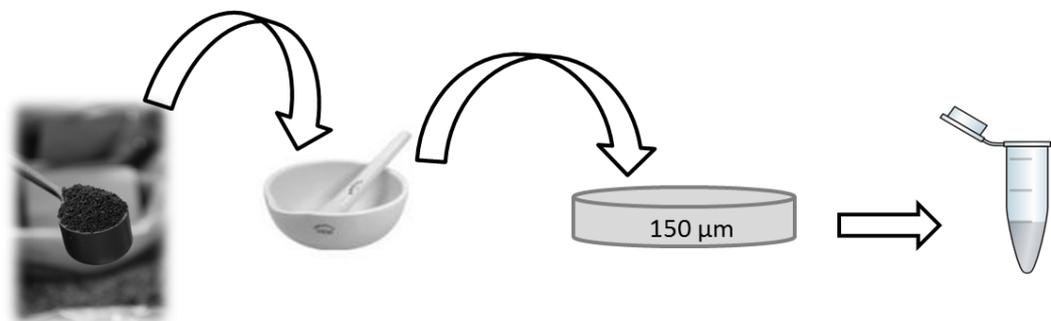


Figura 1. Preparo do solo para determinação do teor de carbono orgânico.

### 3.4 Fracionamento do solo em classes de agregados e compartimentalização do estoque de carbono

O fracionamento em classes de agregados foi realizado nas seis camadas estudadas. As frações do solo foram separadas de acordo com a metodologia de Elliot, (1986) e Gama-Rodrigues et al., (2010), que consistiu em pesar 100 g de solo em um béquer de 500 mL e deixar submerso em água destilada por 5

minutos. Após o tempo determinado a amostra foi passada em peneira de 250  $\mu\text{m}$  e agitada manualmente por 2 minutos. A fração que ficou retida na peneira foi armazenada em recipiente plástico e denominada de macroagregado ( $> 250 \mu\text{m}$ ). Em seguida, a fração que passou pela peneira de 250  $\mu\text{m}$  foi passada em outra peneira de 53  $\mu\text{m}$ , repetindo o mesmo processo de agitação para obtenção da primeira fração. O que ficou retida na peneira de 53  $\mu\text{m}$  foi chamada de fração microagregado (250-53  $\mu\text{m}$ ) e o que passou de fração silte+argila ( $<53 \mu\text{m}$ ).

As três frações foram armazenadas em recipientes plásticos e levadas para secar em estufa de circulação de ar forçado a 60° C (Figura 2).

Após a secagem das amostras as mesmas foram pesadas e uma subamostra macerada em almofariz, passada em peneira de 150  $\mu\text{m}$  e seca em estufa de circulação de ar forçado a 60° C por 96 h (Figura 1). Em seguida foi analisado o teor de COS por combustão seca usando um sistema analisador elementar automatizado Perkin-Elmer Series II 2400 CHNS/O Analyze.

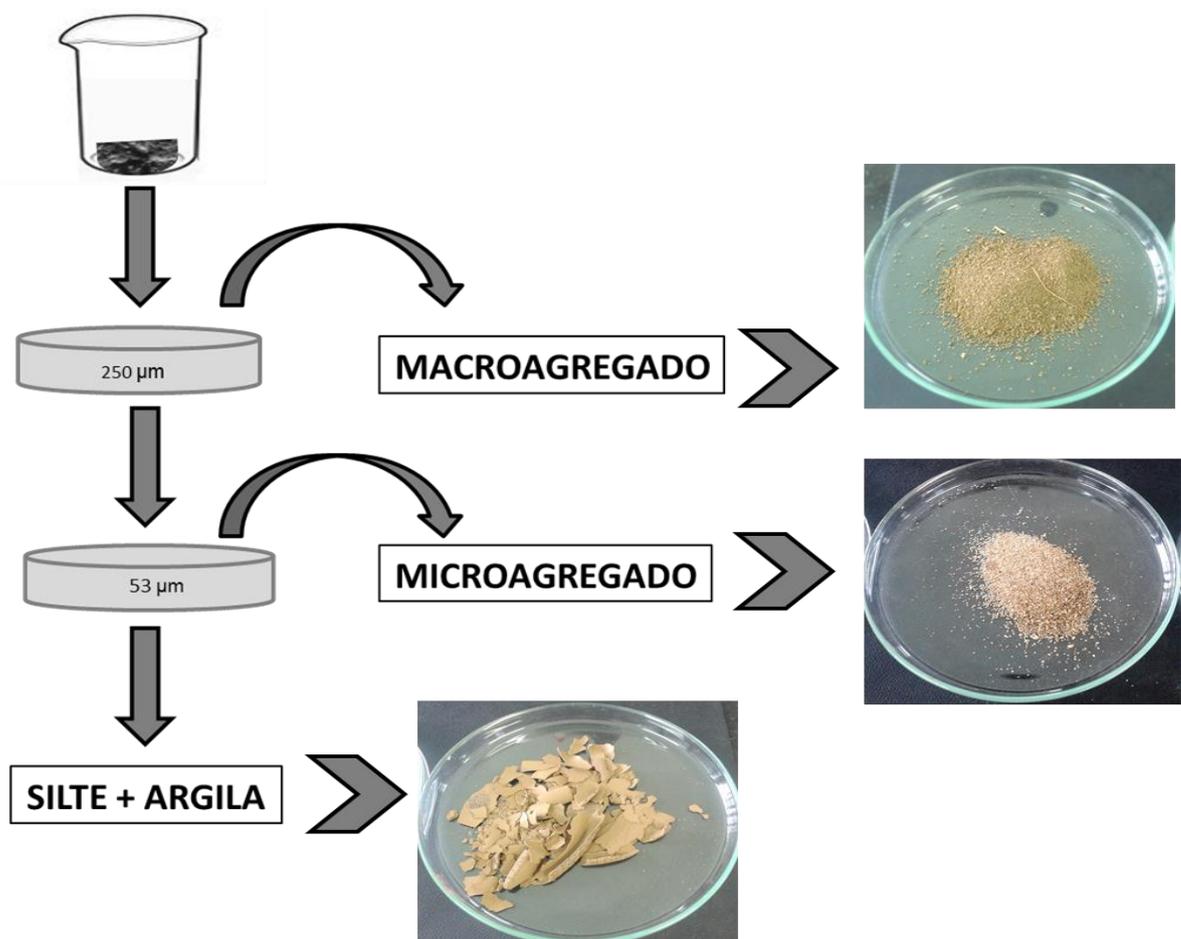


Figura 2. Fracionamento do solo em classes de agregados.

### 3.5 Dispersão ultrassônica dos agregados e determinação do carbono ocluso

#### 3.5.1 Determinação da energia ótima para dispersão dos agregados

A determinação da energia ótima para a quebra total dos agregados foi realizada através de teste de sonificação. As amostras dos macroagregados e microagregados do solo foram escolhidas a fim de se garantir um gradiente nos teores de argila (40%; 60% e 75%) (Quadro 1), assim foram escolhidas as amostras das áreas sob a floresta secundária (10-20 e 40-60 cm de profundidade) e SAF seringueira+açai (80-100 cm de profundidade), obtidas pelo fracionamento descrito no item 3.4.

A sonificação foi realizada em um Sonificador modelo 500 (Fisher Scientific, Hampton, New Hampshire), que foi calibrado a partir de um procedimento padrão determinado por Sá et al., (2000), que se baseia em técnicas calorimétricas.

As sonificações foram realizadas em um béquer de 500 mL, utilizando-se 5 g de macroagregado e 3 g de microagregados, com 3 repetições cada, com água destilada. O béquer foi levado ao sonificador junto com um banho de gelo para que a temperatura fosse mantida abaixo dos 40°C, em seguida a ponta da haste da sonda foi introduzida na suspensão solo+água a uma profundidade de 10 mm (Figura 3) (Sarkhot et al., 2008; Gama-Rodrigues et al., 2010).

Foram aplicadas às amostras as seguintes energias: 10, 40, 70, 104, 160, 220, 300, 400, 500, 600, 700 e 800 J mL<sup>-1</sup> para amostras com 42% de argila; 10, 40, 70, 104, 160, 220 e 300 J mL<sup>-1</sup> para amostras com 61% de argila e 300; 400; 500; 600 e 700 J mL<sup>-1</sup> para amostras com 75% de argila, mantendo uma amplitude de 40%, com intervalo de pausa de 60 segundos "ON" e 30 segundos "OFF". Os níveis de energia aplicados às amostras foram calculados segundo Christensen (1985) pela equação 4:

$$EA = \frac{P \times t}{V} \text{ (J mL}^{-1}\text{)} \quad (4)$$

sendo:

EA = energia ultrassônica aplicada (J mL<sup>-1</sup>);

P = potência (W);

t = tempo de sonificação (segundos);

V = volume (mL).

Após o tempo de sonificação as amostras foram passadas cuidadosamente em peneiras de 250 µm e 53 µm para macroagregado e microagregado, respectivamente. Após o peneiramento as amostras foram acondicionadas em recipientes e levadas à estufa de circulação de ar forçado para secagem a 60°C. Após a secagem, as frações foram pesadas para obtenção da massa. A fração que ficou retida na peneira foi chamada de fração particulada (FP) e a que passou pela peneira foi denominada de matéria orgânica do agregado (MOA) ou fração oclusa (Figura 3). As frações após secagem foram analisadas em lupa para verificação visual da quebra dos agregados.

Através das massas da fração MOA obtidas, foi calculado o índice de dispersão para cada tempo de sonificação e agregado, de acordo com a equação 5. (Figura 4). A partir do ID determinou-se a força a ser aplicada nas análises.

$$ID = \frac{\text{massa da fração MOA}}{\text{massa inicial do agregado seco}} \text{ (J mL}^{-1}\text{)} \quad (5)$$

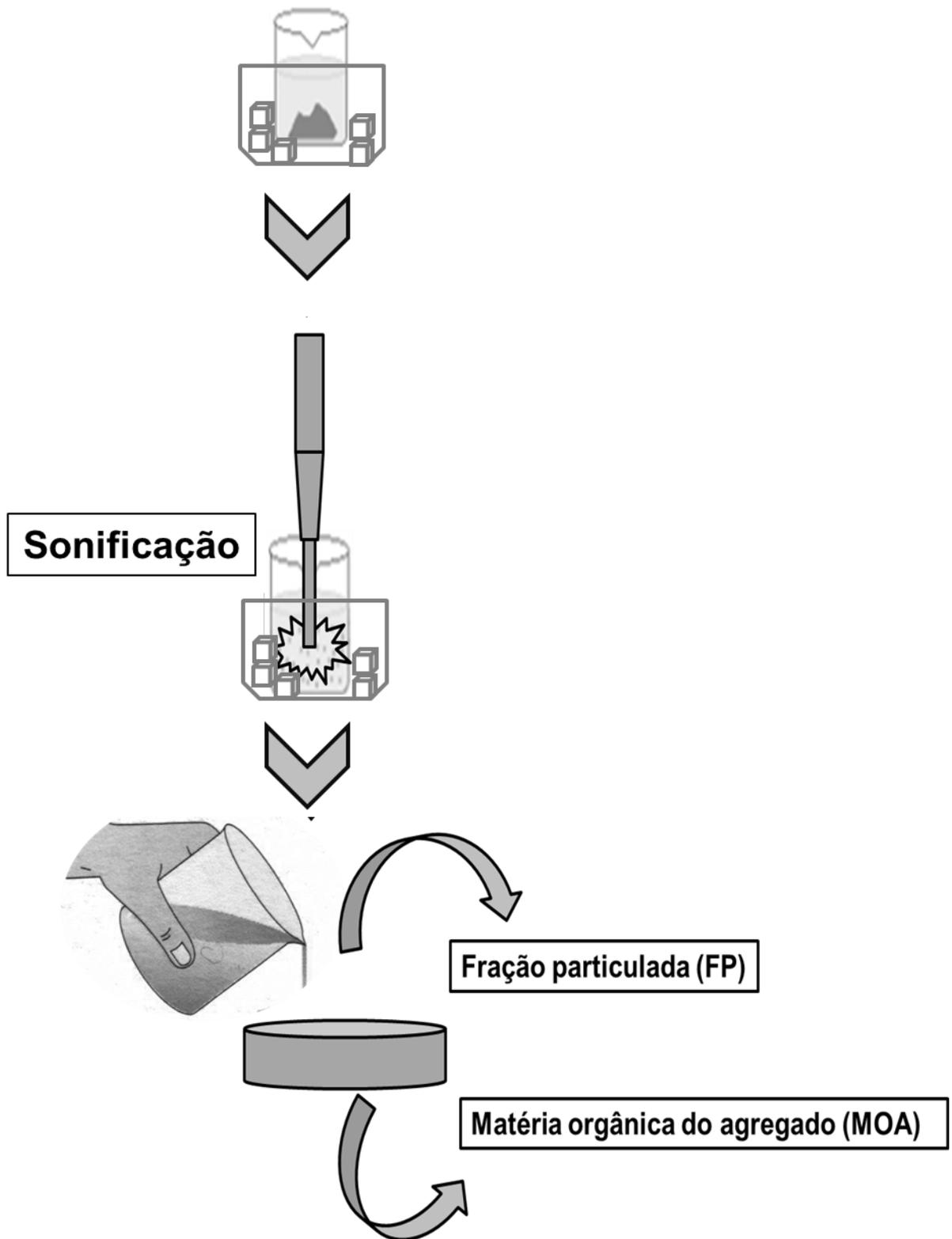


Figura 3. Sonificação dos agregados do solo.

