



MINISTERIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

SAIME JOAQUINA SOUZA DE CARVALHO RODRIGUES

CARBONO E NITROGÊNIO DAS FRAÇÕES DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO
DE SISTEMAS DE MANEJO COM QUEIMA E SEM QUEIMA NA AMAZÔNIA
ORIENTAL

BELÉM-PA

2013



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

SAIME JOAQUINA SOUZA DE CARVALHO RODRIGUES

**CARBONO E NITROGÊNIO DAS FRAÇÕES DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO
DE SISTEMAS DE MANEJO COM QUEIMA E SEM QUEIMA NA AMAZÔNIA
ORIENTAL**

BELÉM-PA

2013



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

SAIME JOAQUINA SOUZA DE CARVALHO RODRIGUES

**CARBONO E NITROGÊNIO DAS FRAÇÕES DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO
DE SISTEMAS DE MANEJO COM E SEM QUEIMA NA AMAZÔNIA ORIENTAL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração Fertilidade do Solo, Adubação e Nutrição de Plantas, para obtenção do Título de Mestre em Agronomia.
Orientador: Dr. Steel Silva Vasconcelos

BELÉM-PA
2013

**CARBONO E NITROGÊNIO DAS FRAÇÕES DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO
DE SISTEMAS DE MANEJO COM E SEM QUEIMA NA AMAZÔNIA ORIENTAL**

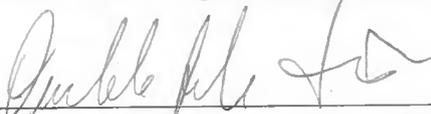
Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Agronomia, área de concentração Fertilidade do Solo, Adubação e Nutrição de Plantas, para obtenção do Título de Mestre em Agronomia.

Aprovado em 15 de agosto de 2013.

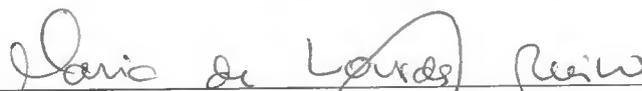
BANCA EXAMINADORA



Steel Silva Vasconcelos - Orientador
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA



Osvaldo Ryohei Kato - 1º Examinador
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA



Maria de Lourdes Pinheiro Ruivo - 2º Examinador
Museu Paraense Emílio Goeldi - MPEG



Francisco de Assis Oliveira - 3º Examinador
Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA

À Deus, acima de tudo:

AGRADEÇO!

Aos meus Pais Francisco Fernandes de Carvalho (em memória) e Benedita Souza Santos pela educação, princípios, valores que sempre me ensinaram e incentivo.

Ao meu padrasto pelo apoio que sempre me deu.

Ao meu esposo Possidônio Guimarães Rodrigues e nossa filha Bárbara de Carvalho Rodrigues cujo amor e carinho são o meu maior incentivo.

Aos meus sogros Francisco Rodrigues Filho e Leile Guimarães Rodrigues pelo suporte e incentivo para que eu pudesse concluir este trabalho.

Com amor e gratidão

DEDICO!

AGRADECIMENTOS

A Deus, por minha existência, saúde e sabedoria.

Aos meus pais Francisco Fernandes de Carvalho (em memória) e Benedita Souza Santos, pelo amor, dedicação, paciência, educação, apoio e muito carinho.

Ao meu padrasto Francisco Carlos dos Santos Alcântara, pelo carinho, força e dedicação.

Ao meu esposo Possidônio Guimarães Rodrigues pelo amor, compreensão, companheirismo e conselhos.

À minha filha Bárbara de Carvalho Rodrigues, pelo carinho e amor.

À minha tia Laura Santos, pela dedicação e cuidados com minha filha, apoio, carinho e conselhos.

Às minhas tias queridas Margarida, Tereza e Olivia Carvalho que sempre me apoiaram e me deram carinho e incentivo.

Aos meus irmãos Luiz e Fernando, pelo incentivo, carinho e amizade sempre.

Às minhas cunhadas Helaine, Lucilene, Carla, Camila e Kaliandra pelo apoio e carinho.

Aos meus tios Pedro, Duca e tio Wilson pelo apoio e afetividade.

Aos meus compadres Marlon Muniz e Laureane Santos, pela amizade e carinho.

Ao meu orientador Steel Silva Vasconcelos, pela compreensão, paciência, responsabilidade e contribuição na realização deste trabalho.

A Livia Gabrig Turbay Rangel Vasconcelos, pelo apoio e contribuições para realização deste trabalho.

Aos empregados do Laboratório de Ecofisiologia Vegetal da Embrapa Amazônia Oriental, em especial Cleo Marcelo Souza, Ivanildo Trindade, Neusa Ferreira, Everson Rocha e José Maria.

Aos professores Mário Lopes da Silva Júnior e Vânia Silva de Melo, pela oportunidade dada na graduação e todos os ensinamentos.

Às Coordenadoras do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Professoras Herdjânia de Veras Lima e Gisele Barata, pela dedicação e cuidados com os cursos de pós-graduação.

Às secretárias Gracy Monteiro (PPGA-UFRA), Maria Carvalho (PROPED-UFRA) e Francileide Pereira (PROPED-UFRA), pela disposição para resolver problemas administrativos relativos ao curso.

Aos Professores do Curso de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Federal Rural da Amazônia, pelos valiosos ensinamentos.

À Universidade Federal Rural da Amazônia, pela minha formação em nível de Pós-

Graduação.

Ao Deutscher Akademischer Austauschdienst (DAAD) / PRODEMA, pelo apoio financeiro na forma de bolsa de mestrado.

Aos amigos Núbia Vasconcelos, Adriane da Rocha, Lorena Lira, Sanah Birani, Fabíola Fernandes, Gisele Nerino, Moara Bandeira, Gienah Vianna, Gerson Albuquerque, Samuel Cohen, Fábio Oliveira, Francisca das Chagas, Josemar Moreira, Rosigrêde Silva, Augusto Pedroso, Keila Bernardes, Rômulo Sobrinho, Sueny França, Marcos Paulo, Danilo Monteiro, Valdir Monteiro, Edna Souza, Yngrid Rodrigues, Luma Castro, Nilvan Melo, Rodolfo Santos, Mália Maria, Fabrícia Moraes, Rikelly Souza e Jonny Lucio, pelo apoio, carinho, conselhos e parceria nos momentos mais difíceis.

Aos bolsistas de iniciação científica Michel Pereira, Ivana Reis, Maryelle Machado e Greiziany Soares pela amizade, carinho, apoio e dedicação no auxílio das análises.

À direção da FEIGA, pelo apoio na execução do trabalho.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

*O fardo é proporcional às forças,
Como a recompensa será proporcional
À resignação e à coragem.*

(Evangelho segundo o espiritismo)

RESUMO

Na Amazônia, o sistema de corte e queima da vegetação para preparo de área, tradicionalmente utilizado no âmbito da agricultura familiar, tem contribuído para perdas da matéria orgânica do solo (MOS). A MOS é um importante reservatório de elementos químicos (nutrientes) com destaque para o carbono (C). Práticas de manejo inadequadas, cultivo intensivo e desmatamento ocasionam alterações na sua dinâmica e, conseqüentemente, reduções no estoque de C e N no solo. Dessa forma, o estudo da dinâmica das frações que a compõe, torna-se uma ferramenta fundamental para o entendimento dos efeitos dos sistemas de manejo agrícolas no acúmulo ou perda de carbono e nitrogênio do solo. Objetivou-se com este estudo: (1) avaliar o efeito de sistemas com e sem queima no estoque de C e N do solo e das frações da matéria orgânica (2) comparar métodos de determinação da concentração de C no solo usando-se, como estudo de caso, áreas experimentais de corte e queima e corte e trituração. O experimento foi desenvolvido em Igarapé-Açú (PA). Avaliou-se os seguintes tratamentos: (1) sistema com preparo de área com trituração da vegetação e enriquecimento de pousio com leguminosas arbóreas; (2) sistema com preparo de área com queima da vegetação e (3) floresta secundária com mais de 20 anos (capoeira). Os resultados evidenciaram: (a) Todos os sistemas tiveram diminuição do estoque de C e N do solo; (b) O sistema com trituração e enriquecimento de pousio promove maior acúmulo de C e N nas frações leves e particulada da matéria orgânica do solo, em relação ao sistema com queima; (c) O estoque de C e N das frações lábeis sofreram efeito dos sistemas e do período de coleta; (d) Os métodos de quantificação de C tem alta correlação; (e) O método de combustão via úmida subestimou os valores de C e (f) A partir de dados de C pela perda de massa por ignição, pode-se usar a sua regressão com confiança para estimar os resultados de C por combustão via seca.

Palavras-chave: matéria orgânica, carbono, nitrogênio, frações densimétricas, frações granulométricas, *mulch*, métodos analíticos, manejo do solo

ABSTRACT

In the Amazon, the system of cutting and burning of vegetation for land preparation, traditionally used in the context of family farming has contributed to loss of soil organic matter (SOM). The SOM is an important reservoir of chemical elements (nutrients) with emphasis on carbon (C). Inadequate management practices, intensive cultivation and deforestation cause changes in its dynamics and, consequently, reductions in the stock of C and N in the soil. Thus, the study of the dynamics of the fractions that compose it, becomes a fundamental tool for understanding the effects of agricultural management systems in the accumulation or loss of soil carbon and nitrogen. The objective of this study: (1) evaluate the effect of systems with and without burning the stock of C and N of soil and organic matter fractions (2) to compare methods for determining the concentration of C in the soil using, as a case study, experimental areas of cutting and burning and cutting and grinding. The experiment was conducted in Igarapé- Açú (PA). We evaluated the following treatments: (1) system with preparation area with crushing vegetation and fallow enrichment with leguminous trees, (2) system with preparation area with burning vegetation and (3) secondary forest with more than 20 years (capoeira). The results evidenced: (a) All systems have reduced the stock of soil C and N (b) The system with grinding and fallow enrichment promotes greater accumulation of C and N in the light fraction and the particulate soil organic matter, compared to the system with burning; (c) the stock of C and N from labile suffer effect of systems and the collection period, (d) methods for quantification of C has a high correlation (e) the combustion method via wet underestimated the values of C and (f) the data from C by weight loss on ignition, you can use your regression to estimate with confidence the results of C by dry combustion

KEYWORDS: organic matter, carbon, nitrogen, densimetric fractions, size fractions, mulch, analytical methods, soil management