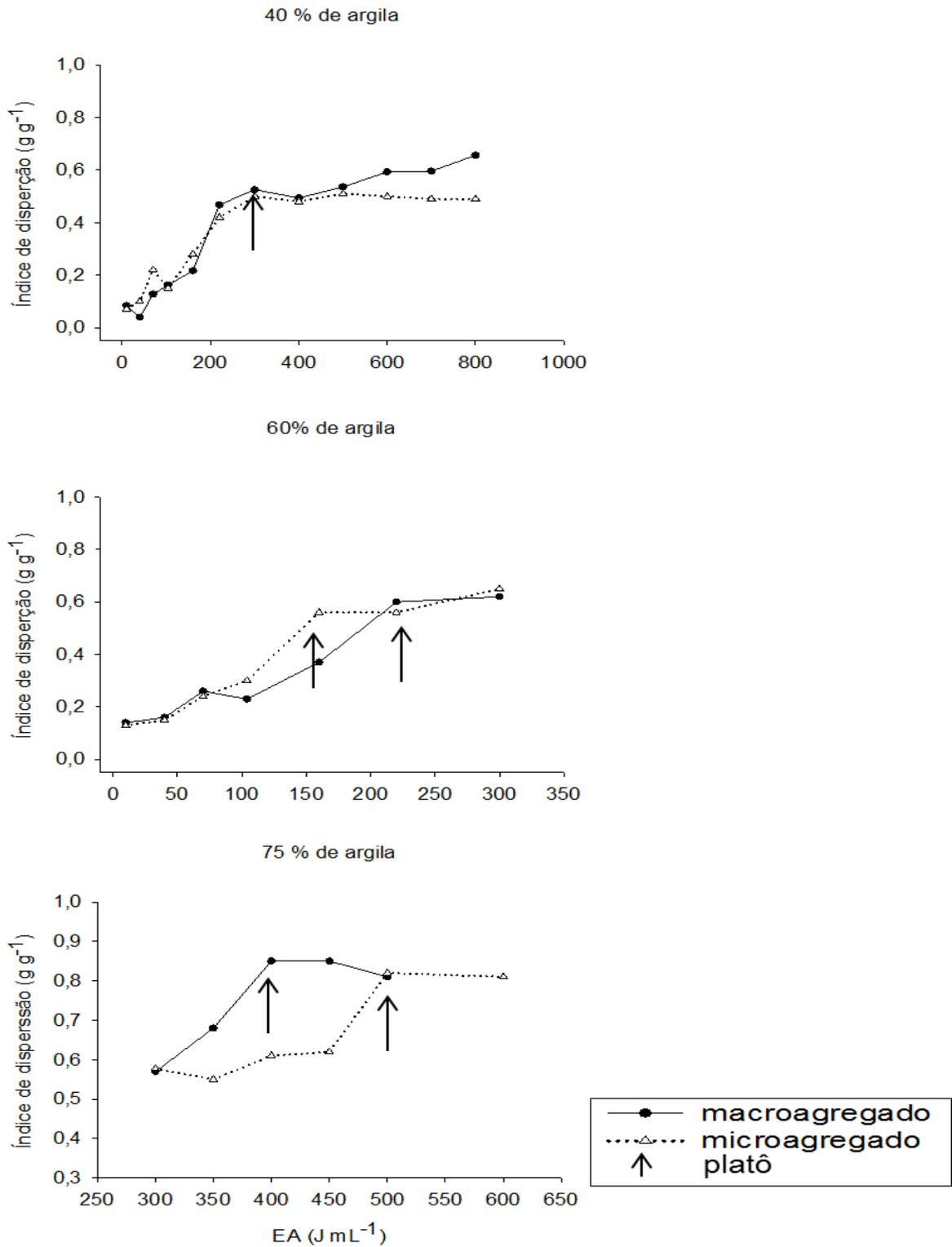


Figura 4. Índice de dispersão dos macroagregados e microagregados em três teores de argila. (A) 40% de argila; (B) 60% de argila e (C) 75% de argila.

### 3.5.2 Determinação do carbono ocluso

As determinações do carbono ocluso nos macroagregados e microagregados foram realizadas através de dispersão ultrassônica conforme o método descrito no item 3.5.1, adotando-se uma força de  $600 \text{ J mL}^{-1}$  /20 minutos.

Após a secagem das amostras sonificadas, essas foram maceradas em almofariz, passadas em peneira de  $150 \mu\text{m}$  e secas em estufa de circulação de ar forçado a  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  para a determinação do COS por combustão seca, usando um sistema analisador elementar automatizado (CHNS/O analyser).

### 3.6 Abundância natural do $^{13}\text{C}$ no solo - origem do C

A determinação da abundância natural do  $^{13}\text{C}$  no solo foi realizada apenas nos sistemas de seringueira, pasto e floresta secundária com interesse em: (i) verificar a diferença da contribuição das gramíneas presentes no sub-bosque da área de seringueira; (ii) verificar a transição de floresta para pasto (C-C<sub>3</sub> para C-C<sub>4</sub>) na área de pasto e (iii) a floresta secundária ser referência. Os demais sistemas não foram utilizados para o estudo de origem do C por não apresentarem transição de sistemas, ou seja, não apresentarem diferença na origem do C entre o sistema atual e o anterior. A abundância natural do  $^{13}\text{C}$  foi realizada nas seis profundidades estudadas.

As amostras de solo, de cada profundidade foram maceradas e passadas em peneira de  $150 \mu\text{m}$  e analisadas através de um analisador elementar Carlo Erba EA-1110, sendo os gases gerados separados por cromatografia gasosa e, carreados por fluxo contínuo até o espectrômetro de massa Finnigan Delta Plus, onde foram determinadas as relações  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  de cada amostra expressas em  $\delta$  por mil (‰) e relacionadas ao padrão internacional de Pee Dee Belemnita (PDB) por meio da equação 6:

$$\delta^{13}\text{C} = \frac{R_{\text{amostra}} - R_{\text{padrão}}}{R_{\text{padrão}}} * 1000 \quad (6)$$

sendo:

$R_{\text{amostra}}$  = Relação  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  da amostra;

$R_{\text{padrão}}$  = Relação  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  do padrão.

Para determinar a contribuição do tipo de vegetação ( $C_3$  ou  $C_4$ ) no estoque de C, também foi determinada a abundância natural  $^{13}C$  do material vegetal do pasto. Após coleta, o material vegetal foi seco em estufa a  $40^{\circ}C$  até peso constante, e moído em moinho tipo Willey a 50 mesh, resultando em um valor de  $-12,65\text{‰}$ , valor este que foi usado para calcular a quantidade de C derivado de plantas  $C_4$ , segundo proposto por (Vitarello et al., 1989), equação 7.

$$\%C-C_4 = [(\delta - \delta_a)/(\delta_{pl} - \delta_a)] \times 100 \quad (7)$$

sendo:

$\delta$  = índice relativo à abundância natural  $^{13}C$  das amostras,

$\delta_a$  = índice relativo à abundância natural  $^{13}C$  das amostras de solo que não contêm resíduos de plantas  $C_4$  (a floresta secundária é usada como referência), e

$\delta_{pl}$  = índice relativo à abundância natural  $^{13}C$  do material vegetal de planta  $C_4$  ( $-12,65\text{‰}$ ).

A determinação do C originado de plantas  $C_3$  foi feita por diferença, utilizando-se a equação 8:

$$\%C-C_3 = 100 - \%C-C_4 \quad (8)$$

### 3.7 Análise estatística

Em cada sistema de uso da terra as trincheiras foram tratadas como pseudorrepetições como em outros estudos com sistemas florestais e agroflorestais (Dawoe et al., 2010; Dechert et al., 2005; Fontes et al., 2014; Gama-Rodrigues et al., 2010; Isaac et al., 2007; Lima et al., 2006; Monroe et al., 2016; Vicente, 2016) . Como todas as trincheiras estavam distantes entre si por pelo menos 100 m, foi considerado que aleatoriedade e independência foram asseguradas, validando a análise de variância (ANOVA) (Lima et al., 2006) . Os dados foram analisados pelos programas StatSoft Inc. (1974-2009), STATISTICA 8.0 usando o método de comparação de médias Scott-Knott em 5% de probabilidade e análise de correlação, exceto para os dados de  $\delta^{13}C$ . Para confecção dos gráficos foi usado o programa SIGMAPLOT 11.0 (Systat Software Inc.).

## 4.RESULTADOS

### 4.1 Carbono orgânico do solo

Em 100 cm de profundidade, o plantio de seringueira foi o que mais estocou COS ( $181,07 \text{ Mg ha}^{-1}$ ), estocando aproximadamente 10% a mais que a floresta secundária, diferenciando estatisticamente dos demais sistemas. O pasto e a floresta secundária não diferiram estatisticamente entre-si com valores de  $150,75$  e  $164,24 \text{ Mg ha}^{-1}$ , respectivamente (Figura 5). O SAF seringueira+açaí estocou  $129,96 \text{ Mg ha}^{-1}$  e o SAF seringueira+cacau foi o sistema que menos estocou COS, apenas  $92,17 \text{ Mg ha}^{-1}$ .

Na profundidade 0-10 cm os maiores estoques de C foram observados no pasto e na floresta secundária, com  $37,94$  e  $35,39 \text{ Mg ha}^{-1}$ , respectivamente, sendo responsáveis por aproximadamente 23 e 24 %do C estocado nos referidos sistemas em 100 cm de profundidade. Os demais sistemas não diferiram estatisticamente entre si. Em 10-20 cm de profundidade, o pasto foi o sistema que mais estocou COS ( $36,21 \text{ Mg ha}^{-1}$ ), estocando, aproximadamente, 26% a mais de COS que a floresta secundária. O SAF seringueira+cacau foi o que apresentou menor estoque ( $16,11 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) e os demais sistemas apresentaram valores intermediários de COS (Figura 6).

A partir de 20-40 cm de profundidade o plantio de seringueira foi o sistema que mais estocou COS até 100 cm, sendo o COS estocado em profundidade, responsável por mais de 70 % do estoque total na área. Os demais sistemas diminuíram seu estoque de COS com a profundidade, sendo o SAF

seringueira+cacau o que apresentou o menor estoque de COS até 100 cm de profundidade.

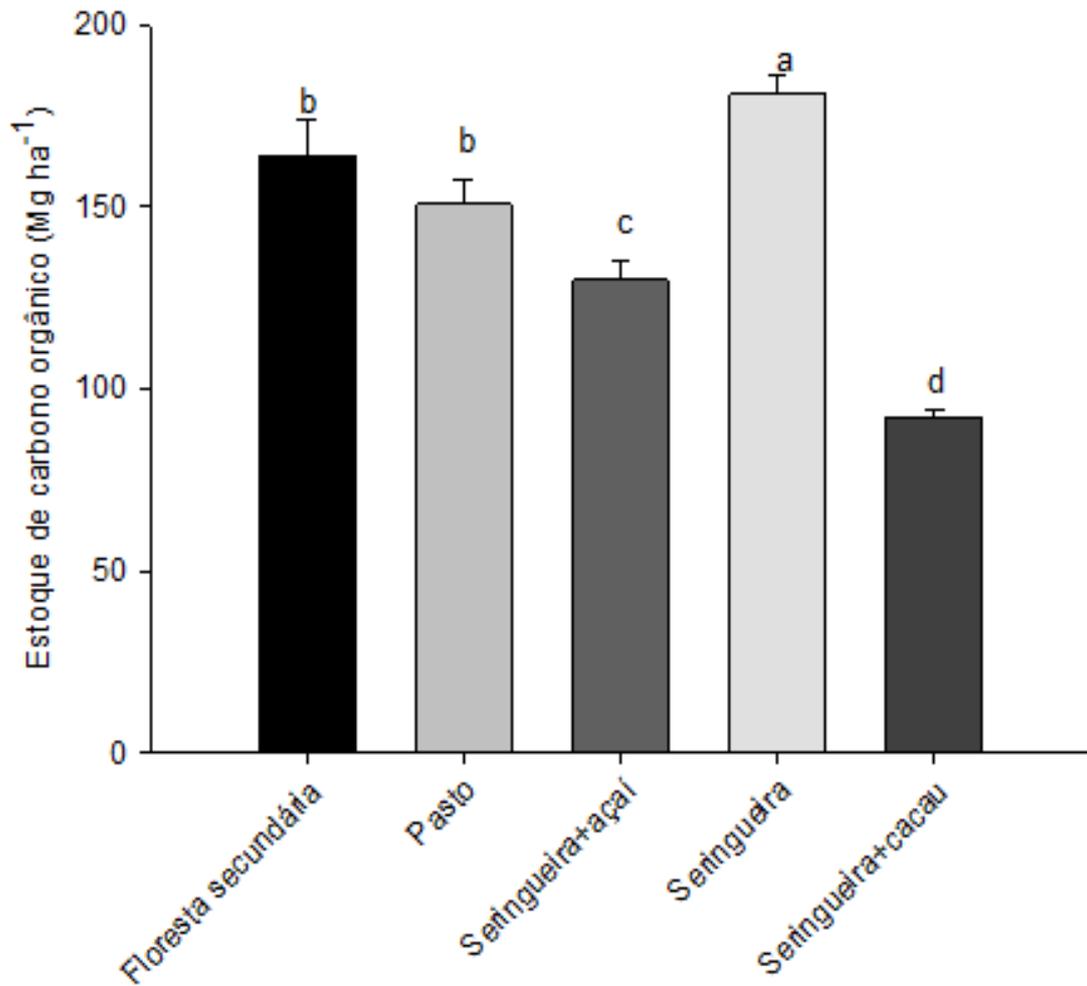


Figura 5. Estoque de C, na profundidade 0-100 cm, nos solos sob diferentes sistemas agroflorestais de seringueira, floresta secundária e pasto. Letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste Scott-Knott a 5% de probabilidade, as barras verticais apresentam  $\pm$  erro padrão.

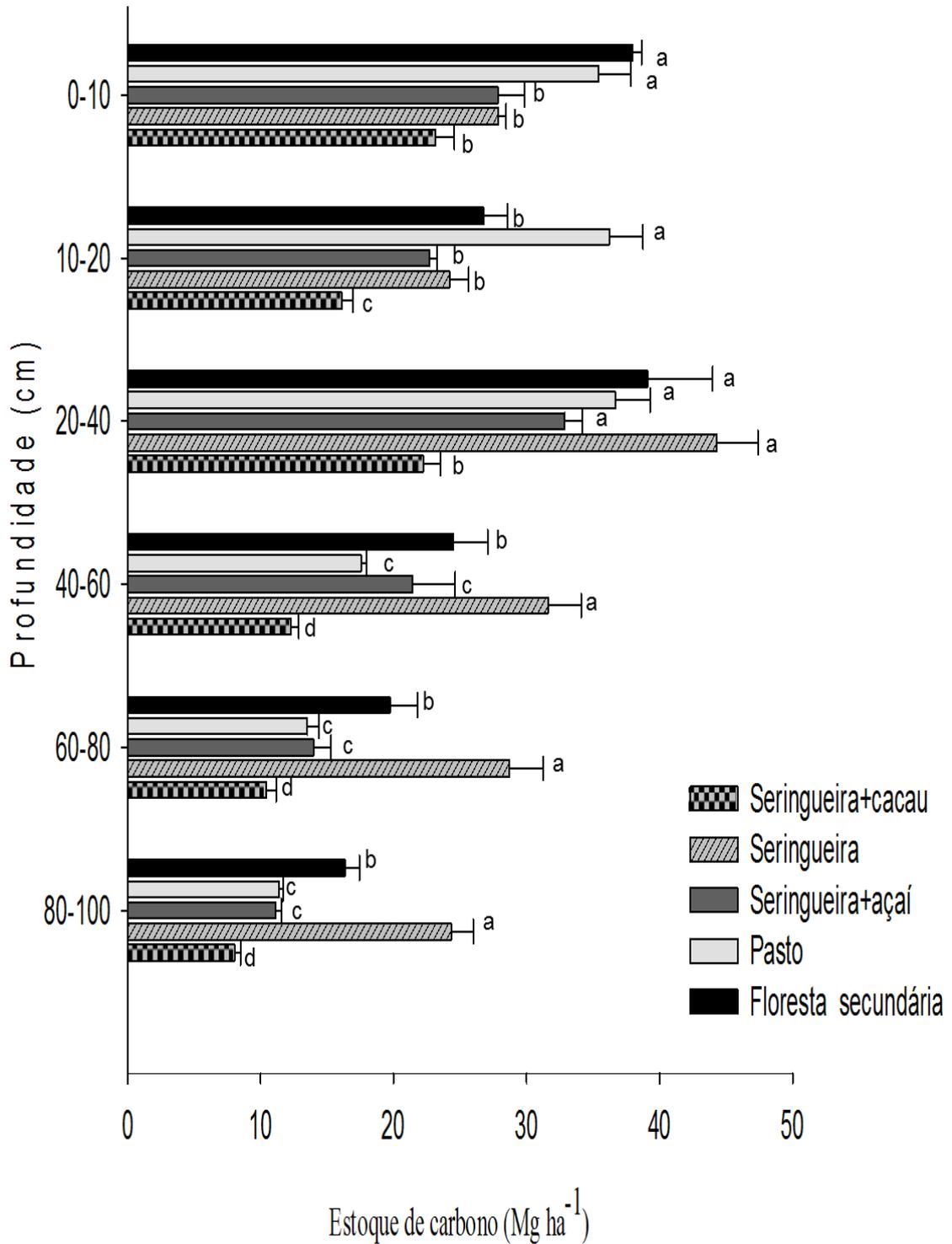


Figura 6. Estoque de C, em diferentes profundidades, nos solos sob diferentes sistemas agroflorestais de seringueira, floresta e pasto no Sul da Bahia, Brasil. Letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste Scott-Knott a 5% de probabilidade, as barras horizontais representam  $\pm$  erro padrão.

#### 4.2 Distribuição dos agregados no solo e carbono orgânico do solo na classe de agregado

A quantidade de macroagregados, em geral, foi maior que as demais frações (microagregados e silte+argila) até a profundidade de 40 cm, sendo responsáveis por aproximadamente 51% dos agregados do solo (Quadro 3), exceto no pasto.

Quadro 3. Distribuição em profundidade das classes de agregados dos solos sob diferentes sistemas agroflorestais com seringueira, floresta secundária e pasto no Sul da Bahia, Brasil.

Profundidade	Classes de agregados	Floresta secundária	Pasto	Seringueira+ açai (%)	Seringueira	Seringueira+ cacau
0-10 cm	> 250	60 <sup>ns</sup>	57,35 <sup>ns</sup>	56,59 <sup>ns</sup>	50,72 <sup>ns</sup>	56,26 <sup>ns</sup>
	> 53	28,75 <sup>ns</sup>	32,27 <sup>ns</sup>	32,83 <sup>ns</sup>	36,8 <sup>ns</sup>	30,52 <sup>ns</sup>
	< 53	5,49 b	7,31 b	8,71 a	10,61 a	10,32 a
10-20 cm	> 250	51,22 <sup>ns</sup>	51,97 <sup>ns</sup>	50,09 <sup>ns</sup>	47,04 <sup>ns</sup>	50,48 <sup>ns</sup>
	> 53	34,73 <sup>ns</sup>	37,39 <sup>ns</sup>	38,51 <sup>ns</sup>	38,54 <sup>ns</sup>	35,53 <sup>ns</sup>
	< 53	8,79 <sup>ns</sup>	7,89 <sup>ns</sup>	10,98 <sup>ns</sup>	11,72 <sup>ns</sup>	11,41 <sup>ns</sup>
20-40 cm	> 250	51,61 a	40,16 b	50,28 a	43,31 b	43,66 b
	> 53	33,08 <sup>ns</sup>	45,02 <sup>ns</sup>	36,72 <sup>ns</sup>	39,94 <sup>ns</sup>	39,66 <sup>ns</sup>
	< 53	10,39 <sup>ns</sup>	12,16 <sup>ns</sup>	11,09 <sup>ns</sup>	14,31 <sup>ns</sup>	14,08 <sup>ns</sup>
40-60cm	> 250	35,73 <sup>ns</sup>	33,58 <sup>ns</sup>	46,46 <sup>ns</sup>	38,28 <sup>ns</sup>	40,21 <sup>ns</sup>
	> 53	45,62 a	49,76 a	38,44 b	41,76 b	41,53 b
	< 53	12,63 <sup>ns</sup>	13,91 <sup>ns</sup>	12,85 <sup>ns</sup>	17,21 <sup>ns</sup>	15,90 <sup>ns</sup>
60-80 cm	> 250	32,59 b	31,75 b	41,83 a	32,68 b	35,17 b
	> 53	47,09 a	50 a	41,88 b	44,85 b	43,42 b
	< 53	15,00 <sup>ns</sup>	15,70 <sup>ns</sup>	14,31 <sup>ns</sup>	19,19 <sup>ns</sup>	17,49 <sup>ns</sup>
80-100 cm	> 250	30,77 <sup>ns</sup>	32,44 <sup>ns</sup>	38,91 <sup>ns</sup>	34,01 <sup>ns</sup>	36,06 <sup>ns</sup>
	> 53	47,49 a	48,56 a	42,53 b	44,34 b	42,34 b
	< 53	14,75 b	16,37 b	15,66 b	17,98 a	18,94 a

Letras iguais na linha não diferem significativamente pelo teste Scott-knott a 5% de probabilidade na coluna. ns = não significativo.

A partir dos 40 cm de profundidade a quantidade de microagregados, de modo geral, foi maior que as de macroagregados e silte+argila, excetuando-se na camada 40-60 cm do SAF seringueira+açaí. A quantidade de silte+argila aumentou com a profundidade, mas manteve-se menor que as demais frações ao longo do perfil do solo (Quadro 3).

Na camada 0-10 cm de profundidade apenas a fração silte+argila apresentou diferenças significativas entre os sistemas, com os maiores valores no plantio de seringueira, SAF seringueira+açaí e SAF seringueira+cacau. Na camada 10-20 cm não ocorreu diferença estatística em nenhuma das frações.

Na camada 20-40 cm de profundidade a quantidade de macroagregados foi significativamente superior na floresta secundária e SAF seringueira+açaí. Já na camada 40-60 cm, a floresta secundária e o pasto apresentaram as maiores quantidades de microagregados, diferindo estatisticamente dos demais sistemas que não diferiram entre si. Na camada 60-80 cm o SAF seringueira+açaí apresentou a maior quantidade de macroagregado, enquanto a floresta e o pasto a maior quantidade de microagregados. Por fim, na camada 80-100 cm de profundidade os valores para os microagregados foram significativamente superiores que os observados para a floresta secundária e o pasto, enquanto para a fração silte+argila os valores significativamente superiores ocorreram no plantio de seringueira e no SAF seringueira+cacau.

Em geral, os macroagregados foram a fração que mais estocou COS até os 40 cm de profundidade. O plantio de seringueira apresentou maior estoque de COS nos macroagregados até os 60 cm de profundidade e o SAF seringueira+açaí foi o que mais estocou COS nos macroagregados até 100 cm de profundidade (Figura 7).

Na camada 0-10 cm de profundidade a floresta secundária, o pasto e o SAF seringueira+açaí foram os sistemas que mais estocaram COS nos macroagregados, com aproximadamente 27, 25 e 24 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente, diferenciando-se estatisticamente dos demais sistemas (Figura 8 A). Enquanto na profundidade de 10-20 cm o pasto e o SAF seringueira+açaí continuaram com os valores significativamente superiores (22,64 e 17,85 Mg ha<sup>-1</sup>), na camada 20-40 cm foram a floresta secundária e o SAF seringueira+açaí que apresentaram maior estoque de COS no macroagregado, diferindo dos demais sistemas que foram estatisticamente iguais (Figura 7C). Nas demais profundidades o sistema

seringueira+açaí foi o que apresentou os maiores estoques de COS nos macroagregados. Já o estoque nos microagregados não ocorreu diferença estatística entre os sistemas em nenhuma das profundidades estudadas.

A fração silte+argila não apresentou diferença significativa entre os sistemas, exceto na profundidade 40-60 cm, onde a floresta secundária foi inferior aos demais sistemas, que não diferiram entre si.