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

1 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	13
REFERÊNCIAS	16
2 CARBONO E NITROGÊNIO DAS FRAÇÕES DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO DE SISTEMAS DE MANEJO COM E SEM QUEIMA NA AMAZÔNIA ORIENTAL.....	20
RESUMO	20
ABSTRACT	21
2.1 Introdução.....	22
2.2 Material e métodos	23
2.2.1 Área de estudo	23
2.2.2 Experimento de campo.....	23
2.2.3 Amostragem de solo e processamento de amostras	25
2.2.4 Análises de solo.....	25
2.3 Resultados	28
2.3.1 Estoque de carbono no solo.....	28
2.3.2 Estoque de nitrogênio no solo	29
2.3.3 Estoque de carbono e nitrogênio nas frações densimétricas	30
2.3.4 Estoque de carbono e nitrogênio nas frações granulométricas	31
2.4 Discussão	34
2.4.1 Estoque de carbono e nitrogênio total no solo	34
2.4.2 Estoque de carbono e nitrogênio nas frações densimétricas	36
2.4.3 Estoque de carbono e nitrogênio nas frações granulométricas	38
2.5 Conclusões.....	40
REFERÊNCIAS	41
3 MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DE CARBONO EM ARGISSOLO NA AMAZÔNIA ORIENTAL.....	46
RESUMO	46
ABSTRACT	47
3.1 Introdução.....	48
3.2 Material e Métodos.....	49

3.2.1 Área de estudo	49
3.2.2 Sistemas de uso do solo avaliados.....	50
3.2.3 Amostragem e processamento do solo	51
3.2.4 Determinações de C	51
3.2.4.1 Combustão via úmida (Walkley-Black).....	51
3.2.4.2 Combustão via seca (perda de massa por ignição).....	51
3.2.4.3 Combustão via seca (analisador elementar)	52
3.2.5 Análises estatísticas.....	52
3.3 Resultados	52
3.4 Discussão	54
3.5 Conclusões.....	57
REFERÊNCIAS	58

1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Na Amazônia, o sistema de corte e queima, tradicionalmente usado na região pelos agricultores familiares, consiste na derrubada de florestas primárias ou secundárias e subsequente queima dos restos vegetais no preparo de área para sistemas agropecuários (ZARIN et al., 2005). Embora ocorra um aumento na disponibilidade de nutrientes no solo após a queima, em médio prazo este sistema limita a produção agrícola por promover a perda de nutrientes e reduzir a fertilidade do solo (DENICH et al., 2004).

Os impactos do fogo sobre a sustentabilidade dos ecossistemas e, em especial, do solo, decorrem de alterações na sua estrutura e funcionalidade. A remoção da vegetação causa alteração no aporte de nutrientes e declínio da produção ao longo do tempo; ciclos repetidos de corte e queima com períodos de pousio curtos acarretam perda do poder de regeneração e empobrecimento da vegetação sucessional (RODRIGUES; MIRANDA; KATO 2007), conseqüentemente perda da qualidade do material orgânico produzido e adicionado no solo.

O sistema de corte e queima também é responsável pela emissão de grandes quantidades de gases de efeito estufa (DAVIDSON et al., 2008), não somente da parte da biomassa que queima, durante o manejo, mas também da parte que fica no solo sendo oxidada por processos intensos de decomposição (FEARNSIDE, 2002). Este processo afeta a dinâmica da matéria orgânica do solo (MOS) e os elementos a ela associados, como o carbono (C) e o nitrogênio (N).

Como alternativa ao preparo de área tradicional com queima na Amazônia, surgiram nas últimas décadas técnicas de preparo sem o uso do fogo, como o sistema de corte e trituração mecanizada da vegetação de pousio (DENICH et al., 2004). A floresta secundária que se forma durante o período de pousio é cortada e triturada, sendo os resíduos vegetais deixados sobre a superfície do solo. Este sistema, associado ao enriquecimento do pousio com o plantio de leguminosas arbóreas de rápido crescimento, visando a acelerar o acúmulo de biomassa e nutrientes, reduz as perdas de nutrientes por lixiviação e a emissão de equivalentes de CO₂ do solo para a atmosfera (DAVIDSON et al., 2008; SOMMER et al., 2000). No entanto, os efeitos de ciclos repetidos de corte e trituração sobre a matéria orgânica do solo são pouco conhecidos na

Amazônia.

A matéria orgânica é uma importante fonte de nutrientes para a produção vegetal e sua ciclagem está vinculada à disponibilização de nutrientes no solo, por meio da atividade microbiana (CAMBARDELLA; ELLIOT, 1993). Pode ser dividida em frações lábeis (matéria orgânica leve-livre, matéria orgânica leve-oclusa) e estável (matéria orgânica complexada em minerais do solo), com diferentes graus de disponibilidade à microbiota, dependendo dos mecanismos específicos de proteção e estabilização da matéria orgânica. Tais mecanismos podem ser resumidos em três categorias: recalcitrância das moléculas orgânicas, oclusão dentro de agregados e ligação/complexação com a matriz mineral (CHRISTENSEN, 1996). O estudo do carbono contido em diferentes frações da matéria orgânica do solo pode ser utilizado como um importante indicador de qualidade dos sistemas agrícolas (REEVES, 1997).

Segundo Boddey et al. (2012) a disponibilidade de nitrogênio (N) tem grande influência na acumulação de C no solo, pois em sistemas em que o balanço de N é positivo (entradas superiores às perdas), este contribui para produção primária e acúmulo de C no solo. A qualidade da biomassa vegetal depositada ao solo, principalmente em relação às quantidades de N, exerce papel relevante no aumento do estoque de C no solo.

O estudo da MOS em suas diversas frações, bem como as suas relações com o manejo visa desenvolver ou avaliar estratégias para a utilização sustentável dos solos, objetivando reduzir o impacto das atividades agrícolas sobre o meio ambiente (PINHEIRO et al., 2004; ROSCOE; MACHADO, 2002). A fração leve da MOS (FL) é um bom indicador da qualidade do solo, pois responde rapidamente aos impactos ocasionados por práticas de manejo (LIMA et al., 2008) e sua dinâmica é ligada ao suprimento de resíduos orgânicos do sistema de cultivo (CHRISTENSEN, 2000). Esta fração divide-se em leve-livre (FLL), composta de materiais vegetais com composição química comparável a liteira (FREIXO; CANELLA; MACHADO, 2002 et al., 2002), com rápida taxa de transformação, e leve-oclusa (FLO), constituída de parte da FL protegida fisicamente entre os agregados, formada por um variado conjunto de compostos orgânicos, com tamanho reduzido e grau de decomposição mais avançado em comparação a FLL (PINHEIRO et al., 2004).

O fracionamento granulométrico separa as frações da MOS em função do tamanho de partículas (areia, silte e argila) (ROSCOE; MACHADO, 2002). A matéria orgânica particulada (MOP) apresenta tamanho $\geq 53 \mu\text{m}$ e é constituída por resíduos orgânicos pouco decompostos, assemelhando-se às frações leves obtidas pelo fracionamento densimétrico (SIX et al., 2002). A fração silte + argila (S+A), com tamanho $< 53 \mu\text{m}$, é composta por resíduos orgânicos humificados, sendo mais estável no solo do que a MOP (FELLER; BEARE, 1997; FREIXO; CANELLA; MACHADO, 2002 et al., 2002; DESJARDINS et al., 2004; SILVA JÚNIOR et al., 2009; LOSS et al., 2011).

Embora existam na literatura estudos que avaliaram as frações da MOS em sistemas conservacionistas no Brasil (DIEKOW et al., 2005; MAIA et al., 2007; LUCA et al., 2008; MACEDO et al., 2008; CARVALHO, 2011; LOSS et al., 2011; RANGEL-VASCONCELOS; KATO; VASCONCELOS, 2012), o conhecimento do efeito do sistema de corte e trituração, assim como do corte e queima, sobre as frações da MOS ainda são incipientes na Amazônia.

A quantificação da concentração de carbono do solo tem sido realizada com métodos que podem determinar suas diferentes formas encontradas no solo (orgânico, inorgânico e elementar). A combustão via seca, considerado como método padrão, apresenta alto custo de manutenção e instalação (GATTO et al., 2009; CARMO; SILVA, 2012). A combustão via úmida (método Walkley-Black) atualmente é o mais usual em laboratórios de solos no Brasil, porém não oxida todas as formas de C presentes na amostra e gera resíduos tóxicos (NELSON; SOMMERS, 1992; CONYERS et al., 2011). O método de perda de massa por ignição não produz resíduos, mas a sua execução é demorada e não é facilmente automatizado (MIYAZAWA et al., 2000).

Objetivou-se com este estudo: (1) avaliar o estoque de C e N no solo e nas frações densimétricas e granulométricas em sistemas de cultivo com queima e trituração da vegetação de pousio e (2) comparar métodos de determinação da concentração de C no solo usando-se, como estudo de caso, áreas experimentais de corte e queima e corte e trituração.

REFERÊNCIAS

- BODDEY, R. M.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, R.; JANTALIA, C. P.; MARTIN-NEITO, L.; MADARI, B. E.; MILORI, D. M. B. P.; MACHADO, P. L. O. A. Estoques de carbono nos solos do Brasil: quantidade e mecanismos de acúmulo e preservação. In: LIMA, M. A.; BODDEY, R. M.; ALVES, B. J. R.; MACHADO, P. L. O. A.; URQUIAGA, S. (Eds). *Estoques de carbono e emissões de gases de efeito estufa na agropecuária brasileira*. Brasília, Embrapa, p. 33-80, 2012.
- CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Carbon and nitrogen distribution in aggregates from cultivated and native grassland soils. *Soil Science Society of America Journal*, Amsterdam, v. 57, p. 1071-1076, 1993.
- CARMO, D. L.; SILVA, C. A. Métodos de quantificação de carbono e matéria orgânica em resíduos orgânicos. *Revista Brasileira de Ciência Solo*, Viçosa, v. 36, p. 1211-1220, 2012.
- CARVALHO, W. R. *Estoque de carbono e fracionamento físico da matéria orgânica do solo de cultivo de palma de óleo em sistemas agroflorestais na Amazônia Oriental*. 2011. 75 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2011.
- CHRISTENSEN, B. T. Matching measurable soil organic matter fractions with conceptual pools in simulation models of carbon turnover: revision of model structure. In: POWLSON, D. S.; SMITH, P.; SMITH, J. V. (Ed.). *Evaluation of soil organic matter models*, Berlin: Springer-Verlag, *NATO ASI Series*, p. 143-159, 1996.
- CHRISTENSEN, B. T. *Organic matter in soil: structure, function and turnover*. Tjele: DIAS, 2000. 95 p. (DIAS Report. Plant Production, 30).
- CONYERS, M. K.; POILE, G. J.; OATES, A. A.; WATERS, D.; CHAN, K. Y. Comparison of three carbon determination methods on naturally occurring substrates and the implication for the quantification of soil carbon. *Soil Research*, Austrália, v. 49, p. 27-33, 2011.
- DAVIDSON, E. A.; SÁ, T. D. A.; CARVALHO, C. J. R.; FIGUEREDO, R. O.; KATO, M. S. A.; KATO, O. R.; ISHIDA, F. Y. An integrated greenhouse gas assessment of an alternative to slash-and-burn agriculture in eastern Amazonia. *Global Change Biology*, USA, v. 14, p. 998-1007, 2008.
- DESJARDINS, T.; BARROS, E.; SARRAZIN; GIRARDIN M.; MARIOTTI, A. Effects of forest conversion to pasture on soil carbon content and dynamics in Brazilian Amazonia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 103, p. 365-373, 2004.
- DENICH, M.; VIELHAUER, K.; KATO, M. S. A.; BLOCK, A.; KATO, O. R.; SÁ, T.D. A.; LÜCKE, W.; VLEK, P. L. G. Mechanized land preparation in forest-based

allow systems: the experience from Eastern Amazonia. *Agroforestry Systems*, Holanda, v. 61-62, p. 91-106, 2004.