#### 4.3 Carbono ocluso

Em geral, não houve variação entre os sistemas em relação à quantidade de C ocluso nos macroagregados. Apenas na camada 80-100 cm de profundidade, observou-se que todos os sistemas com seringueira apresentaram maior quantidade de C ocluso, diferenciando-se estatisticamente do pasto e da floresta secundária e em 100 cm de profundidade o SAF seringueira+açaí foi o que apresentou maior quantidade de C ocluso nos macroagregados com aproximadamente 37 Mg ha<sup>-1</sup>.

A quantidade de C ocluso nos macroagregados diminuiu com a profundidade e aproximadamente 22% do COS em 100 cm de profundidade, estão oclusos nos macroagregados, média entre todos os sistemas (Quadro 4).

Nos microagregados, diferente do que ocorreu para os macroagregados, o C ocluso aumentou com a profundidade (Quadro 4), apresentando uma pequena diminuição apenas na camada 80-100 cm de profundidade. Quanto ao COS em 100 cm de profundidade, aproximadamente 22% estão oclusos nos microagregados, semelhante ao encontrado nos macroagregados. Assim, 44% do COS presente nos sistemas, em 100 cm de profundidade, estão na forma oclusa.

Os SAFs seringueira e seringueira+cacau e o pasto, foram os sistemas que em 100 cm de profundidade, apresentaram as maiores quantidades de C ocluso nos microagregados, com aproximadamente 21, 20 e 31,31 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

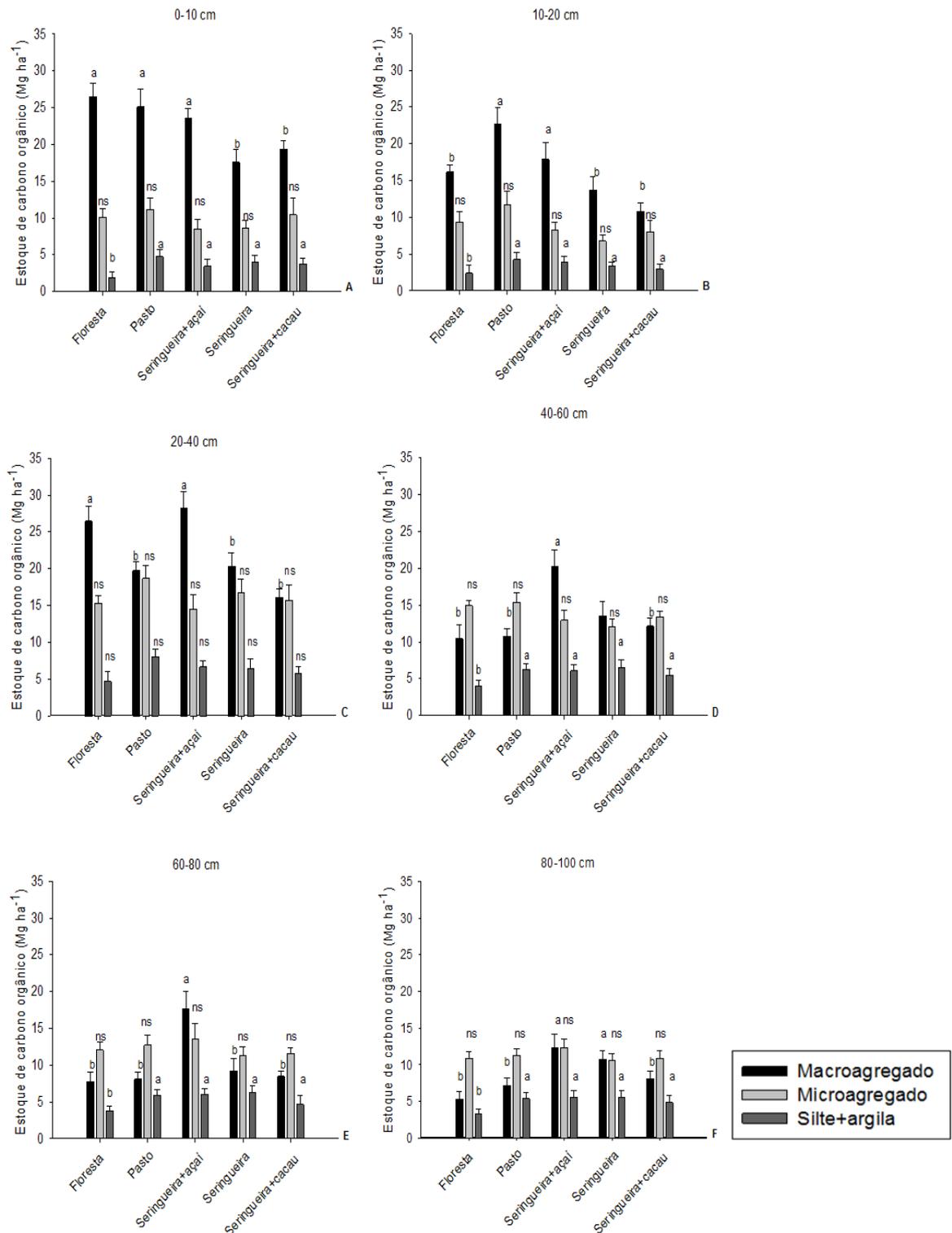


Figura 7. Estoque de C nas classes de agregados sob diferentes profundidades de solos sob sistemas agroflorestais de seringueira, floresta e pasto no Sul da Bahia, Brasil. Letras iguais não diferem entre si significativamente pelo teste Scott-Knott a 5% de probabilidade dentro das classes de agregados. ns = não significativo.

Quadro 4. Carbono ocluso nos agregados do solo em 100 cm de profundidade sob três sistemas agroflorestais com seringueira, pasto e floresta secundária.

Sistemas	Prof. (cm)	C ocluso macro	C ocluso* micro	C ocluso macro no COS	C ocluso micro no COS
		(Mg ha <sup>-1</sup> )		%	
Floresta secundária		6,18 a	0,81	16,29	2,13
Pasto		8,42 a	1,32	23,79	3,73
Seringueira+açaí	0-10	8,58 a	2,14	30,82	7,69
Seringueira		5,05 a	2,34	18,11	8,39
Seringueira + cacau		7,56 a	2,08	32,70	9,00
Floresta secundária		6,11a	2,2	22,82	8,22
Pasto		10,81a	2,32	29,85	6,41
Seringueira+açaí	10-20	6,70 a	2,5	29,52	11,01
Seringueira		3,34 a	2,02	13,81	8,35
Seringueira + cacau		4,39 a	1,95	27,25	12,10
Floresta secundária		5,86 a	2,09	40,57	5,35
Pasto		5,76 b	4,64	15,70	12,65
Seringueira+açaí	20-40	9,35 b	4,09	28,45	12,44
Seringueira		5,31 b	3,93	11,99	8,87
Seringueira + cacau		6,01 b	4,48	27,05	20,16
Floresta secundária		4,15 a	3,15	16,95	12,87
Pasto		3,42 a	4,36	19,49	24,84
Seringueira+açaí	40-60	4,4 a	3,84	20,54	17,93
Seringueira		3,45 a	4,13	10,91	13,07
Seringueira + cacau		4,02 a	4,15	32,79	33,85
Floresta secundária		2,75 a	12,61	13,94	63,91
Pasto		1,52 a	10,54	11,24	77,96
Seringueira+açaí	60-80	4,22 a	3,07	30,14	21,93
Seringueira		2,63 a	4,79	9,16	16,68
Seringueira + cacau		2,3 a	3,82	22,12	36,73
Floresta secundária		1,26 b	7,83	7,71	47,92
Pasto		1,32 b	8,13	11,61	71,50
Seringueira+açaí	80-100	2,99 a	3,33	26,91	29,97
Seringueira		3,39 a	3,05	13,93	12,53
Seringueira + cacau		2,59 a	3,53	32,25	43,96

C ocluso macro=carbono ocluso no macroagregado; C ocluso micro: carbono ocluso no microagregado; C ocluso macro no COS=contribuição do carbono ocluso no macroagregado, no carbono orgânico total do solo e C ocluso micro no COS= contribuição do carbono ocluso no microagregado, no carbono orgânico total do solo. Letras iguais não diferem entre si significativamente pelo teste Scott-knott a 5% de probabilidade na coluna para cada profundidade. \*não significativo.

#### 4.4 Abundância natural do $^{13}\text{C}$

Nas três áreas estudadas, as maiores variações do  $\delta^{13}\text{C}$  ocorreram nos primeiros 10 cm de profundidade com -23,03; -24,85 e -26,11 ‰ para o pasto, a seringueira e a floresta secundária, respectivamente. Os valores do  $\delta^{13}\text{C}$  das áreas de pasto e seringueira foram ficando mais negativos com a profundidade e na floresta secundária os valores foram ficando mais positivos (Figura 8).

A partir dos 60 cm quase não houve diferenças nos valores de  $\delta^{13}\text{C}$  entre os sistemas até 100 cm de profundidade.

No plantio de seringueira a contribuição de C-C<sub>3</sub> no estoque de COS em 100 cm de profundidade (152,23 Mg ha<sup>-1</sup>) foi maior que a contribuição do C-C<sub>4</sub> de origem da gramínea (18,03 Mg ha<sup>-1</sup>) presente no sub-bosque deste plantio. A contribuição do C-C<sub>4</sub> foi mais relevante apenas até 40 cm de profundidade, sendo responsável por apenas 16%, aproximadamente, do COS estocado até esta profundidade (Figura 9A).

A partir dos 40 cm de profundidade o plantio de seringueira contribuiu com aproximadamente 26% a mais de C-C<sub>3</sub> que a floresta secundária e o C-C<sub>4</sub> proveniente do sub-bosque contribuiu com apenas 4%. Na área com pasto a contribuição do C-C<sub>3</sub> foi maior que a de C-C<sub>4</sub>, sendo responsável por mais de 84% do COS estocado em 100 cm de profundidade. A contribuição do C-C<sub>4</sub>, proveniente do pasto, foi mais significativa até 40 cm, com aproximadamente 21% diminuindo com a profundidade, prevalecendo o C-C<sub>3</sub> (Figura 9B).

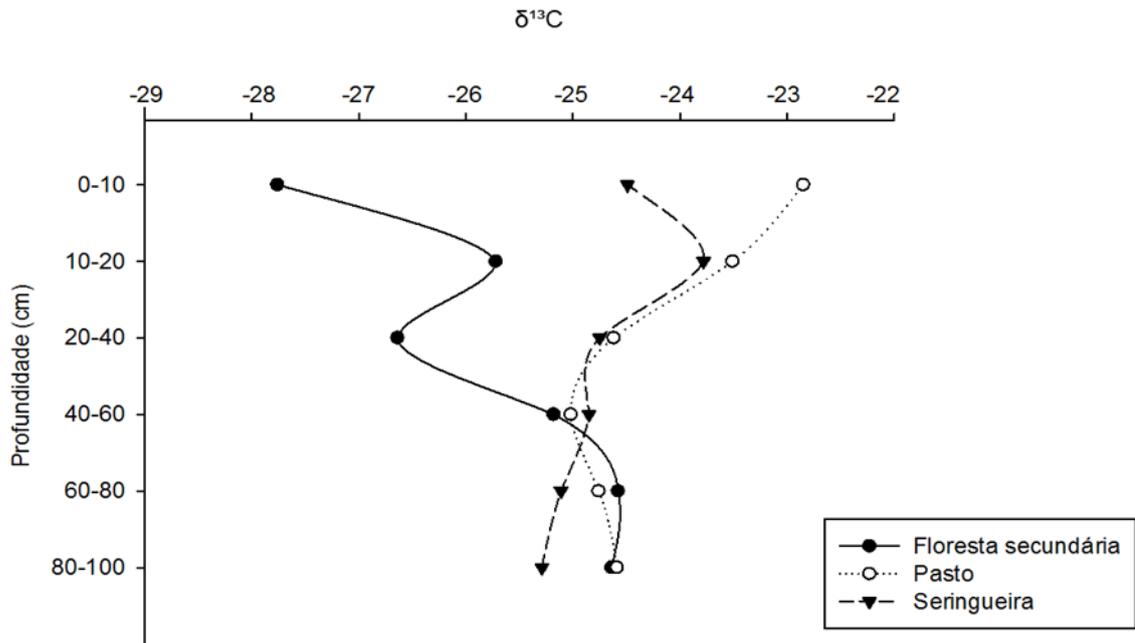


Figura 8. Variação do  $\delta^{13}C$  até 100 cm de profundidade nas áreas de floresta secundária, pasto e plantio de seringueira.

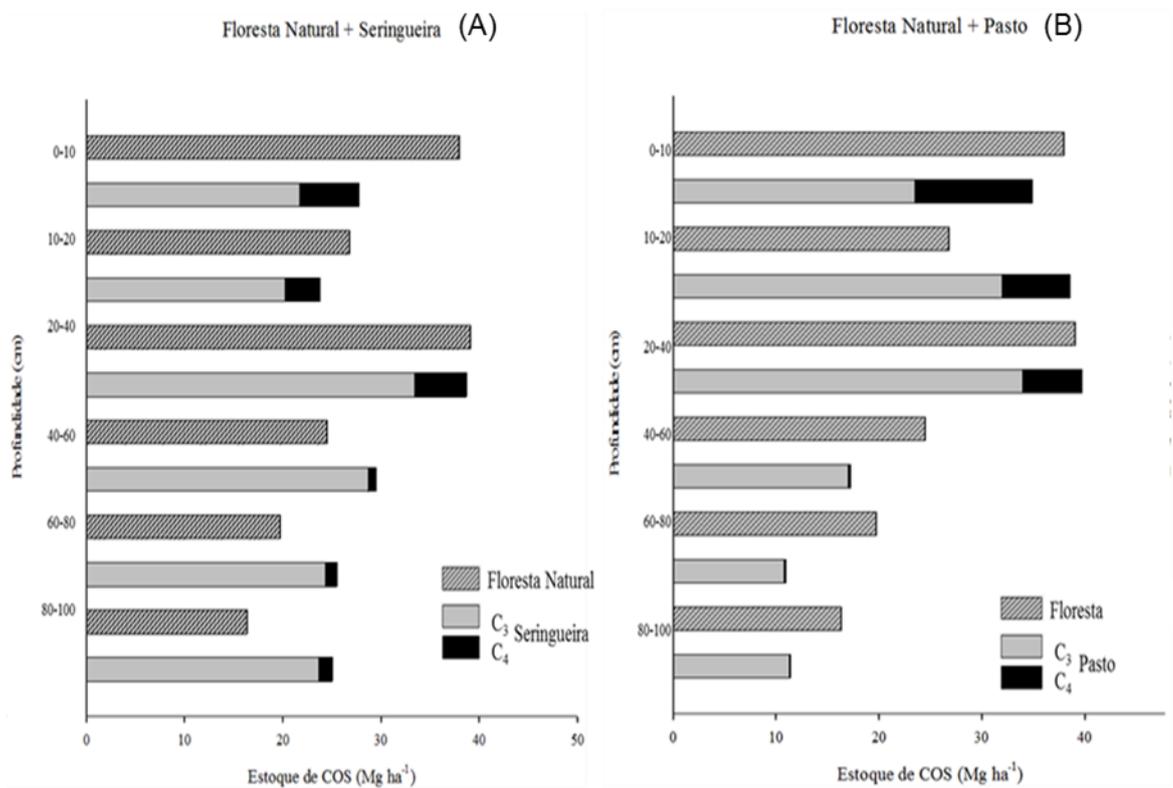


Figura 9. Contribuição dos C-C<sub>3</sub> e C-C<sub>4</sub> no estoque do COS até 100 cm de profundidade nas áreas de seringueira (A) e pasto (B) em comparação com a floresta secundária.

## 5. DISCUSSÃO

### 5.1 Estoque de COS em profundidade

O plantio de seringueira foi o que mais estocou COS em 100 cm de profundidade, sendo que a maior contribuição para esse estoque foi do C depositado a partir de 20 cm de profundidade. A entrada de C no solo em profundidade é devido a alguns fatores, como: MO dissolvida, produtos radiculares (biomassa, exsudados) e partículas transportadas da superfície (Kalbitz et al., 2005). Diversos autores afirmam, porém, que o C estocado em profundidade é em grande parte composto por C radicular, configurando-se como a principal entrada de C nas camadas mais profundas do solo (Kalbitz et al., 2005; Rasse et al., 2005; Rumpel e Kögel-Knabner, 2011; Schmidt et al., 2011; Six et al., 2002; Tisdal, 1982).

O C estocado em profundidade no plantio de seringueira é devido a MO mineralizada que foi sendo depositada na superfície na sua fase de desenvolvimento, que foi sendo carregada para o subsolo ao longo dos anos. Outro fator importante e provavelmente o que mais influenciou para o estoque em profundidade foi o sistema radicular da seringueira que é profundo e muito desenvolvido, podendo chegar a 4 m (Dea et al., 2001; Fernandes et al., 2007; Maggiotto et al., 2014). A seringueira pode chegar a produzir 46,4 Mg ha<sup>-1</sup> de biomassa radicular (Cunha et al., 2000) e suas raízes serem responsáveis por 15-22% do C da sua biomassa. Embora existam entraves e poucos estudos com sistemas radiculares já em condições de campo, as raízes são as principais

responsáveis pelo depósito de C em profundidade nos solos, devido ao seu material ser muito lignificado, o que leva a uma decomposição mais lenta que outras biomassas depositadas no solo, contribuindo para o estoque de COS em profundidade (Nair et al, 2009)

Apesar de ter estocado mais COS em profundidade que os demais sistemas, a seringueira não teve o mesmo desempenho em superfície, até 20 cm de profundidade, estocando menos COS que a floresta secundária e o pasto. Embora a diferença de estoque entre a superfície e a profundidade do solo tenha sido observada, o plantio de seringueira estudado estocou mais COS em superfície quando comparado a outros trabalhos (Diniz et al., 2015; Saha et al., 2010).

O baixo estoque de C em superfície no plantio de seringueira é decorrente da fase de maturação em que as seringueiras do estande encontravam-se, 40 anos (Cunha et al., 2000; Ronquim, 2007), pois com o aumento da idade das plantas ocorre uma redução da biomassa aérea e diminuição do aporte de resíduos vegetais que retornam ao solo nos horizontes superficiais e consequente redução do estoque de COS (De Blécourt et al., 2013; Saengruksawong et al., 2012). O maior aporte de biomassa sobre o solo em sistemas florestais/agroflorestais ocorre principalmente na fase inicial do desenvolvimento das plantas, devido a suas altas taxas de crescimento e produção de biomassa, que vão sendo depositadas sobre o solo e produzindo espessas camadas de liteira (Albrecht e Kandji, 2003; Isaac et al., 2005; Somarriba et al., 2013).

O estoque de COS ocasionado pelo aporte de biomassa na superfície do solo também foi observado no pasto em 100 cm de profundidade, que não diferiu estatisticamente da floresta secundária e foi um dos sistemas que mais estocou COS até 40 cm de profundidade. Esse estoque de COS encontrado no pasto é devido à deposição de biomassa no solo pelo sistema radicular das gramíneas, que possuem seu sistema radicular pouco profundo, podendo ser encontrado 83% dessa biomassa nos primeiros 30 cm do solo (Jacson et al., 1996; Martinez et al., 2016).

As gramíneas são muito eficientes na incorporação de MO no solo (Oliveira et al., 2016), atribuída à constante deposição de biomassa pelo seu sistema radicular e uniforme distribuição dos exsudados no solo (Oliveira et al, 2016; Trujillo et al., 2006), podendo chegar a estocar mais COS, que outros

sistemas agrícolas, devido à menor erosão superficial e deposição mais elevada de resíduos na superfície (Lal, 2003).

O mesmo resultado foi encontrado por Fisher et al. (1994), os quais observaram que pastagens com gramíneas aumentaram o estoque de COS até 100 cm de profundidade, sendo que o estoque de C foi maior na profundidade 10-15 cm. Apesar das perdas de C que ocorrem durante a conversão de floresta para pastagem (Desjardins et al., 1994), a área de pasto do estudo, com 8 anos de idade foi capaz de repor o C perdido em superfície durante o processo de conversão, já que : (i) não diferenciou da floresta secundária na profundidade 0-10 cm; (ii) foi a área que mais estocou COS na profundidade 10-20 cm e (iii) na profundidade 20-40 cm não se diferenciou estatisticamente da floresta secundária, da seringueira e do SAF seringueira + açaí.

Já em profundidade o pasto não apresentou a mesma eficiência em estocar COS que o observado na superfície, podendo essa diminuição no estoque ser atribuída ao desenvolvimento radicular das gramíneas, que é maior e mais desenvolvido na superfície do solo e diminui sua biomassa com a profundidade, variando com a espécie da gramínea, semelhante ao observado por Trujillo et al. (1997) e por Haile et al. (2008).

Assim como no pasto o SAF seringueira+açaí estocou mais COS em superfície, sendo que aproximadamente 65% do C total estocado até 100 cm encontravam-se entre 0-40 cm de profundidade.

O estoque de COS na superfície do sistema SAF seringueira+açaí é devido à grande produção de biomassa em aérea depositada pelas duas culturas (seringueira e açaí) e produção de biomassa radicular (Cunha et al., 2000; Maggiotto et al., 2014; Martins e Augusto, 2012; Santos et al., 2004; Wauters et al., 2008). A seringueira é grande produtora de raízes laterais (Dea et al., 2001), assim como o açaizeiro, que possui uma concentração radicular maior na profundidade 0-10 cm, chegando a acumular aproximadamente  $17,94 \text{ g dm}^{-3}$  de biomassa radicular em 0-40 cm de profundidade (Martins e Augusto, 2012). Quando comparada a outras culturas, como a da pupunheira e do cacauzeiro, o açaizeiro pode produzir o dobro de raízes da pupunheira e 10 vezes mais que o cacauzeiro (Martins e Augusto, 2012). Com uma grande produção de raízes na superfície, as duas culturas juntas podem ter formado uma densa camada de raízes devido ao adensamento das plantas dentro do estande de cultivo e, assim,

contribuindo para uma menor lixiviação da MO depositada no solo. A qualidade das raízes do açaizeiro também influencia em sua decomposição, pois é um material composto por componentes complexos, que diminuem sua velocidade de decomposição pelos microrganismos (Gallota e Boaventura, 2005).

O baixo estoque de COS encontrado no SAF seringueira+cacau, provavelmente foi devido ao baixo desenvolvimento do cacauzeiro na área de estudo (observação de campo), prejudicado pela baixa fertilidade do solo (Quadro 2), já que a cultura possui elevada exigência nutricional (Silva Neto et al., 2001) e a adubação foi realizada apenas no plantio das culturas, o que pode ter refletido em baixa produção de biomassa vegetal, tanto aérea, quanto radicular, pela cultura, que era a planta em maior densidade por área dentro do sistema.

Então, com o baixo desenvolvimento do cacauzeiro a seringueira em menor densidade por área, não foi suficiente para suprir a deposição de biomassa sobre o solo, uma vez que é uma cultura semidecídua, ou seja, sofre o processo de desfolha apenas duas vezes ao ano, diferente do cacauzeiro que está sempre depositando material vegetal sobre o solo, pois quando bem manejado, é um grande produtor de biomassa aérea e estocador de COS (Albrecht e Kandji, 2003; Barreto et al., 2011; Jacobi et al., 2014).

## 5.2 Distribuição dos agregados e carbono orgânico do solo nas classes de agregados

A quantidade de macroagregados superior à de microagregados e de silte+argila encontrados até 40 cm de profundidade no plantio de seringueira, SAF seringueira+açaí e SAF seringueira+cacau é devido ao constante aporte de MO pelos sistemas, que é um dos principais agentes de formação dos macroagregados, que associado à ausência de revolvimento do solo, favorece a formação e estabilização dos macroagregados (Tisdall e Oades, 1982; Oades, 1984; Six et al 2004). A constante deposição de resíduo vegetal, também proporciona o fornecimento dos compostos orgânicos transitórios (polissacarídeos e produtos microbianos) e temporários (raízes e hifas de fungos) que são os principais responsáveis pela estabilização desses agregados (Tisdall e Oades, 1982; Bayer e Mielnickzuk, 1997). Isso mostra que, apesar de não ter ocorrido diferença entre os sistemas, os SAFs foram estatisticamente semelhantes à floresta secundária, o que demonstra sua eficiência em manter a qualidade do

solo pelo constante aporte de MO. Diante disso, o uso de SAFs como alternativa na agricultura, podem ser considerados sistemas conservacionistas, que contribuem para a sustentabilidade de um sistema.

No pasto a quantidade de macroagregados encontrados até 20 cm de profundidade, não diferiu dos SAFs nem da floresta secundária, isso é devido, principalmente, ao grande aporte de matéria orgânica depositada pelo sistema radicular dessas plantas, uma vez que de acordo com Jackson et al., (1996), 83% da biomassa radicular das gramíneas encontram-se nos primeiros 30 cm do solo. Esse tipo de vegetação, possui um sistema radicular denso e bem desenvolvido, com grande crescimento e renovação, o que favorece as ligações entre as partículas minerais do solo e os compostos orgânicos, bem como liberação de exsudatos radiculares, que funcionam como agentes agregantes (Bayer e Mielniczuk, 1997; Six et al., 2004).