DIEKOW, J.; MIELNICZUK, J.; KNICKER, H.; BAYER, C.; DICK, D.; KOGELKNABNER, P. Soil C and N stocks as affected by cropping systems and nitrogen fertilisation in a southern Brazil Acrisol managed under no-tillage for 17 years. *Soil & Tillage Research*, v. 81, p. 87-95, 2005.

FEARNSIDE, P. M. Fogo e emissão de gases de efeito estufa dos ecossistemas florestais da Amazônia brasileira. *Estudos Avançados*, São Paulo, v. 16, p. 97-123, 2002.

FELLER, C.; BEARE, M. H. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma*, v. 79, p. 69-116, 1997.

FREIXO, A. A.; CANELLA, L. P.; MACHADO, P. L. O. A. Propriedades espectrais da matéria orgânica leve-livre e leve-intra-agregado de dois Latossolos sob plantio direto e preparo convencional. *Revista Brasileira de Ciência Solo*, Viçosa, v. 26, p. 445-453, 2002.

GATTO, A.; BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; SILVA, I. R.; MENDONÇA, E. S.; VILLANI, E. M. A. Comparação de métodos de determinação do carbono orgânico em solos cultivados com eucalipto. *Revista Brasileira de Ciência Solo*, Viçosa, v. 33, p. 735-740, 2009.

LIMA, A. M. N.; SILVA, I. R.; NEVES, J. C. L.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; MENDONÇA, E. S.; DEMOLINARI, M. S. M.; LEITE, F. P. Frações da matéria orgânica do solo após três décadas de cultivo de eucalipto no vale do Rio Doce - MG. *Revista Brasileira de Ciência Solo*, Viçosa, v. 32, p. 1053-1063, 2008.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; SCHULTZ, N.; ANJOS, L. H. C. DOS; SILVA, E. M. R. Frações orgânicas e índice de manejo de carbono do solo em diferentes sistemas de produção orgânica. *Idesia*, Chile, v. 29, p. 11-19, 2011.

LUCA, E. F. de; FELLER, C.; CERRI, C. C.; BARTHÈS, B.; CHAPLOT, V.; CAMPOS, D. C.; MANECHINI, C. Avaliação de atributos físicos e estoque de carbono e nitrogênio em solos com queima e sem queima de canavial. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 32, p. 789-800, 2008.

MACEDO, M. O.; RESENDE, A. S.; GARCIA, P. C.; BODDEY, R. M.; JANTALIA, C. P.; URQUIAGA, S.; CAMPELLO, E. F. C.; FRANCO, A. A. Changes in soil C and N stocks and nutrient dynamics 13 years after recovery of degraded land using leguminous nitrogen-fixing trees. *Forest Ecology and Management*, v. 255, p. 1516-1524, 2008.

MAIA, S. M. F.; XAVIER, F. A. S.; OLIVEIRA, T. S.; MENDONÇA, E. S.; ARAÚJO FILHO, J. A. Organic carbon pools in a Luvisol under agroforestry and conventional

farming systems in the semi-arid region of Ceará, Brazil. *Agroforest Syst*, v. 71, p. 127-138, 2007.

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A.; OLIVEIRA, E. L.; IONASHIRO, M.; SILVA, A. K. Gravimetric determination of soil organic matter. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, Brasil, v. 43, p. 475-478, 2000.

NELSON, D.W.; SOMMERS, L. E. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: SPARKS, D.L.; PAGA, A.L.; HELMKE, P.A.; LOEPPERT, R.H.; SOLTANPOUR, P.N.; TABATABAI, M.A.; JOHNSTON, C.T. & SUMMER, M.E., eds. *Methods of soil analysis: Chemical methods*. Part 3. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, p. 961-1010, 1992.

PINHEIRO, E. F. M.; PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C.; MACHADO, P. L. O. A. Fracionamento densimétrico da matéria orgânica do solo sob diferentes sistemas de manejo e cobertura vegetal em Paty do Alferes (RJ). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 28, p. 731-737, 2004.

RANGEL-VASCONCELOS, L. G. T.; KATO, O. R.; VASCONCELOS, S. S. Matéria orgânica leve do solo em sistema agroflorestal de corte e trituração sob manejo de capoeira. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 47, p. 1142-1149, 2012.

REEVES, D. W. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. *Soil & Tillage Research*, v. 43, p. 131-167, 1997.

RODRIGUES, M. A. C. M.; MIRANDA, I. S.; KATO, M. S. A. Flora e estrutura da vegetação secundária após o uso de diferentes trituradores florestais. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 42, p. 459-465, 2007.

ROSCOE, R.; MACHADO, P. L. O. A. *Fracionamento físico do solo em estudos da matéria orgânica*. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002. 86p.

SILVA JÚNIOR., M. L.; DESJARDINS, T.; SARRAZIN, M.; MELO, V. S.de.; SANTOS, E.R. ; CARVALHO, J. R. de. Carbon content in Amazonian Oxisols after Forest conversion to pasture. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 33, p. 1603-1611, 2009.

SIX, J.; CONANT, R.T.; PAUL, E. A.; PAUSTIAN, K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, v. 241, p. 155-176, 2002.

SOMMER, R.; DENICH, M.; VLEK, P. L. G. Carbon storage and root penetration in deep soils under small-farmer land-use systems in the Eastern Amazon region, Brazil. *Plant and Soil*, v. 219, p. 231-241, 2000.

ZARIN, D.J.; DAVIDSON, E.A.; BRONDIZIO, E.; VIEIRA, I.C.G. ; SA, T.; FELDPALUSCH, T.; SCHUUR, E.A.; MESQUITA, R.; MORAN, E.; DELAMONICA, P.; DUY,

M. J.; HURTT, G. C.; SALIMON, C.; DENICH, M. Legacy of fire slows carbon accumulation in Amazonian forest regrowth. *Frontiers in Ecology and the Environment*, v. 3, p. 365-369, 2005.

2 CARBONO E NITROGÊNIO DAS FRAÇÕES DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO DE SISTEMAS DE MANEJO COM E SEM QUEIMA NA AMAZÔNIA ORIENTAL

RESUMO

A agricultura de corte e queima tradicionalmente adotada na Amazônia contribui para diminuição do estoque de carbono (C) e nitrogênio (N) da matéria orgânica do solo. Objetivou-se neste estudo avaliar o efeito dos sistemas e dos períodos de coleta no estoque de carbono e nitrogênio das frações físicas da matéria orgânica e do solo. O experimento foi desenvolvido na fazenda escola de Igarapé-Açú (PA), pertencente à Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA). Avaliaram-se os seguintes tratamentos: (1) sistema com preparo de área com trituração da vegetação e enriquecimento de pousio durante o pousio com leguminosas arbóreas; (2) sistema com preparo de área com queima da vegetação e (3) floresta secundária com mais de 20 anos. As amostras de solo foram coletadas nas profundidades 0-5 e 5-10 cm, com dez repetições por sistema. Foi quantificado o estoque de c e n do solo e das frações da matéria orgânica do solo. Todos os sistemas apresentaram diminuição no estoque de c e n do solo entre os períodos de coleta. O estoque de c e n do solo e das frações da matéria orgânica foi maior no sistema com trituração, em relação ao sistema com queima. As frações mais lábeis sofreram efeito do sistema e dos períodos de coleta em todas as profundidades. A fração particulada foi mais sensível ao efeito do período de coleta, do que ao efeito dos sistemas. A fração silte+argila foi mais sensível ao efeito dos sistemas, do que dos períodos de coleta.

Palavras-chave: Matéria orgânica. Carbono. Nitrogênio. Frações densimétricas. Frações granulométricas. Mulch. Biomassa vegetal.

ABSTRACT

The slash and burn agriculture in the Amazon traditionally adopted contributes to decrease the stock of carbon (C) and nitrogen (N) of soil organic matter. The objective of this study was to evaluate the effect of systems and collection periods in the stock of carbon and nitrogen of physical fractions of organic matter and soil. The experiment was conducted at the Farm School Igarapé-Açu (PA), belonging to Federal Rural University of Amazonia (UFRA). Evaluated the following treatments: (1) system with preparation area with milling and enrichment of fallow vegetation during fallow with leguminous trees, (2) system with preparation area with burning vegetation and (3) secondary forest with more 20. Soil samples were collected from the depths 0-5 and 5-10 cm, with ten repetitions per system. Was quantified stocks of C and N of soil and fractions of soil organic matter. All systems showed a decrease in the stock of soil C and N between sampling periods. The stock of C and N of soil and organic matter fractions was higher in the system with grinding, in relation to the system with burns. The more labile suffer effect of the system and collection periods at all depths. The particulate fraction was more sensitive to the effect of the collection period, than the effect of the systems. The silt + clay was more sensitive to the effect of systems than the collection periods.

Keywords: Matéria orgânica. Carbono. Nitrogênio. Frações densimétricas. Frações granulométricas. Mulch. Biomassa vegetal.

2.1 Introdução

A agricultura de corte e queima, tradicionalmente adotada na Amazônia por agricultores familiares, resulta em elevadas emissões de gases de efeito estufa e perda de matéria orgânica do solo (MOS) (FEARNSIDE, 2002; DAVIDSON et al., 2008). Como alternativa à queima, surgiu o sistema de corte e trituração mecanizada da vegetação (KATO et al., 1999), em que os resíduos vegetais são deixados sobre a superfície do solo no preparo de área. Associado a este sistema alternativo, o plantio de leguminosas arbóreas fixadoras de nitrogênio (N), durante o pousio, promove maior acúmulo de resíduos culturais e acúmulo de carbono (C) e N no solo (DIEKOW et al., 2005; RANGEL-VASCONCELOS; KATO; VASCONCELOS, 2012).

A matéria orgânica do solo (MOS) é um importante reservatório de C terrestre (SWIFT, 2001). Práticas de manejo inadequadas, cultivo intensivo e desmatamento alteram a dinâmica de MOS e, conseqüentemente, reduções drásticas no acúmulo de C e N no solo (PINHEIRO et al., 2010; COMTE et al., 2012). O estudo das frações lábeis e estáveis da MOS tem-se mostrado necessário para o entendimento da sua dinâmica. O fracionamento físico possibilita a separação de diferentes frações orgânicas, que respondem de maneira distinta às práticas de manejo (PINHEIRO et al., 2004; CAMPOS et al., 2011; RANGEL-VASCONCELOS; KATO; VASCONCELOS, 2012).

O fracionamento densimétrico separa a fração leve (densidade $< 1,5 \text{ g cm}^{-3}$) da fração pesada (densidade $> 2,0 \text{ g cm}^{-3}$) da MOS. A fração leve (FL) divide-se em: leve-livre (FLL) - composta por restos vegetais, resíduos microbianos e da microfauna, com rápida taxa de transformação; e leve-oclusa (FLO) - constituída de parte da FL protegida entre agregados, apresentando tamanho reduzido e grau de decomposição mais avançado em comparação a FLL (PINHEIRO et al., 2004).

O fracionamento granulométrico baseia-se na separação de frações da MOS em função do tamanho de partículas (areia, silte e argila) (ROSCOE; MACHADO, 2002). A matéria orgânica particulada (MOP) é constituída por resíduos orgânicos pouco decompostos (SIX et al., 2002). A fração silte + argila (S+A) é composta por materiais orgânicos humificados, sendo mais estável no solo e, portanto, apresenta maior estoque de C (FELLER; BEARE, 1997; SILVA JÚNIOR et al., 2009; LOSS et al., 2011), em relação a FL ou MOP.

Embora seja reconhecida a importância do estudo das frações físicas da MOS para o entendimento da dinâmica do C, e outros elementos correlatos, há poucos dados oriundos de sistemas de cultivo que envolvam o uso do fogo ou a trituração da vegetação no preparo de área na Amazônia. Objetivou-se avaliar o estoque de C e N no solo e nas frações densimétricas e granulométricas em sistemas de cultivo com preparo de área com corte e queima e corte e trituração da vegetação de pousio.

2.2 Material e métodos

2.2.1 Área de estudo

O estudo foi desenvolvido em um experimento de campo de longa duração (12 anos). A área de estudo se localiza na Fazenda Experimental de Igarapé-Açú (FEIGA) da Universidade Federal Rural da Amazônia, com coordenadas geográficas de 1° 07' 15,5" S e 47° 36' 12,7" W, no município de Igarapé-Açú, região Nordeste do Pará, na Amazônia Oriental.

O clima da região, pela classificação de Köppen, é quente úmido (Am_i), com temperaturas médias entre 25 e 32 °C, umidade relativa do ar entre 80 e 90% e precipitação anual entre 2.000 e 3.000 milímetros. O período de maior precipitação ocorre entre janeiro e abril e o de menor precipitação, de agosto a dezembro (COMTE et al., 2012).

Os solos da região são classificados como Latossolo Amarelo, de acordo com a classificação brasileira de solos (EMBRAPA, 2013), com predominância de quartzo e caulinita na camada de 0-30 cm. A caracterização química e granulométrica do solo da área experimental é apresentada na Tabela 1.

2.2.2 Experimento de campo

As parcelas experimentais foram implantadas em dezembro de 2001, em uma área de floresta sucessional de aproximadamente 15 anos, anteriormente utilizada em sistema de cultivo tradicional (corte e queima). A biomassa acima do solo da floresta secundária no início do experimento era de $99,6 \pm 19,5$ Mg ha⁻¹, distribuída percentualmente em tronco (53%), galhos (27%), folhas (9%), cipós (10%) e liteira (1%).

Tabela 1. Caracterização química e granulométrica do solo das áreas experimentais.

Sistemas	Prof. cm	pH H ₂ O	mg dm ⁻³			cmol _c dm ⁻³				g kg ⁻¹			DS g cm ⁻³	
			P	K	Na	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	Areia	Silte		Argila
CT	0-5	4,75	12,12	17,78	10,94	2,55	0,65	3,87	53,95	3,26	808	72	120	1,27
	5-10	4,59	6,62	8,43	6,20	1,00	0,46	11,75	57,49	1,49	757	83	160	1,44
CQ	0-5	4,98	2,62	9,46	7,61	1,85	0,48	3,25	38,40	2,36	807	53	140	1,38
	5-10	4,81	2,37	6,86	6,44	1,33	0,44	4,87	40,04	1,79	768	112	120	1,50
FS	0-5	4,66	3,43	8,31	10,25	1,04	0,51	9,25	53,98	1,59	759	121	120	1,11
	5-10	4,73	2,00	6,13	7,47	0,48	0,19	10,87	42,30	0,69	708	152	140	1,23

CT- sistema com corte e trituração; CQ- sistema com corte e queima; FS- floresta sucessional; DS-densidade do solo, SB- soma de bases

Fonte: Saime Rodrigues

Foram avaliados dois sistemas de uso do solo, cada um em áreas contínuas de 2 ha: (a) corte e trituração da vegetação (CT), no preparo de área, seguido pelo plantio de culturas alimentares (*Zea mays*, *Manihot esculenta* e *Vigna unguiculata*), com plantio de espécies arbóreas para pousio de enriquecimento (*Inga edulis* Mart, *Racosperma mangium* Willd. e *Sclerolobium paniculatum* Vogel); (b) corte e queima da vegetação (CQ), no preparo de área, seguido pelo plantio de culturas alimentares, conforme descrito anteriormente, sem enriquecimento de pousio. Esses sistemas de uso do solo foram comparados com um fragmento da floresta sucessional remanescente. No sistema com trituração foi realizado somente um ciclo de cultivo após o primeiro manejo de corte e trituração; após os demais manejos foram realizados dois ciclos de cultivo. No sistema com queima tem sido mantido um ciclo de cultivo após o preparo de área.

O histórico da área, bem como, os períodos de cultivo, pousio, preparo de área e biomassa produzida em cada período nos sistemas CT e CQ são descritos na Tabela 2. O preparo de área para plantio no sistema CT consistiu na utilização de um trator adaptado com um implemento que corta e tritura a vegetação, e, em seguida, espalha a biomassa na superfície do solo (DENICH et al., 2004). A trituração da vegetação foi realizada mecanicamente por meio de um fresador florestal (AHWI) FM600 acoplado a um trator de rodas com 170 cv. Em 2002 e 2005, a área recebeu adubação NPK (60-60-30 ha⁻¹) 10 dias após o plantio do *Zea mays* (cultivar BR 5102) e *Manihot esculenta*

(cultivar Olho Verde), e também 10 dias antes do plantio de feijão e mandioca em junho de 2005. Aos 45 dias após a germinação a adubação de 2002 foi completada com a adição de 3,3 g de uréia/planta.

O preparo de área no sistema CQ consistiu em corte da vegetação, amontoamento de troncos e galhos remanescentes (coivara), e queima para limpeza total da área para o plantio. Em ambos os sistemas de uso o plantio foi realizado manualmente ou com auxílio de plantadeira manual (matraca); a colheita também foi realizada manualmente.

A área de referência com floresta secundária (2 ha) foi, anteriormente ao estudo, utilizada como área de cultivo com corte e queima da vegetação e plantio de *Hevea brasiliensis*, e localiza-se a 500 m da área submetida ao sistema CQ.

2.2.3 Amostragem de solo e processamento de amostras

Em janeiro de 2010, foram coletadas, com trado tipo caneco, 10 amostras compostas, cada uma contendo cinco simples, em cada sistema avaliado, nas camadas 0-5 e 5-10 cm. Em laboratório, as amostras foram secas ao ar, destorroadas, peneiradas em malha de 2 mm, moídas em gral de porcelana e, finalmente, peneiradas em malha de 60 mesh, para análise de carbono do solo. Para a determinação da densidade do solo, foram coletadas amostras indeformadas em oito trincheiras, com três repetições por trincheira (3 faces da trincheira) nas profundidades 0-5 e 5-10 cm.

2.2.4 Análises de solo

A densidade do solo foi determinada pelo método do anel volumétrico (EMBRAPA, 1997). O pH foi determinado em água; o fósforo disponível, o potássio e o sódio foram extraídos com solução Mehlich 1, sendo o primeiro determinado por colorimetria (comprimento de onda 660 μ m) e os últimos por fotometria de chama; O cálcio, magnésio e alumínio trocáveis foram extraídos com KCl 1 mol L⁻¹ (EMBRAPA, 1997).

As frações leves da matéria orgânica foram obtidas pelo procedimento proposto por Sohi et al. (2001), modificado por Mendonça; Matos (2005). As frações leves foram extraídas do solo por meio de solução de iodeto de sódio (NaI) com densidade de 1,80 g cm⁻³.

Fig. 2. Histórico dos períodos de cultivo e pousio nos sistemas com trituração e queima da floresta secundária.

PERÍODO	CORTE E TRITURAÇÃO (CT)	CORTE E QUEIMA (CQ)
2001	Preparo de área corte-trituração Biomassa inicial da capoeira de 15 anos ($100 \pm 19,5 \text{ Mg ha}^{-1}$)	Preparo de área corte-queima
2002	Milho (Grãos= $1,55 \pm 0,09 \text{ Mg ha}^{-1}$) (Biomassa= $2,93 \text{ Mg ha}^{-1}$) Mandioca (Raíz= $16,19 \pm 1,20 \text{ Mg ha}^{-1}$) (Biomassa= $4,70 \text{ Mg ha}^{-1}$)	Milho (Grãos= $0,97 \pm 0,16 \text{ Mg ha}^{-1}$) (Biomassa= $1,73 \text{ Mg ha}^{-1}$) Mandioca (Raíz= $14,18 \pm 1,10 \text{ Mg ha}^{-1}$) (Biomassa= $3,10 \text{ Mg ha}^{-1}$)
2003	Pousio Enriquecido <i>Sclerolobium paniculatum</i> Vogel ($4,66 \text{ Mg ha}^{-1}$) <i>Racosperma mangium</i> (Willd.) ($19,61 \text{ Mg ha}^{-1}$) Vegetação secundária ($6,28 \text{ Mg ha}^{-1}$) Serrapilheira ($1,86 \text{ Mg ha}^{-1}$)	Pousio Natural Biomassa= 27 Mg ha^{-1} Litter= 7 Mg ha^{-1}
2004		
2005		
2006		
2007	Pousio Enriquecido <i>Sclerolobium paniculatum</i> Vogel* <i>Inga edulis</i> Mart.* Vegetação secundária* Serrapilheira*	Milho (Grãos= $1,07 \text{ Mg ha}^{-1}$) (Biomassa= $0,50 \text{ Mg ha}^{-1}$) Mandioca (Raíz= $0,70 \text{ Mg ha}^{-1}$) (Biomassa= $0,65 \text{ Mg ha}^{-1}$) (Biomassa= $0,65 \text{ Mg ha}^{-1}$)
2008		
2009		
2010	Milho (Grãos = $1,48 \text{ Mg ha}^{-1}$) (Biomassa = $0,62 \text{ Mg ha}^{-1}$) Mandioca (Raíz = $2,87 \text{ Mg ha}^{-1}$) (Biomassa = $2,94 \text{ Mg ha}^{-1}$)	Pousio Natural*
2011	Feijão caupi + Mandioca (Perdido todo segundo ciclo)	Preparo de área corte e queima (Nov./2011)
2012	Pousio Natural	

* Dados de produção de biomassa e produtividade das culturas não disponíveis.