Já em profundidade (a partir de 40 cm), o pasto não se diferenciou estatisticamente da floresta secundária até 100 cm, ou seja, os macroagregados presentes em profundidade possivelmente foram formados pelo sistema florestal presente na área antes da instalação do sistema, que pode ser explicado através da origem do C (item 5.4). Para os microagregados observou-se um aumento com a profundidade até 80 cm e uma pequena diminuição aos 100 cm, podendo ser decorrente do aumento do teor de argila com a profundidade onde os óxidos passam a ser os principais fatores de estabilização e formação dos agregados e as forças envolvidas na formação dos microagregados aumentam com o teor de argila do solo (Oades e Waters, 1991).

Diferente de todos os sistemas estudados, o SAF seringueira+açai só apresentou quantidade de microagregados maior que a de macroagregados a partir dos 80 cm de profundidade. Este resultado pode ser devido ao aporte contínuo de matéria orgânica promovida pelo sistema radicular das duas culturas (seringueira e açai) associadas, uma vez que a seringueira possui um sistema radicular profundo, podendo chegar a 4 m e uma grande produção de biomassa radicular (Fernandes et al., 2007; Ferreira e Cunha et al., 2000). Já o açazeiro, apesar das pesquisas à respeito de sua biomassa radicular serem bastante escassas, Martins e Augusto (2012) relataram que essa cultura possui uma grande produção de biomassa radicular, chegando a ser 2 vezes maior que a da pupunheira e 10 vezes maior que a do cacauzeiro.

Sousa et al. (2016), em estudo da distribuição do sistema radicular da palmeira babaçu, da mesma família do açaizeiro (*Arecaceae*), mostraram que a mesma contribui com aproximadamente 29% de raízes no total de biomassa radicular em 1m de profundidade, atingindo mais de 40% na profundidade 70-80 cm. Assim, pode entender que os sistemas radiculares da seringueira somado aos do açaizeiro estão contribuindo fortemente com depósito de matéria orgânica em profundidade.

A MO depositada pelas raízes são mais resistentes que a depositada pela biomassa aérea das plantas, pois são ricamente lignificadas, ricas em polifenóis e substâncias complexas (Gallota et al, 2005; Rasse et al, 2005). Esse material é decomposto mais lentamente pelos microrganismos realizando, o que ajuda na manutenção dos macroagregados (Six e Paustian et al., 2000). Assim, pode concluir que a MO depositada pelo sistema radicular é o fator principal para a formação dos macroagregados em profundidade no SAF seringueira+açaí.

Essa mesma influência não foi observada nos demais sistemas com seringueira, possivelmente por dois motivos: (i) no sistema seringueira o número de plantas/ha era menor que no SAF seringueira+açaí; (ii) no SAF seringueira+cacau, as culturas tiveram baixo desenvolvimento, o que refletiu diretamente no aporte de MO.

Quanto ao estoque de C nas classes, pode observar que os macroagregados foram a fração que mais estocou C, com aproximadamente 49%. Esse estoque nos macroagregados foi maior, de forma geral, em superfície, devido à quantidade desses agregados ser maior em superfície, pela deposição contínua de biomassa pelos sistemas na superfície do solo, maior quantidade de raízes finas na superfície, que através da liberação de exsudatos contribuem para maior estabilização dos agregados e acumulação do C, tudo isso associado ao manejo conservacionista, que evita o rompimento dos macroagregados, liberando os microagregados do seu interior e disponibilização da MO (Chimento e Amaducci, 2015; Rasse et al., 2005).

O C estocado no macroagregado no plantio de seringueira e SAF seringueira+açaí foi maior que nas demais frações até 100 cm de profundidade. Com exceção apenas na profundidade 60-80 cm para a seringueira. Essa quantidade de C nos macroagregados para esse sistema pode estar relacionada ao sistema radicular da seringueira e do açaí, que mantiveram a deposição de

biomassa em profundidade, uma vez que as raízes são a principal fonte de C em profundidade devido à constituição de seu material, que é mais lignificado que outros tipos de biomassa, contribuindo para o estoque de C em profundidade (Nair et al., 1999; Rumpel e Kögel-Knabner, 2011).

Já o C estocado nos microagregados, de modo geral, aumentou com a profundidade, esse aumento foi devido ao aumento de teor de argila em profundidade, onde os óxidos presentes passam a ser o fator principal para a estabilização do C no agregado, sendo menos dependentes da deposição da MO (Oades e Waters, 1991; Six et al., 2004). A quantidade de microagregados ser maior em profundidade também pode ser decorrente ao mínimo manejo das áreas, que evitam a quebra dos macroagregados, que vão ser rompidos muito lentamente pela ação dos microrganismos, havendo a liberação dos microagregados presentes dentro dos macroagregados (Oades, 1984; Oades e Waters, 1991).

### 5.3 Carbono ocluso

A maior quantidade de C ocluso nos macroagregados em superfície é devido à quantidade de resíduos que estão sendo depositados constantemente na superfície do solo pelos sistemas através da biomassa aérea, da biomassa radicular das plantas e pelo tipo de manejo adotado, que preza o não revolvimento do solo, contribuindo na estabilização e manutenção dos macroagregados (Bayer e Miernicczuk, 1997).

O resíduo vegetal que é constantemente depositado pelas plantas, mais recente e mais lábil, funciona como agente ligante e centro de nucleação onde os microagregados formados a partir da ligação de compostos orgânicos e inorgânicos se unem formando esses macroagregados (Tisdall e Oades, 1992). Com o mínimo de revolvimento desses solos, os macroagregados mantêm-se intactos por mais tempo, sofrendo a ação dos microrganismos de forma mais lenta, o que prolonga seu rompimento e conseguinte liberação dos microagregados de seu interior e da MO protegida. Essas razões explicam o porquê do SAF seringueira+acaí possuírem, em 100 cm de profundidade, a maior quantidade de C ocluso em seus macroagregados. Esse sistema provavelmente apresentou um maior aporte de MO no solo, em relação aos outros SAFs, devido à quantidade de plantas por área, 952 plantas/ha. Apesar do sistema

seringueira+cacau, apresentar maior quantidade de plantas, 1322 plantas/ha, o mesmo não teve desenvolvimento suficiente para que ocorresse um grande aporte de MO.

Já em relação aos microagregados foi observado o oposto dos macroagregados, onde a quantidade de C ocluso foi maior com o aumento da profundidade, isso se deve à quantidade de microagregados serem maiores em profundidade, devido ao teor de argila do solo, que também aumentou com a profundidade, demonstrando que a presença de óxidos nesses solos promove a formação de complexos organominerais, que possuem elevada energia de ligação fundamental para a formação e estabilização dos microagregados (Inda Junior et al., 2007; Oades et al., 1989), conseqüentemente maior estabilidade do C, uma vez que os microagregados são mais estáveis que os macroagregados.

#### 5.4 Origem do carbono

Os valores de  $\delta^{13}\text{C}$  encontrados nos sistemas estudados mostram a predominância de COS derivados de plantas de ciclo  $\text{C}_3$ , pois os valores de  $\delta^{13}\text{C}$  encontrados na floresta secundária, na seringueira e no pasto, variaram de -27,79 a -22,85 ‰, valores dentro da faixa adotada para carbono de origem  $\text{C}_3$ , que é entre -20 a -35 ‰. A variação do  $\delta^{13}\text{C}$  ocorreu entre a superfície e a profundidade nos três sistemas, sendo que a partir de 60 cm de profundidade os sistemas apresentaram valores de  $\delta^{13}\text{C}$  próximos, mostrando que os sistemas de pasto e seringueira, antes de suas implantações, eram compostos por plantas de ciclo  $\text{C}_3$  (floresta), demonstrando que a fonte de MO nos sistemas era uma floresta, como descrito pelo histórico das áreas (ver material e métodos) (Sisti et al., 2004).

A variação encontrada do  $\delta^{13}\text{C}$  na floresta secundária entre a superfície e a profundidade é devido à decomposição da MO pelos microrganismos, que geram um material mais rico em  $^{13}\text{C}$ , pois os microrganismos preferencialmente usam o  $^{12}\text{C}$  para a respiração e o C presente em profundidade também é um carbono mais antigo e mais humificado, acarretando em um material mais enriquecido  $^{13}\text{C}$  (Balesdent e Mariott, 1987; Lopes e Benedito-Cecilio, 2002; Tarré et al., 2001).

Já no plantio de seringueira os valores de  $\delta^{13}\text{C}$  maiores foram encontrados na superfície, até 40 cm de profundidade, isso é devido à mistura de C- $\text{C}_3$  e C- $\text{C}_4$

proporcionada pelas diferentes fontes de MO presentes nesse sistema, como: a seringueira ( $C_3$ ) e a gramínea ( $C_4$ ) presente no sub-bosque do sistema (Rhoades et al., 2000).

As gramíneas presentes no sub-bosque do plantio de seringueira são responsáveis por apenas 11%, aproximadamente, do total de COS estocado na área, sendo que a maior parte está concentrada na superfície, até 40 cm de profundidade. A contribuição do sub-bosque para o estoque de COS na área com seringueira é devido, provavelmente, ao aporte de matéria orgânica depositado pelas gramíneas principalmente através do sistema radicular, que contém uma constante rizodeposição e uniforme distribuição dos exsudatos radiculares no solo (Lal, 2002; Trujillo et al., 2006).

Assim como no plantio de seringueira, o pasto também apresentou valor de  $\delta^{13}C$  maior na superfície (-22,85 ‰), devido à mistura de COS de fontes diferentes  $C_3$  e  $C_4$ , porém, diferente do plantio de seringueira, no pasto a entrada de resíduos de plantas de ciclo  $C_3$  não está mais ocorrendo e o depósito de resíduos das gramíneas começa a ser constante proporcionando um aumento progressivo do C- $C_4$  na superfície. Na profundidade 0-10 cm o  $C_4$  contribuiu com aproximadamente 33% do COS estocado e em 10-20 cm de profundidade, a contribuição foi de aproximadamente 17%, embora nessa profundidade o pasto tenha estocado aproximadamente 26% a mais de COS que a floresta secundária, esse C não é totalmente proveniente do material vegetal depositado pelas gramíneas, mas também de C remanescente da floresta original. Em profundidade, a partir de 40 cm, a contribuição da MO proveniente da gramínea é pequena, não excedendo 1% (Figura 9).

O uso de técnicas isotópicas no estudo da dinâmica da MO nos mostra claramente o quanto cada cultura está contribuindo para o estoque do COS dentro do sistema e quanto tempo o sistema atual demora para repor o COS perdido no processo de transição de sistemas, seja de  $C_3$  para  $C_4$  ou vice-versa.

## 6 RESUMO E CONCLUSÕES

O estudo foi realizado em cinco sistemas: floresta secundária, pasto, plantio de seringueira, SAF seringueira+açaí e SAF seringueira+cacau. As áreas encontravam-se no município de Una no sul do Estado da Bahia e os objetivos do estudo foram: (i) avaliar a capacidade de sistemas agroflorestais com seringueira em estocar carbono orgânico no solo em 100 cm de profundidade; (ii) avaliar a distribuição e o acúmulo de C nos macroagregados, microagregado e fração silte+argila, até 100 cm de profundidade e (iii) avaliar o estoque de C ocluso nos agregados sob os diferentes sistemas estudados e (iv) avaliar a contribuição da cobertura vegetal da seringueira e do pasto no estoque de C, após alguns anos de instalação através do uso do isótopo  $^{13}\text{C}$ . O sistema seringueira foi o que mais estocou C orgânico no solo em profundidade, quanto às frações do solo, os macroagregados foram a mais presente, principalmente em superfície. Já o C estocado nos agregados foi maior na fração macro, assim como a quantidade de C ocluso, que também foi maior nos macroagregados, que nos microagregados.

Os sistemas agroflorestais com seringueira possuem uma grande capacidade de estocar C orgânico no solo. A seringueira, quando usada sozinha como cultura teve maior capacidade de estocar o COS em profundidade e quando consorciada, o estoque de COS é maior na superfície. Apesar do SAF seringueira+cacau não ter tido grandes resultados, devido ao baixo desenvolvimento das culturas, o SAF seringueira+açaí demonstra essa capacidade do consórcio da seringueira com outra cultura em estocar COS.

A adoção de SAFs como alternativa aos sistemas agrícolas convencionais, proporciona maior quantidade e estabilidade dos macroagregados, que foi a fração encontrada em maior quantidade nos sistemas estudados, principalmente na superfície, bem como maior reservatório de COS, em relação aos microagregados e fração silte+argila. Esse resultado corrobora para a afirmação de que os sistemas conservacionistas, através da manutenção dos resíduos no solo e baixo revolvimento funcionam como meios de conservação e armazenamento de C no solo.

O estudo da dinâmica do C no solo é melhor entendida quando utilizado o mecanismo de origem do C, através do isótopo  $^{13}\text{C}$ , uma vez que através da ferramenta pode interpretar melhor a origem do C dentro dos sistemas. Sem a utilização do método o estudo mostraria que o pasto é um grande estocador de COS, mas na verdade, a maioria do C estocado nesse sistema ainda é remanescente da floresta que compunha a área antes de sua instalação.

Os resultados obtidos mostram que a seringueira possui grande potencial para estocar COS, quando usada solteira e na forma de consórcio com outras culturas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdo, M. T. V. N.; Martins, A. L. M.; Finoto, E. L. (2012) Implantação de sistema agroflorestal com seringueira, urucum e acerola sob diferentes manejos. *Pesquisa & Tecnologia*, v. 9, n. 2.
- Albrecht, A.; Kandji, S. T. (2003) Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 99, n. 1-3, p. 15–27.
- Alves, B.J.R., Zotarelli, L., Jantalia, C.P., Boddey, R.M., Urquiaga, S. (2006) Emprego de isótopos estáveis para o estudo do carbono e nitrogênio no sistema solo-planta. In: Aquino, A.M.; Assis, R.L. (eds) *Processos biológicos no sistema solo-planta: ferramentas para uma agricultura sustentável*. Brasília, 1: 343-368.
- Andrade, D. C.; Romeiro, A. R. (2009) Capital natural , serviços ecossistêmicos e sistema econômico : rumo a uma “ Economia dos Ecossistemas ” Capital natural , serviços ecossistêmicos e sistema econômico : rumo a uma “ Economia dos Ecossistemas ”.p.24,2009.
- Baldock, J. A., Skjemstad, J. O. (2000) Role of the soil matrix and minerals in protecting natural organic materials against biological attack. *Organic Geochemistry*, 31: 697-710
- Balesdent, J., Mariotti, A., Guillet, B. (1987) Natural <sup>13</sup>C abundance as a tracer for studies of soil organic matter dynamics. *Soil biology and biochemistry*, 19 (1): 25-30.

- Balesdent, J., Mariotti, A. (1996) Measurement of soil organic matter turnover using  $^{13}\text{C}$  natural abundance. In: Boutton, T.W., Yamasaki S. (Eds.) *Mass Spectrometry of Soil*, New York, 83-111.
- Barreto, P.A.B., Gama-Rodrigues, E.F., Gama-Rodrigues, A.C., Fontes, A.G., Polidoro, J.C., Moç,o M.K.S., Machado, R.C.R., Baligar, V.C. (2011) Distribution of oxidizable organic C fractions in soils under cacao agroforestry systems in Southern Bahia, Brazil. *Agroforestry Systems*, 81:213-220.
- Batjes, N.H. (1998) Mitigation of atmospheric  $\text{CO}_2$  concentrations by increased carbon sequestration in the soil. *Biology and Fertility of Soil*. v.27, p.230-235.
- Bayer, C.; Mielniczuk, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G.A. & CAMARGO, F.A.O., eds. *Fundamentos da matéria orgânica do solo. Ecossistemas tropicais e subtropicais*. Porto Alegre, Genesis, 1999. p.9-26.
- Bernoux, M.; Cerri, C. C.; Neill, C.; De Moraes, J. F. (1998) The use of stable carbon isotopes for estimating soil organic matter turnover rates. *Geoderma*, v. 82, n. 1-3, p. 43–58.
- De Blécourt, M.; Brumme, R.; Xu, J.; Corre, M. D.; Veldkamp, E. (2013) Soil Carbon Stocks Decrease following Conversion of Secondary Forests to Rubber (*Hevea brasiliensis*) Plantations. *PLoS ONE*, v. 8, n. 7 .
- Cerri, C.E.P.; Cerri, C.C.; Bernoux, M.; Volkoff, B.; Rondón, M.A. Potencial of soil carbon sequestration in the Amazonian Tropical Rainforest. In.: Santos, G.A.; Silva, L.S.; Canelas, L.P.; Camargo, F.A.O. *Fundamentos da Matéria Orgânica do Solo: Ecossistemas Tropicais e Subtropicais*. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p.325-358.
- Chimento, C.; Amaducci, S. (2015) Characterization of fine root system and potential contribution to soil organic carbon of six perennial bioenergy crops. *Biomass and Bioenergy*, v. 83, p. 116–122.
- Christensen, B. T. (1985) Carbon and Nitrogen in Particle Size Fractions Isolated from Danish Arable Soils by Ultrasonic Dispersion and Gravity-Sedimentation. *Acta Agriculturae Scandinavica*, v. 35, n. 2, p. 175–187.
- Christensen, B.T. (2000) *Organic matter in soil – structure, function and turnover*. Tjele: DIAS Report N. 30, Plant Production, 95p.
- Cotta, M. K.; Gonçalves, L. A.; Nogueira, H. (2008) Biomass Quantification and Emission Reduction Certificates for Rubber - Cocoa Intercropping. *Revista Árvore*, v. 32, n. 8, p. 969–978.

- Cunha, T. J. F.; Blancaneaux, P.; Calderano Filho, B. (2000) Influência da diferenciação pedológica no desenvolvimento da seringueira no município de Oratórios, MG. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, v. 35, n. 1, p. 145–155.
- Dawoe, E.K., Issac, M.E., Quashie-Sam, J (2010) Litterfall and litter nutrient dynamics under cocoa ecosystems in lowland humid Ghana. *Plant and Soil*, 330:55-64.
- Dea, G. B.; Assiri, A. A.; Gabla, O. R.; Boa, D. (2001) Influence of soil preparation method on root and vegetative growth of rubber tree (*Hevea brasiliensis*) in the southwest côte d'ivoire. *Soil and Tillage Research*, v. 59, n. 1-2, p. 3–11.
- Dechert, G., Veldkamp, E., Brumme, R. (2005) Are partial nutrient balances suitable to evaluate nutrient sustainability of land use systems? Results from a case study in Central Sulawesi, Indonesia. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 72:201–212.
- Desjardins, T.; Andreux, F.; Volkoff, B.; Cerri, C. C. (1994) Organic carbon and <sup>13</sup>C contents in soils and soil size-fractions, and their changes due to deforestation and pasture installation in eastern Amazonia. *Geoderma*, v. 61, n. 1-2, p. 103–118.
- Diniz, A. R.; Pereira, M. G.; Balieiro, F. DE C. (2015) Contrasts in Areas of Rubber Tree Clones in Regard to Soil and Biomass Carbon Stocks. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 39, n. 5, p. 1378–1385.
- Dixon, R. K. (1995) Agroforestry Systems - Sources or Sinks of Greenhouse Gases. *Agroforestry Systems*, v. 31, n. 2, p. 99–116, 1995.
- Dolan, M.S.; Clapp, C.E.; Allmaras, R.R.; Baker, J.M.; Molina, J.A.E. (2006) Soil organic carbon and nitrogen in a Minnesota soil as related to tillage, residue and nitrogen management. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v 89, p. 221–231.
- Doran, J.W. Soil quality and sustainability. In: SANTOS, G.A.; SILVA, L.S.; CANELLAS, L.P.; CAMARGO, F.A.O. *Fundamentos da Matéria Orgânica do Solo: Ecossistemas Tropicais e Subtropicais*. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p. 1-5.
- Ellert, B.H., Bettany, J.R. (1995) Calculation of organic matter and nutrients stored

- in soils under contrasting management regimes. *Canadian Journal of Soil Science*, 75:529-538.
- Elliot, E.T. (1986) Aggregate structure and carbon, nitrogen and phosphorus in native and cultivated soils. *Soil Science Society of America Journal*. 50:627–633.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (1997). *Manual de métodos de análises de solo*. 2.ed. Rio de Janeiro.
- Eswaran, H.; van den Berg, E.; Reich, P. (1993) Organic carbon in soils of the world. *Soil Science Society American Journal*. v.57.p.192-194.
- Farquhar, G.D., Ehleringer, J.R., Hubick, K.T. (1989). Carbon isotope discrimination and photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 40: 503-537.
- Fernandes, T. J. G. F.; Soares, C. P. B.; Jacovine, L. A. G.; Alvarenga, A. De P.(2007) Quantificação do carbono estocado na parte aérea e raízes quantification of carbon stored in the aerial part and roots of 12-year-old hevea sp., in the “zona da mata mineira”. *Revista Árvore*, v. 31, p. 657–665, 2007.
- Fisher, M. J. .; Rao, I. M. .; Ayarza, M. A. .; et al. Carbon Storage by introduced deep-rooted grasses in the South American savannas. *Nature*, v. 371, 1994.
- Fontes, A., Gama-Rodrigues, A.C., Gama-Rodrigues, E.F., Sales, M.V.S., Costa, M.G., Machado, R.C.R. (2014) Nutrient stocks in litterfall and litter in cocoa agroforests in Brazil. *Plant and Soil*, 383: 313-335.
- Gallota, A. L. Q. De A.; Boaventura, M. A. D. (2005) Constituintes Químicos da Raiz e do talo da folha de açaí (Euterpe precatoria MART., ARECACEAE). *Quimica Nova*, v. 28, n. 4, p. 610–613.
- Gama-Rodrigues, E.F., Nair, P.K.R., Nair, V.D., Gama-Rodrigues, A.C., Baligar, V., Machado, R.C.R. (2010) Carbon storage in soil size fractions under two cacao agroforestry systems in Bahia, Brazil. *Environmental Management*, 45:274–283.
- Garrity, D.P. (2004) Agroforestry and the achievement of the millennium development goals. *Agroforestry System*. v.61, p.5-17.
- Haile, S. G.; Nair, P. K. R.; Nair, V. D. (2008) Carbon Storage of Different Soil-Size Fractions in Florida Silvopastoral Systems All rights reserved. No part of this periodical may be reproduced or transmitted in any form or by any means,

- electronic or mechanical, including photocopying, recording, or . *J. Environ. Qual.*, v. 37, n. 5, p. 1789–1797.
- Ilinda Junior, A.V., Bayer, C., Conceição, P.C., Boeni, M., Salton, J.C., Tonin, A.T. (2007) Variáveis relacionadas à estabilidade de complexos organo-minerais em solos tropicais e subtropicais brasileiros. *Ciência Rural*, 37:1301-1307.
- IPCC (2014) Climate Change 2014: Synthesis Report. Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC <http://ipcc.ch>
- Isaac, M.E., Gordon, A.M., Thevathasan, N., Oppong, S.K., Quashie-Sam, J. (2005) Temporal changes in soil carbon and nitrogen in west African multistrata agroforestry systems: a consequence of pools and fluxes. *Agroforestry Systems*, 65:23-31.
- Isaac, M.E., Timmer, V.R., Quashie-Sam, S.J. (2007) Shade tree effects in an 8-year-old cocoa agroforestry system: biomass and nutrient diagnosis of *Theobroma cacao* by vector analysis. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 78:155-165.
- Jackson, R. B.; Canadell, J. .; Ehleringer, J. R. (1996) A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. *Oecologia*, v. 108, p. 389–411.
- Jacobi, J.; Andres, C.; Schneider, M.(2014) Carbon stocks, tree diversity, and the role of organic certification in different cocoa production systems in Alto Beni, Bolivia. *Agroforestry Systems*, v. 88, n. 6, p. 1117–1132.
- Jastrow, J.D.; Miller, R.M. (1998) Soil aggregate stabilization and carbon sequestration: Feedbacks through organomineral associations. In: IAI, R.; Kimble, J.M.; Follet, R.F.; Stewart, BA, eds. *Soil processes and the carbon cycle Boca Raton*, CRC Press p.207-223.
- Jobbágy, E. G.; Jackson, R. B. (2000) Vertical Distribution of Soil Organic Carbon and Its. *Ecological Applications*, v. 10, n. 2, p. 423–436.
- Jose, S. (2009) Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. *Agroforestry Systems*, 76:1-10.
- Kalbitz, K.; Schwesig, D.; Rethemeyer, J.; Matzner, E. (2005) Stabilization of dissolved organic matter by sorption to the mineral soil. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 37, n. 7, p. 1319–1331.
- Lal, R.; Kimble, J.; Levine, E.; Stewart, B.A. (1995) Soils and global Change. *Advances in soil Science*. Florida, p.267.