Fonte: Saime Rodrigues

Foram pesados 15 g de TFSA em frascos de centrífuga de 50 mL, sendo adicionados 30 mL de solução de NaI. Os frascos foram agitados manualmente por 30 segundos. A seguir, as amostras foram centrifugadas a 18.000 rpm, por 15 min, aproximadamente a 18 °C. Nesse processo foi separada fração leve livre (FLL).

A FLL sobrenadante presente na solução foi vertida cuidadosamente em cadinho de Gooch de 50 mL juntamente com a solução de NaI, que posteriormente foi succionada e, imediatamente, filtrada a vácuo (sistema kitasato). Para extração da fração leve oclusa FLO foi adicionada solução de NaI ao material remanescente no tubo de centrífuga. Os tubos foram agitados horizontalmente por 16 h a 180 rpm, para rompimento de agregados do solo. Após agitação foi realizada a segunda centrifugação do material a 630 rpm por 5 min. para flotação da FLO.

Após a obtenção de FLL e FLO, as amostras foram secas em estufa de circulação forçada de ar a 65°C por 48 h. Após esse período, as amostras foram pesadas em balança analítica com precisão de 0,0001 g (marca Toledo, modelo AR2140).

O fracionamento físico granulométrico foi realizado segundo método descrito por Cambardella; Elliott (1993), adaptado por Lima et al. (2008). Foram pesados 20 g de TFSA em frascos de polietileno de 250 mL, aos quais foram adicionados 70 mL de solução de hexametáfosfato de sódio (0,5 M). Em seguida, os frascos foram agitados horizontalmente por 16 h a 180 rpm.

Para separação das frações matéria orgânica particulada (MOP) e silte + argila (S+A), peneirou-se o material em malha de 53 µm. O material retido na peneira (MOP) foi seco em estufa a 65 °C por 72 h e pesado. Para recuperar a fração S+A o material remanescente foi centrifugado a 50.000 rpm por 15 min., à temperatura controlada de aproximadamente 10°C. Após a separação das frações, as suas massas foram quantificadas em balança analítica com precisão de 0,0001 g.

Para determinação do carbono e nitrogênio total do solo e das frações, e do carbono do carvão foi realizada a moagem do material em gral de Ágata e peneiramento em malha 60 mesh. A quantificação foi realizada por combustão via seca em analisador elementar (LECO, modelo CNS 2000).

O estoque de carbono e nitrogênio do solo e das frações foi estimado pelo método da massa de solo equivalente (ELLERT; BETTANY, 1995), em que se utiliza como referência a massa de solo de uma camada padrão de um tratamento que

representa condições mais próximas de um ecossistema natural. Neste estudo, a massa de solo utilizada como referência foi da floresta secundária.

A taxa anual de seqüestro de C e N foi calculada com o valor acumulado, em cada período, em relação ao sistema com queima e dividido pelo número de anos que o sistema foi manejado em 2010 e 2012 (9 e 11 anos respectivamente).

Os dados foram submetidos à análise de variância ($p \leq 0,05$) no programa SigmaPlot 11.0, para testar o efeito dos tratamentos no estoque de carbono e nitrogênio no solo e nas frações da matéria orgânica, em cada ano e entre os anos de coleta. Quando necessário, os dados foram transformados (\log_{10}), para atender aos requisitos de normalidade da distribuição e homogeneidade das variâncias. Os resultados, no entanto, foram apresentados com média e erro-padrão originais. Para comparação das médias, aplicou-se o teste Tukey ($p \leq 0,05$).

2.3 Resultados

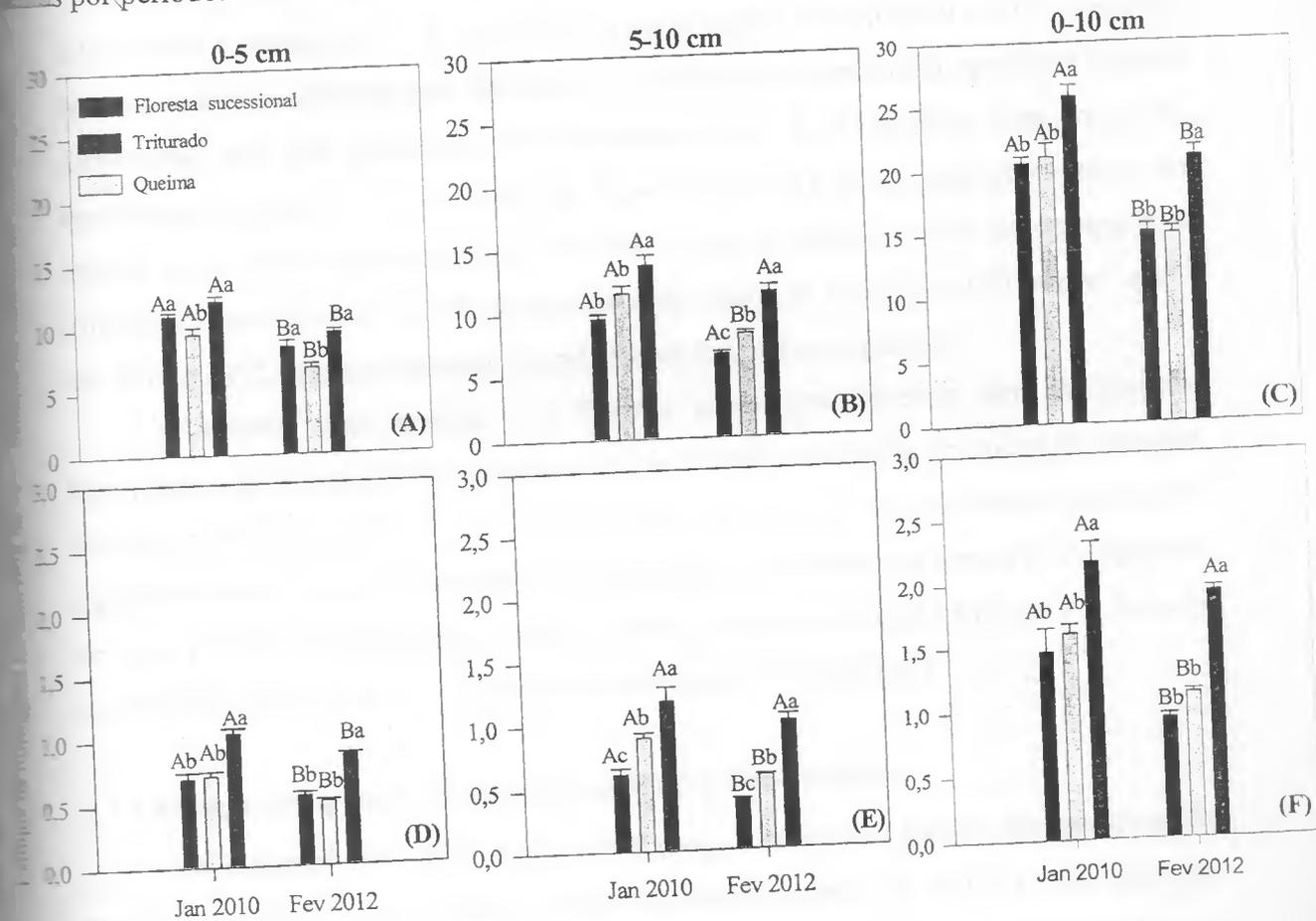
2.3.1 Estoque de carbono no solo

Houve efeito significativo ($p \leq 0,05$) da interação entre sistemas e períodos de coleta sobre o estoque de C(carbono) do solo (Figuras 1A, 1B e 1C). O estoque de C foi maior no sistema com trituração e na floresta sucessional na camada 0-5 cm, em relação ao sistema com queima em ambos os períodos de coleta (Figura 1A). Na camada 5-10 cm, o estoque de C foi maior no sistema com trituração, em relação ao sistema com queima e floresta sucessional, em 2010. Em 2012 o estoque de C foi maior no sistema com queima na camada 5-10 cm em relação à floresta sucessional (Figura 1B).

Houve efeito significativo ($p \leq 0,05$) da interação entre sistemas e períodos de coleta sobre o estoque de C do solo na camada 0-10 cm (Figura 1C). Em 2010 e 2012 o estoque de C foi maior no sistema com trituração em relação ao sistema com queima e floresta sucessional (Figura 1C), de modo que sua taxa de acúmulo de C foi de 4,74 e 6,02 Mg ha⁻¹ em 2010 e 2012, respectivamente, em relação ao sistema com queima.

A taxa de seqüestro de C no sistema com trituração, considerando o efeito do manejo com trituração foi 0,53 e 0,55 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, em 2010 e 2012, respectivamente, em relação ao sistema com queima nesta camada. Todos os sistemas tiveram uma diminuição significativa do estoque de C no solo entre os períodos de coleta, em todas as camadas avaliadas (Figuras 1A, 1B e 1C).

Fig. 1: Estoque de carbono (A, B e C) e nitrogênio (D, E e F) do solo nas camadas 0-5 cm (A e D), 5-10 cm (B e E) e 0-10 cm (C e F) nos períodos de coleta (jan 2010 e fev 2012) nos sistemas de manejo avaliados em Argissolo Amarelo, Igarapé-Açú/PA. As barras representam o erro-padrão da amostragem. Letras iguais maiúsculas não diferem entre períodos de coleta e letras minúsculas entre sistemas por período.



Fonte: Saime Rodrigues

No entanto, as perdas de C estocado no solo a 0-10 cm foram na ordem: sistema com queima ($6,15 \text{ Mg ha}^{-1}$) > floresta sucessional ($5,54 \text{ Mg ha}^{-1}$) > sistema com trituração ($4,87 \text{ Mg ha}^{-1}$).

2.3.2 Estoque de nitrogênio no solo

O estoque de N no solo foi afetado significativamente ($p \leq 0,05$) pela interação entre sistemas e períodos de coleta nas camadas 0-5 e 5-10 cm (Figuras 1D e 1E). O

estoque de N foi maior no sistema com trituração nas duas camadas e nos dois períodos de coleta, em relação ao sistema com queima e a floresta sucessional, que não diferiram significativamente entre si em 2010 na camada 0-5 cm (Figura 1D). Na camada 5-10 cm o estoque de N foi maior no sistema com queima nos dois períodos de coleta em relação à floresta sucessional (Figura 1E).

Houve efeito significativo ($p \leq 0,05$) da interação entre sistemas e períodos de coleta sobre o estoque de N na camada 0-10 cm (Figura 1F). Em 2010 e 2012 o estoque de N foi maior no sistema com trituração, em relação ao sistema com queima e floresta sucessional, que não diferiram estatisticamente entre si. O sistema com trituração apresentou acúmulo de 0,33 e 0,36 Mg N ha⁻¹ em 2010 e 2012, respectivamente, em relação ao sistema com queima nesta camada. A taxa de seqüestro de N no sistema com trituração, considerando o efeito do manejo com trituração foi 0,04 e 0,03 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ em 2010 e 2012, respectivamente, em relação ao sistema com queima.

O sistema com queima e a floresta sucessional tiveram uma diminuição significativa de estoque de N no solo entre os períodos de coleta, em todas as camadas avaliadas (Figuras 1D, 1E e 1F). Nas camadas 5-10 e 0-10 cm não houve diminuição significativa de N entre os períodos, no sistema com trituração. As perdas de N estocado no solo a 0-10 cm seguiram a ordem: sistema com queima (0,52 Mg ha⁻¹) > floresta sucessional (0,36 Mg ha⁻¹) > sistema com trituração (0,35 Mg ha⁻¹).

2.3.3 Estoque de carbono e nitrogênio nas frações densimétricas

Os estoques de C (C_{FLL} e C_{FLO}) e N (N_{FLL} e N_{FLO}) das frações densimétricas da matéria orgânica do solo foram afetadas significativamente ($p \leq 0,05$) pela interação entre sistemas e períodos de coleta (Tabela 3). Na camada 0-5 cm, o estoque de C_{FLL} e N_{FLL} foi maior no sistema com trituração e floresta sucessional, em relação ao sistema com queima, que não diferiram significativamente entre si, em ambos os períodos de coleta. Nesta camada, em 2010 o estoque de C_{FLO} foi maior no sistema com trituração, comparado a floresta sucessional e ao sistema com queima, que diferiram estatisticamente entre si. No entanto, em 2012 não houve diferença significativa entre o sistema com trituração e a floresta secundária no estoque de C_{FLO} e N_{FLO} . O estoque de N_{FLO} foi significativamente maior no sistema com trituração, seguido pela floresta sucessional e o sistema com queima que diferiram estatisticamente entre si, em 2010.

Na camada 5-10 cm, em 2010 o estoque de C_{FLL} , C_{FLO} , N_{FLO} e N_{FLL} foi maior no sistema com trituração, em relação à floresta sucessional e ao sistema com queima, que só diferiram entre si no estoque de N_{FLO} e N_{FLL} (Tabela 3). Em 2012, na camada 5-10 cm o sistema com trituração e a floresta sucessional não se diferenciaram significativamente em relação ao estoque de C_{FLL} , N_{FLL} e N_{FLO} . O estoque de C_{FLO} e N_{FLO} foi maior na floresta secundária, em relação aos sistemas com queima e com trituração.

Na camada 0-10 cm, nos dois períodos de coleta, o estoque de C_{FLL} , N_{FLL} e N_{FLO} foi maior no sistema com trituração e na floresta sucessional, em relação ao sistema com queima, exceto em 2010, quando o estoque de C_{FLO} do sistema com trituração foi maior que na floresta sucessional, que teve estoque igual ao sistema com queima. O estoque de C_{FLL} , C_{FLO} , N_{FLL} e N_{FLO} aumentou significativamente na floresta sucessional, entre os dois períodos de coleta em todas as camadas (Tabela 3). Nas camadas 5-10 e 0-10 cm, o estoque de N_{FLL} e N_{FLO} aumentou no sistema com trituração, e no sistema com queima aumentou o estoque de C_{FLO} , entre os períodos de coleta.

2.3.4 Estoque de carbono e nitrogênio nas frações granulométricas

Os estoques de C (C_{MOP} e C_{S+A}) e N (N_{MOP} e N_{S+A}) das frações granulométricas da matéria orgânica do solo foram afetados significativamente ($p \leq 0,05$) pela interação entre sistemas e períodos de coleta nas camadas 0-5 e 5-10 cm (Tabela 4). No entanto, no ano de 2010 não houve efeito significativo dos sistemas no estoque de C_{MOP} . Na camada 0-5 cm, o estoque de N_{MOP} do sistema com trituração e da floresta sucessional foi maior, em ambos os períodos, em relação ao sistema com queima, e para C_{MOP} em 2012 foi verificada mesmo resultado (Tabela 4). Nesta camada, o estoque de C_{S+A} e N_{S+A} do sistema com trituração foi maior que o sistema com queima, não diferindo da floresta sucessional e somente o sistema com trituração teve aumento significativo entre os períodos no estoque de C_{MOP} .

Tabela 3 Estoque de carbono (C_{FLL} e C_{FLO}) e nitrogênio (N_{FLL} e N_{FLO}) das frações densimétricas da matéria orgânica do solo, em floresta sucessional (FS), sistema com trituração (ST) e sistema com queima (SQ) em Argissolo Amarelo, janeiro de 2010 e fevereiro de 2012.

Período	C_{FLL} ($Mg\ ha^{-1}$)			N_{FLL} ($Mg\ ha^{-1}$)			C_{FLO} ($Mg\ ha^{-1}$)			N_{FLO} ($Mg\ ha^{-1}$)		
	FS	SQ	ST	FS	SQ	ST	FS	SQ	ST	FS	SQ	ST
	0-5 cm											
2010	1,58 Ba	1,02 Ab	1,77 Aa	0,08 Aa	0,04 Ab	0,08 Aa	0,07 Bb	0,05 Ac	0,12 Aa	0,004 Bb	0,002 Ac	0,006 Aa
2012	2,17 Aa	0,62 Bb	1,94 Aa	0,10 Aa	0,03 Ab	0,11 Aa	0,16 Aa	0,04 Ab	0,13 Aa	0,009 Aa	0,002Ab	0,008Aa
	5-10 cm											
2010	1,04 Bb	0,78 Ab	1,55 Aa	0,04 Bb	0,03 Ac	0,06 Ba	0,07 Bb	0,05 Bb	0,11 Aa	0,004 Bb	0,003 Ac	0,006 Ba
2012	1,94 Aa	0,75 Ab	1,64 Aa	0,08 Aa	0,03 Ab	0,08 Aa	0,20 Aa	0,10 Ab	0,12 Ab	0,012 Aa	0,004 Ab	0,014 Aa
	0-10 cm											
2010	2,62 Bb	1,80 Ac	3,32 Aa	0,12 Ba	0,07 Ab	0,14 Ba	0,15 Bb	0,10 Bb	0,23 Aa	0,008 Bb	0,005 Ac	0,012 Ba
2012	4,11 Aa	1,38 Ab	3,59 Aa	0,18 Aa	0,06 Ab	0,19 Aa	0,36 Aa	0,15 Ac	0,25 Ab	0,021 Aa	0,006 Ac	0,022 Aa

C_{FLL} - carbono fração leve-livre, C_{FLO} -carbono fração leve-oclusa, N_{FLL} - nitrogênio fração leve-livre e N_{FLO} -nitrogênio fração leve-oclusa. Médias seguidas de letras iguais, maiúsculas entre períodos e minúsculas entre sistemas, não diferem, entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Tabela 4. Efeitos do carbono (C_{MOP} e C_{S+A}) e nitrogênio (N_{MOP} e N_{S+A}) das frações granulométricas da matéria orgânica do solo, em floresta sucessional (FS), sistema com trituração (ST) e sistema com queima (SQ) em Argissolo Amarelo, janeiro de 2010 e fevereiro de 2012.

Período	C_{MOP} ($Mg\ ha^{-1}$)			N_{MOP} ($Mg\ ha^{-1}$)			C_{S+A} ($Mg\ ha^{-1}$)			N_{S+A} ($Mg\ ha^{-1}$)		
	FS	SQ	ST	FS	SQ	ST	FS	SQ	ST	FS	SQ	ST
	0-5 cm											
2010	2,82 Ba	2,11 Aa	2,53 Ba	0,17 Aa	0,08 Ab	0,16 Aa	4,43 Aab	3,68 Ab	4,90 Aa	0,36 Aab	0,29 Ab	0,40 Aa
2012	3,48 Aa	2,11 Ab	3,32 Aa	0,13 Aa	0,08 Ab	0,16 Aa	4,96 Aab	4,13 Ab	5,11 Aa	0,39 Aab	0,35 Ab	0,44 Aa
	5-10 cm											
2010	1,88 Aa	2,06 Aa	2,33 Ba	0,07 Aa	0,07 Aa	0,07 Ba	4,29 Ab	5,01 Ab	6,64 Aa	0,33 Ab	0,39 Bb	0,50 Aa
2012	2,23 Aab	1,92 Ab	3,00 Aa	0,10 Aa	0,09 Aa	0,15 Aa	4,28 Ab	5,63 Aa	6,00 Aa	0,36 Ab	0,48 Aa	0,52 Aa
	0-10 cm											
2010	4,70 Ba	4,17 Aa	4,86 Ba	0,23 Aa	0,15 Ab	0,23 Ba	8,71 Ab	8,68 Ab	11,53 Aa	0,69 Ab	0,68 Bb	0,91 Aa
2012	5,71 Aa	4,03 Ab	6,32 Aa	0,24 Aab	0,17 Ab	0,31 Aa	9,24 Ab	9,75 Aab	11,11Aa	0,75 Ab	0,83 Ab	0,96 Aa

C_{MOP} - carbono fração particulada, C_{S+A} -carbono fração silte + argila, N_{MOP} - nitrogênio fração particulada e N_{S+A} - fração silte + argila. Médias seguidas de letras iguais, maiúsculas entre períodos e minúsculas entre sistemas, não diferem, entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Na camada 5-10 cm, em 2012, o estoque de C_{MOP} foi maior no sistema com trituração, em relação ao sistema com queima e a floresta secundária (Tabela 4). Nesta camada, em 2010, o estoque de C_{S+A} e N_{S+A} foi maior no sistema com trituração, em relação ao sistema com queima e a floresta secundária. Em 2012, o estoque de C_{S+A} e N_{S+A} dos sistemas com trituração e com queima foi maior em relação à floresta sucessional. Nesta camada o sistema com trituração teve aumento significativo no estoque de C_{MOP} e N_{MOP} , entre os períodos, enquanto que o sistema com queima teve aumento de C_{S+A} .

Na camada 0-10 cm, em 2010, o estoque de N_{MOP} do sistema com trituração e da floresta sucessional foi maior em relação ao sistema com queima, e o estoque de C_{S+A} e N_{S+A} foi maior no sistema com trituração em relação ao sistema com queima e a floresta sucessional (Tabela 4). Em 2012 o estoque de C_{MOP} foi maior no sistema com trituração e floresta sucessional em relação ao sistema com queima, e o estoque de N_{MOP} foi maior no sistema com trituração em relação ao sistema com queima e a floresta sucessional. O estoque de C_{S+A} e N_{S+A} foi maior no sistema com trituração que na floresta sucessional, não diferindo significativamente do sistema com queima no estoque de C_{S+A} . Nesta camada houve aumento no estoque de C_{MOP} na floresta sucessional, C_{MOP} e N_{MOP} no sistema com trituração e N_{S+A} no sistema com queima, entre os períodos.