- Lal, R., (2002). Soil carbon dynamics in cropland and rangeland. *Environ. Pollut.* 116, 353–362.
- Lal, R. (2003) Global Potential of Soil Carbon Sequestration to Mitigate the Greenhouse Effect, *Critical Reviews.Plant Sciences*, 22:2, 151-184.
- Lal, R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. (2004) *Encyclopedia of Energy*, v. 123, n. 1-2, p. 289–298.
- Lal,R. (2008) Carbon sequestration *Philosophical Transactions of the Royal Society B*. London, v. 363, p.815-830.
- 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. (2006a) Soil organic carbon dynamics following afforestation of degraded pastures with eucalyptus in Southeastern Brazil. *Forest Ecology Management*, 235:219-231.
- Ludwig, B.; John, B.; Elerbrock, R.; Kaiser, M.; Flessa, H. (2003) Satabization of carbon form maize in a sandy soil in a long-term experiment. *European Journal of Soil Science*, v. 54, p.117-126.
- Lützwow, M.V., Koegel-Knabner, I., Ekschmitt, K., Matzner, E., Guggenberger, G., Marschner, B., Flessa, H. (2006) Stabilization of organic matter in temperate soils: Mechanisms and their relevance under different soil conditions: A review. *European Journal of Soil Science*, 57:426-445.
- Maggiotto, S.R., Oliveira, D., Marur, C.J., Stivari, S.M.S., Leclerc, M., Wagner-Riddle, C. (2014). Potential carbon sequestration in rubber tree plantations in the northwestern region of the Paraná State, Brazil. *Acta Scientiarum, Agronomy* 36:239-245.
- Martinez, C.; Alberti, G.; Cotrufo, M. F. (2016) Belowground carbon allocation patterns as determined by the in-growth soil core <sup>13</sup>C technique across different ecosystem types. *Geoderma*, v. 263, p. 140–150.
- Martins, P. F. D. S.; Augusto, S. G. (2012) Propriedades físicas do solo e sistema radicular do cacaueteiro, da pupunheira e do açazeiro na Amazônia oriental. *Revista Ceres*, v. 59, n. 5, p. 723–730.
- Mondini, C.; Sequi, P. (2008) Implication of soil C sequestration on sustainable agriculture and enviromental. *Wast Management, Padova*, v. 28, n 4, p. 678-684.

- Monroe, P.H.M.; Gama-Rodrigues, E.F.; Gama-Rodrigues, A.C. (2016) Soil carbon stocks and origin under different cacao agroforestry systems in Southern Bahia, Brasil. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 221: 99-108.
- Montagnini, F., Nair, P.K.R. (2004) Carbon sequestration: An underexploited environmental benefit of agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 61:281-295.
- Moraes, J.F.L., Volkoff, B., Cerri, C.C., Bernoux, M. (1996) Soil properties under Amazon forest and changes due to pasture installation in Rondônia, Brazil. *Geoderma*, 70:63-81.
- Muñoz, F.; Beer, J. (2001) Fine root dynamics of shaded cacao plantations in Costa Rica. *Agroforestry Systems*, v. 51, n. 2, p. 119–130.
- Nair, P.K.R. (1993) *Introduction to Agroforestry*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 499p.
- Nair, P.K.R., Gordon, A.M., Mosquera-Losada, M.R. (2008) Agroforestry. In: Jorgensen SE, Fath BD (eds.), *Ecological Engineering, Encyclopedia of Ecology*, 1:101–110.
- Nair, P.K.R., Nair, V.D., Kumar, B.M., Haile, S.G. (2009) Soil carbon sequestration in tropical agroforestry systems: A feasibility appraisal. *Environmental Science and Policy*, 12:1099-1111.
- Oades, J.M. (1984) Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. *Plant and Soil*, 76:319-337.
- Oades, J.M., Waters, A.G. (1991) Aggregate hierarchy in soils. *Australian Journal of Soil Research*, 29:815-82.
- Oelbermann, M.; Voroney, R. P. (2007) Carbon and nitrogen in a temperate agroforestry system: Using stable isotopes as a tool to understand soil dynamics. *Ecological Engineering*, v. 29, n. 4, p. 342–349.
- Paustian, K.; Six, J.; Elliott, E.T.; Hunt, H. W. (2000) Management options for reducing CO<sub>2</sub> emissions from agricultural soils. *Biogeochemistry*. v.48, p.147-163.
- Pillon, C.N.; Mielnickzuc, J.; Neto Martins, L (2002) Dinâmica da matéria orgânica no ambiente. *Embrapa Clima Tempo*, Pelotas. p. 41.
- Rasse, D. P. ; Rumpel, C.; Dignac, M. F. (2005) Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation. *Plant and Soil*, v. 269, n. 1-2, p. 341–356.

- Reeves, D.W. (1997) The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. *Soil and Tillage Research.*, 43:131-167
- Rhoades, C. C. .; Eckert, G. E. .; Coleman, D. C. (2000) Soil carbon differences among forest, agriculture, and secondary vegetation in lower montane Ecuador. *Ecological Applications*, v. 10, n. 2, p. 497–505.
- Ronquim, C. C. (2007) Dinâmica espaço temporal do carbono aprisionado na fitomassa dos agroecossistemas do Nordeste do Estado de São Paulo. *Ecologia*, Campinas: Embrapa.
- Roscoe, R.; Buurman, P.; Velthorst, E. J. (2000) Disruption of soil aggregates by varied amounts of ultrasonic energy in fractionation of organic matter of a clay Latosol: Carbon, nitrogen and  $\delta^{13}\text{C}$  distribution in particle-size fractions. *European Journal of Soil Science*, v. 51, n. September, p. 445–454.
- Roshetko, M.; Delaney, M.; Hairiah, K.; Purnomosidhi, P. (2002) carbon stocks in Indonesian homegarden systems: can smallholder systems be targeted for increased carbon storage? *American Journal of Alternative Agriculture*. v. 17, p. 125-137.
- Rumpel, C.; Kögel-Knabner, I. (2011) Deep soil organic matter-a key but poorly understood component of terrestrial C cycle. *Plant and Soil*, v. 338, n. 1, p. 143–158.
- Sá, M. A. C. De; Lima, J. M. De; Silva, M. L. N.; Dias Junior, M. D. S.(2000) Comparação entre métodos para o estudo da estabilidade de agregados em solos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 35, n. 9, p. 1825–1834
- Saengruksawong, C.; Khamyong, S.; Anongrak, N.; Pinthong, J. (2012) Growths and carbon stocks in rubber plantations on chakkarat soil series, Northeastern Thailand *Suranaree Journal Science Technology*, v. 19, n. 4, p. 271–278.
- Saha, S.K., Nair, P.K.R., Nair, V.D., Kumar, B.M. (2010). Carbon storage in relation to soil size fractions under some tropical tree-based land-use systems. *Plant and Soil*, 328: 433 - 446.
- Sanchez, P. A. (2000) Linking climate change research with food security and poverty reduction in the tropics. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 82, n. 1-3, p. 371–383.

- Santos, S. R. M. Dos; Miranda, I. D. S.; Tourinho, M. M. (2004) Análise florística e estrutural de sistemas agroflorestais das várzeas do rio Juba, Cametá, Pará. *Acta Amazonica*, v. 34, n. 2, p. 1–8.
- Sarkhot, D.V., Jokela, E.J., Comerford, N.B. (2008) Surface soil carbon size density fractions altered by loblolly pine families and forest management intensity for a Spodosol in the southeastern US. *Plant and Soil*, 307:99–111.
- Santos, G.A.; Silva, L.S.; Canellas, L.P.; Camargo, F.A.O. (2008). *Fundamentos da Matéria Orgânica*. 2ª ed. Gabriel de Araujo Santos. Porto Alegre, p.654.
- Scharpenseel, H.W. (1997) Preface to workshop 'Management of carbon in tropical soils under global change: Science, practice and policy'. *Geoderma*, v. 79, p.1-8.
- Schmidt, M. W. I.; Torn, M. S.; Abiven, S. (2011) Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature*, v. 478, n. 7367, p. 49–56.
- Schoeneberger, M. M. (2009) Agroforestry: Working trees for sequestering carbon on agricultural lands. *Agroforestry Systems*, v. 75, n. 1, p. 27–37.
- Schroth, G.; Lehmann, J.; Rodrigues, M. R. L.; Barros, E.; Macêdo, J. L. V. (2001) Plant-soil interactions in multistrata agroforestry in the humid tropics. *Agroforestry Systems*, v. 53, p. 85–102.
- Sharrow, S.H.; Ismail, S. (2004) Carbon and nitrogen stores in agroforests, tree plantations and pastures in western Oregon, USA. *Agroforest Systems*. v.60, p. 123-130.
- Silva Neto, P. J. D.; Matos, P. G. .; Martins, A. C. S.; Silva, A. P. (2001) Sistema de produção de cacau para Amazonia brasileira. *Journal of Chemical Information and Modeling*, Belém: CEPLAC.
- Sisti, C. P. J.; Dos Santos, H. P.; Kohhann, R. (2004) Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. *Soil and Tillage Research*, v. 76, n. 1, p. 39–58.
- Six, J.; Feller, C.; Karolien, D. (2002) Role of phosphate-solubilizing microorganisms in sustainable agriculture-A Review. *Agronomic Sustainable Development*, p. 755–775.
- Six, J.; Paustian, K.; Elliott, E. T.; Combrink, C. (2000) Soil Structure and Organic matter: I. Distribution of Aggregate-Size Classes and Aggregate-Associated Carbon. *Soil science American Journal*, v. 64, p. 681–689.

- Somarriba, E. (1992) Revisiting the past: an essay on agroforestry definition. *Agroforestry Systems*, v. 19, n. 3, p. 233–240.
- Somarriba, E.; Cerda, R.; Orozco, L.(2013) Carbon stocks and cocoa yields in agroforestry systems of Central America. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 173, p. 46–57.
- Sousa, J. T. R. De; Moraes, F. H. R.; Gehring, C. (2016) Root biomass in a shifting cultivation system in the eastern periphery of Amazonia , and contribution of the babassu. *Agroforest System*, v. 90, p. 351–360.
- Tarré, R.; Macedo, R.; Cantarutti, R. B.(2001) The effect of grazing intensity and the presence of a forage legume on nitrogen dynamics in Brachiaria pastures in the Atlantic forest region of the south of Bahia, Brazil. *Plant and Soil*, v. 234, p. 15–26.
- Tate, K. R.; Ross, D. J.; O'Brien, B. J.; Kelliher, F. M. (1993) Carbon storage and turnover, and respiratory activity, in the litter and soil of an old-growth southern beech (nothofagus) forest. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 25, n. 11, p. 1601–1612.
- Tisdall, J.M., Oades, L.M. (1982) Organic matter and water-stable aggregates in soil. *Journal of Soil Science*, 33:141-163.
- Trujillo, W., Amezquita, E., Fisher, M.J., Lal, R., 1997. Soil organic carbon dynamics and land use in the Colombian Savannas: Aggregate size distribution. In: Lal, R., Kimble, J.M., Follett, R.F., Stewart, B.A. (Eds.), *Soil Processes and the Carbon Cycle*. CRC/Lewis Press, Boca Raton, FL, pp. 267–280.
- Trujillo, W.; Fisher, M. J.; Lal, R. (2006) Root dynamics of native savanna and introduced pastures in the Eastern Plains of Colombia. *Soil and Tillage Research*, v. 87, n. 1, p. 28–38.
- Vicente, L.C. (2013) *Estoque de carbono orgânico em solos sob plantações de seringueira e eucalipto*. Campos dos Goytacazes: UENF. Monografia (Superior em Agronomia) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF, 59p.
- Vicente, L.C. (2016) Origem do carbono orgânico em solos e estoque em agregados sob plantações de seringueira e eucalipto no bioma mata atlântica. Campos Goytacazes: UENF. Dissertação (Produção Vegetal) -

Campos dos Goytacazes - RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF, 60p.

- Vitorello, V. A.; Cerri, C. C.; Victória, R. L.; Andreux, F.; Feller, C.(1989) Organic Matter and Natural Carbon-13 Distribution in Forested and Cultivated Oxisols. *Soil Science Society of America Journal*, v. 53, n. 85, p. 773.
- Wauters, J. B.; Coudert, S.; Grallien, E.; Jonard, M.; Ponette, Q. (2008) Carbon stock in rubber tree plantations in Western Ghana and Mato Grosso (Brazil). *Forest Ecology and Management*, v. 255, n. 7, p. 2347–2361.
- Yang, J.; Huang, J.; Pan, Q.; Han, X. (2004) Long-term impacts of land-use change on dynamics of tropical soil carbon and nitrogen pools. *Journal of Environmental Sciences*, v. 16, n. 2, p. 256–261.