2.4 Discussão

2.4.1 Estoque de carbono e nitrogênio total no solo

No Brasil, estudos mostram que a supressão do manejo de queima tem efeito no estoque e seqüestro de C e N do solo (RESENDE et al., 2006; LUCA et al., 2008; PINHEIRO et al., 2010), como evidenciado neste estudo. Boddey et al. (2012) explicaram que as taxas de deposição e decomposição de resíduos vegetais no solo controlam o acúmulo de C. Neste estudo verificou-se o aumento do estoques de C no sistema com trituração de 4,74 e 6,02 Mg ha⁻¹ em 2010 e 2012, respectivamente, tendo taxas de seqüestro de C anual de 0,47 e 0,50 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ (2010 e 2012 respectivamente), em relação ao sistema com queima. Devendo-se, possivelmente à distribuição de biomassa sobre o solo após a trituração e também ao maior acúmulo de resíduos das culturas do sistema com trituração em relação ao com queima. Luca et al. (2008) avaliando manejo da cana-de-açúcar com e sem queima também observaram

maior acúmulo de biomassa (palhada) no sistema sem queima $3,6 \text{ Mg ha}^{-1}$ em Neossolo (365 g kg^{-1} de areia) no Sudeste do Brasil.

O maior estoque de N no solo do sistema com trituração, em relação ao sistema com queima, é um fator preponderante para maior acúmulo de C no solo, pois um balanço positivo de N no sistema (entradas superam exportações) promove acúmulo de C (BODDEY et al., 2012). Diekow et al. (2005) evidenciou que sistemas conservacionistas com uso de leguminosas arbóreas promovem maior acúmulo de C no solo, em relação aos que não continham leguminosas.

O maior estoque de N no sistema com trituração provavelmente deve-se ao efeito do uso de leguminosas arbóreas (ingá e acácia) durante o período de pousio no acúmulo de N. Outros estudos mostram que a utilização de leguminosas fixadoras de N_2 atmosférico, em sistemas de rotação de culturas e enriquecimento de vegetação de pousio, resulta em maior estoque de N no solo (LOVATO et al., 2004; DIEKOW et al., 2005; RANGEL-VASCONCELOS et al., 2012).

De maneira geral, a floresta sucessional apresentou menor estoque de C e N em relação ao sistema com trituração e até mesmo ao sistema com queima, na camada 5-10 cm em 2012. Estudos em florestas sucessionais na Amazônia têm mostrado que diversos fatores controlam o acúmulo de biomassa nestes ecossistemas, como histórico de uso da terra, fertilidade do solo e clima (GEHRING et al., 1999; ZARIN et al., 2005). Sommer et al. (2000) verificaram que o estoque de C de florestas sucessionais em pousio no Nordeste Paraense, leva entre 12 a 40 anos para aproximar-se de uma floresta primária. Processos de armazenamento e estabilização de C em florestas sucessionais, após diversos períodos de cultivo, ocorre a longo prazo (PAUL et al., 2008).

Uma possível explicação para o maior estoque de N na camada 5-10 cm no sistema com queima em relação à floresta sucessional em 2012 pode estar relacionado ao manejo da queima, pois pode promover um incremento nos processos de mineralização, como analisado por Melillo et al. (2001) em Rondônia. Resultados semelhantes foram encontrados tanto para C como para N em camadas de 0-2 até 0-15 cm com incremento de C e N após a queima (RHEINHEIMER et al., 2003; KNICKER et al., 2005; SANTÍN et al., 2008; POTES et al., 2010), embora neste estudo, na camada

0-10 cm, observamos que após a queima há uma redução nos estoques de C e N maiores que na floresta sucessional entre os períodos de coleta.

A redução de 29,3 e 27,46% no sistema com queima, 26,92 e 32,28% na floresta secundária, e, 18,91 e 15,84% no sistema com trituração nos estoques de C e N, respectivamente, em apenas dois anos sugere que a dinâmica desses elementos é elevada. De fato, Feller; Beare (1997) explicaram que solos tropicais, altamente intemperizados, são mais susceptíveis a perdas de MOS. Boddey et al. (2012) também explicaram que solos com altos teores de areia (aproximadamente 80%), dependendo do sistema de manejo, estão sujeitos a perdas significativas de C no solo.

Apesar da redução dos estoques de C e N em todos os sistemas avaliados, a proporção entre eles mostrou que o sistema com trituração e a floresta sucessional tiveram redução menos acentuada. Estes resultados sugerem que sistemas que favorecem maior aporte de biomassa na superfície do solo tendem a estabilizar estes elementos no solo. No entanto, estudos ainda devem ser realizados por um período maior para que se possa ter um melhor entendimento sobre o balanço de C e N nestes sistemas.

2.4.2 Estoque de carbono e nitrogênio nas frações densimétricas

O maior estoque de C_{FLL} , N_{FLL} , C_{FLO} e N_{FLO} no sistema com trituração e na floresta sucessional em relação ao sistema com queima, na camada 0-5 cm, se deve ao maior retorno de biomassa de resíduos vegetais no solo e a qualidade do material, possivelmente com maiores teores de C e N. Christensen (2000) explica que a fração leve-livre apresenta relativa facilidade de decomposição e sua dinâmica está ligada ao suprimento de resíduos orgânicos do sistema. Para Six et al. (2002) a dinâmica das frações da matéria orgânica tem relação direta com a quantidade e qualidade de resíduos depositados no solo.

Cambardella; Elliott (1994) explicam que a fração leve-livre da matéria orgânica do solo possui alta labilidade respondendo rapidamente a redução do aporte de resíduos vegetais em agroecossistemas, sendo evidenciado neste estudo para estoques de C e N das frações leves em todos os sistemas avaliados. De maneira geral, oscilações na dinâmica das frações leves da matéria orgânica são normalmente notadas em camadas superficiais, onde há o maior acúmulo de MOS (JAZEN et al., 1992; BODDEY et al.,

2012). O maior estoque de C e N das frações leves observado no sistema com trituração está relacionado à deposição de biomassa da trituração e resíduos das culturas, enriquecida com leguminosas arbóreas.

A floresta sucessional teve aumento no estoque de C e N nas frações leves entre os períodos de coleta, provavelmente devido à constante entrada de resíduos orgânicos no solo via deposição de liteira (queda de folhas senescentes e rizodeposição). Além desse fator, a decomposição nesta área ocorre com menor intensidade quando comparado com áreas manejadas, como observado por Pavinato; Rosolem (2008). O aumento no estoque do C e N nas frações leves da floresta sucessional sugere que esse sistema está conseguindo estabilizar estes elementos na MOS.

No sistema com queima observou-se menor estoque de C_{FLL} e N_{FLL} na fração leve-livre em todas as camadas, em relação ao sistema com trituração nos dois períodos de coleta. O efeito negativo da queima sobre a fração leve-livre da matéria orgânica se deve à sua exposição a elevadas temperaturas, resultando em rápida combustão, pois esta fração apresenta como mecanismo de proteção, somente a recalcitrância molecular (ROSCOE; MACHADO, 2002).

Os resultados dos estoques de C e N da fração leve-oclusa estão de acordo com os obtidos por Rangel-Vasconcelos; Kato; Vasconcelos (2012). A mineralogia particular de solos composta por caulinita e óxidos (RESENDE et al., 1997) contribui para limitações na agregação, explicando sua baixa capacidade natural em armazenar C e N na fração leve-oclusa (ROSCOE; BREMMER, 2003). No entanto, observa-se que o sistema com trituração e a floresta sucessional apresentaram maior estoque de C_{FLO} e N_{FLO} , em relação ao sistema com queima, provavelmente devido sua cobertura do solo pelo *mulch*, diminuindo perdas por erosão e lixiviação e aumentando a porosidade total e a agregação do solo (MULUMBA; LAL, 2008).

Os resultados encontrados neste estudo sugerem que o sistema com trituração está conseguindo estabilizar o material orgânico presente no solo. Deste modo, ocorre o acúmulo em seus compartimentos mais estáveis e resistentes à decomposição microbiana, pela oclusão física, restringindo o ataque microbiano, assim como o acesso das enzimas do solo. Rangel-Vasconcelos et al. (2012) observaram diminuição do C_{FLO} após o período de cultivo em sistema com corte-trituração mecanizada no manejo

agrícola, sugerindo que há perda de estabilidade da fração leve-oclusa no solo, fato não evidenciado neste estudo.

Observamos que houve aumento no estoque de C_{FLO} no sistema com queima nas camadas 5-10 e 0-10 cm. Esta resposta em relação ao C desta fração possivelmente esta relacionada à mobilidade e ao acúmulo de materiais carbonizados na subsuperfície, influenciando na dinâmica desta fração. Roscoe; Buurman; Velthorst (2000) e Pinheiro (2007) verificaram que, em solos com vegetação periodicamente queimada, a dinâmica das frações leves da MOS foi influenciada pela presença de materiais carbonizados.

Nosso estudo sugere que, independentemente do mecanismo de proteção e estabilização das frações leves, todas foram sensíveis aos sistemas de manejo, evidenciando que esses compartimentos são sensíveis indicadores dos impactos do manejo em agroecossistemas. Nosso estudo também sugere que o sistema com trituração, em substituição ao sistema tradicional de uso do fogo no preparo de área, favorece o acúmulo de C e N nas frações leves da matéria orgânica do solo.

2.4.3 Estoque de carbono e nitrogênio nas frações granulométricas

O fracionamento granulométrico da matéria orgânica do solo baseia-se na separação de frações da matéria orgânica que são associadas a constituintes minerais com diferentes tamanhos de partícula (areia, silte e argila). O carbono do solo é afetado pelo manejo em todas as frações de tamanho de partícula, independentemente se ocorre incremento ou perda de MO da fração (PILLON; MIELNICZUKJ; MARTIN NETO, 2002).

Neste estudo evidencia-se na dinâmica das frações granulométricas da MOS que a fração particulada (MOP) apresentou maior sensibilidade em relação aos períodos de avaliação, possivelmente por essa fração apresentar alta labilidade, pois corresponde, a grosso modo, à FLL obtida pelo fracionamento densimétrico (ROSCOE & MACHADO, 2002). Outra possível explicação é a propriedade das partículas de areia, presentes nessa fração, apresentarem reduzida superfície específica e densidade de carga superficial (CHRISTENSEN et al., 1989), tendo pouco ou nenhum material orgânico fortemente ligado e pouca complexação organomineral (BALDOCK et al., 1992; CHRISTENSEN, 1992), tornando-se mais susceptível aos efeitos do manejo do solo.

De fato, outros estudos observaram maiores modificações no estoque de C_{MOP} em relação ao de C_{S+A} decorrentes do manejo do solo em curto prazo, resultantes da adição de resíduos vegetais diferenciada entre sistemas de cultivo, influenciando a manutenção do C nesta fração (FIGUEIREDO; RESCK; CARNEIRO, 2010; CAMPOS et al., 2011; LOSS et al., 2011).

A fração associada aos minerais (S+A) mostrou maior sensibilidade ao efeito dos sistemas de uso do solo no estoque de C e N, em relação à fração particulada. Este resultado não era esperado, pois, considera-se que essa fração apresenta maior estabilidade no solo (BODDEY et al., 2012), devido os seus mecanismos de proteção à decomposição, ou seja, recalitrância do material, oclusão e complexação nas superfícies minerais.

Observaram-se maiores estoques de C e N na fração S+A, em relação à fração MOP, resultado típico de solos de regiões tropicais, em que as elevadas temperaturas e umidade favorecem a decomposição da MOP, limitando seu acúmulo. Geralmente, esta fração representa aproximadamente 20% da MOS nesses ambientes (BAYER, 1996; PILLON; MIELNICZUKJ; MARTIN NETO, 2002). Maiores estoques e/ou teores de C e N na fração associada aos minerais foram observados por outros estudos de frações da MOS em solos arenosos de regiões tropicais (DESJARDINS et al., 2004; SILVA JÚNIOR et al., 2009; LOSS et al., 2011).

Os maiores estoques de C_{MOP} e N_{MOP} na floresta secundária e no sistema com trituração, em relação ao sistema com queima estão associados à biomassa e resíduos depositados no solo. Loss et al. (2011) observaram que, na camada superficial, a manutenção dos estoques de C_{MOP} é dependente da adição de resíduos vegetais do sistema de manejo. A deposição de biomassa da vegetação de pousio enriquecida por leguminosas deve, portanto, contribuir para manutenção do C e N na MOP e também para estabilização destes na fração S+A.

O estoque de C_{S+A} na camada 5-10 cm apresentou um comportamento inesperado e diferente do encontrado na camada 0-5 cm. Observou-se que não houve diferença nos estoques de C_{S+A} entre os sistemas com trituração e com queima, provavelmente devido à lixiviação e acúmulo de materiais carbonizados (recalcitrantes) na sub-superfície. Durante a queima da biomassa há uma considerável reorganização

das formas de C, em que formas resistentes à oxidação e refratárias, com longos tempos de residência, incluindo o C pirogênico, são formadas (SCHULZE et al., 2000).

2.5 Conclusões

O estoque de carbono e nitrogênio no solo e nas frações da matéria orgânica do solo (densimétricas e granulométricas) é afetado pelos sistemas com queima e com trituração.

O sistema com trituração acumula mais carbono e nitrogênio no solo e nas frações densimétricas e MOP em relação ao sistema com queima.

AGRADECIMENTOS

À Embrapa Amazônia Oriental pelo apoio logístico e financeiro; Ao Deutscher Akademischer Austauschdienst (DAAD) / PRODEMA, pelo apoio financeiro na forma de bolsa de mestrado (Saime J. S. de C. Rodrigues).

REFERÊNCIAS

- BAYER, C. 1996. *Dinâmica da matéria orgânica em sistemas de manejo de solos*. Tese de doutorado em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996. 240p.
- BALDOCK, J. A.; OADES, J. M.; WALTERS, A. G.; PENG, X.; VASSALLO, A. M.; WILSON, M. A. Aspects of the chemical structure of soil organic materials as revealed by solid-state C^{13} NMR spectroscopy. *Biogeochemistry*, v. 16, p. 1-42, 1992.
- BODDEY, R. M.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, R.; JANTALIA, C. P.; MARTINETO, L.; MADARI, B. E.; MILORI, D. M. B. P.; MACHADO, P. L. O. A. Estoques de carbono nos solos do Brasil: quantidade e mecanismos de acúmulo e preservação. In: LIMA, M. A.; BODDEY, R. M.; ALVES, B. J. R.; MACHADO, P. L. O. de A.; URQUIAGA, S. (Eds). *Estoques de carbono e emissões de gases de efeito estufa na agropecuária brasileira*. Brasília, Embrapa, p. 33-80, 2012.
- CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Carbon and nitrogen distribution in aggregates from cultivated and native grassland soils. *Soil Science Society of America Journal*, v. 57, p. 1071-1076, 1993.
- CAMPOS, B. C.; AMADO, T. J. C.; BAYER, C.; NICOLOSO, R. DA S.; FIORIN, J. E. Carbon stock and its compartments in a subtropical oxisol under long-term tillage and crop rotation systems. *Revista Brasileira de Ciência Solo*, Viçosa, v. 35, p. 805-817, 2011.
- CHRISTENSEN, B. T. *Organic matter in soil: structure, function and turnover*. Tjele: DIAS, 2000. 95 p. (DIAS Report. Plant Production, 30).
- CHRISTENSEN, B. T.; BERTELSEN, F.; GISSEL-NIELSEN, G. Selenite fixation by soil particle-size separates. *Journal of Soil Science*, v. 40, p. 641-647, 1989.
- CHRISTENSEN, B. T. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates. *Advances in Soil Sciences*, v. 20, p. 1-90, 1992.
- COMTE, I.; DAVIDSON, R.; LUCOTTE, M.; CARVALHO, C. J. R.; OLIVEIRA, F. A.; SILVA, B. P.; ROUSSEAU, G. X. Physicochemical properties of soils in the Brazilian Amazon following fire-free land preparation and slash-and-burn practices. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 156, p.108-115, 2012.
- DAVIDSON, E. A.; SÁ, T. D. A.; CARVALHO, C. J. R.; FIGUEREDO, R. O.; KATO, M. S. A.; KATO, O. R.; ISHIDA, F. Y. An integrated greenhouse gas assessment of an alternative to slash-and-burn agriculture in eastern Amazonia. *Global Change Biology*, v. 14, p. 998-1007, 2008.

- DESJARDINS, T.; BARROS, E.; SARRAZIN; GIRARDIN M.; MARIOTTI, A. Effects of forest conversion to pasture on soil carbon content and dynamics in Brazilian Amazonia. *Agriculture Ecosystems and Environment*, v. 103, p. 365-373, 2004.
- DENICH, M.; VIELHAUER, K.; KATO, M. S. A.; BLOCK, A.; KATO, O. R.; SÁ, T. D. A.; LÜCKE, W.; VLEK, P. L. G. Mechanized land preparation in forest-based fallow systems: the experience from Eastern Amazonia. *Agroforestry Systems*, v. 61-62, p. 91-106, 2004.
- DIEKOW, J.; MIELNICZUK, J.; KNICKER, H.; BAYER, C.; DICK, D.; KOGELKNABNER, P. Soil C and N stocks as affected by cropping systems and nitrogen fertilisation in a southern Brazil Acrisol managed under no-tillage for 17 years. *Soil & Tillage Research*, v. 81, p. 87-95, 2005.
- ELLERT, B.H.; BETTANY, J.R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. *Canadian Journal of Soil Science*, Canadá, v. 75, p. 529-538, 1995.
- EMBRAPA (1997) Centro Nacional de Pesquisa de Solos, *Manual de métodos de análises de solo*. Rio de Janeiro, pp 212.
- EMBRAPA, 1999. Centro Nacional de Pesquisa em Solos. *Sistema Brasileiro de Classificação de solos*. Embrapa, Brasília.
- FEARNSIDE, P. M. Fogo e emissão de gases de efeito estufa dos ecossistemas florestais da Amazônia brasileira. *Estudos Avançados*, v. 16, p. 97-123, 2002.
- FELLER, C.; BEARE, M. H. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma*, v. 79, p. 69-116, 1997.
- FIGUEIREDO, C. C.; RESCK, D. V. S.; CARNEIRO M. A. C. Labile and stable fractions of soil organic matter under management systems and native Cerrado. *Revista Brasileira de Ciência Solo*, Viçosa, v. 34, p. 907-916, 2010.
- GEHRING, C.; DENICH, M.; KANASHIRO, M.; VLEK, P. L. G. Response of secondary vegetation in Eastern Amazonia to relaxed nutrient availability constraints. *Biogeochemistry*, v. 45, p. 223-241, 1999.
- JANZEN, H. H.; CAMPBELL, C. A.; BRANDT, S. A.; LAFOND, G. P.; TOWNLEY-SMITH, L. Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations. *Soil Science Society of America Journal*, v. 56, p. 1799-1806, 1992.
- KATO, M. S. A.; KATO, O. R.; DENICH, M.; VLEK, P. L. G. Fire-free alternatives to slash-and-burn for shifting cultivation in the eastern Amazon region: the role of fertilizers. *Field Crops Research*, v. 62, p. 225-237, 1999.
- LIMA, A. M. N.; SILVA, I. R.; NEVES, J. C. L.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; MENDONÇA, E. S.; DEMOLINARI, M. S. M.; LEITE, F. P. Frações da matéria

orgânica do solo após três décadas de cultivo de eucalipto no vale do Rio Doce - MG. *Revista Brasileira de Ciência Solo*, Viçosa, v. 32, p. 1053-1063, 2008.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; SCHULTZ, N.; ANJOS, L. H. C.; SILVA, E. M. R. Frações orgânicas e índice de manejo de carbono do solo em diferentes sistemas de produção orgânica. *IDESIA*, Chile, v. 29, p. 11-19, 2011.

LOVATO, T.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; VEZZANI, F. M. Adição de carbono e nitrogênio e sua relação com os estoques no solo e com o rendimento do milho em sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 28, p. 175-187, 2004.

LUCA, E. F.; FELLER, C.; CERRI, C. C.; BARTHÈS, B.; CHAPLOT, V.; CAMPOS, D. C.; MANECHINI, C. Avaliação de atributos físicos e estoque de carbono e nitrogênio em solos com queima e sem queima de canavial. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 32, p. 789-800, 2008.

MELILLO, J. M.; STEUDLER, P. A.; FEIGL, B. J.; NEILL, C.; GARCIA, D.; PICCOLO, M. C.; CERRI, C.; TIAN, H. Nitrous oxide emissions from forests and pasture of various ages in the Brazilian Amazon. *Journal of Geophysical Research*, v. 106, p. 179-188, 2001.

MENDONÇA, E. S.; MATOS, E. S. *Matéria orgânica do solo: métodos de análises*. Viçosa: UFV, 2005. 107p.

MULUMBA, L. N.; LAL, R. Mulching effects on selected soil physical properties. *Soil and Tillage Research*, v.98, p.106-111, 2008.

PAUL, S.; VELDKAMP, E.; FLESSA, H. Soil organic carbon in density fractions of tropical soils under forest – pasture – secondary forest land use changes. *European Journal of Soil Science*, v. 59, p. 359-371, 2008.

PAVINATO, P. C.; ROSOLEM, C. A. Disponibilidade de nutrientes no solo - decomposição e liberação de compostos orgânicos de resíduos vegetais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 32, p. 911- 920, 2008.

PILLON, C. N.; MIELNICZUK J.; MARTIN NETO, L. *Métodos de fracionamento e caracterização da matéria orgânica do solo*, Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2002. 50p.

PINHEIRO, E. F. M.; PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C.; MACHADO, P. L. O. A. Fracionamento densimétrico da matéria orgânica do solo sob diferentes sistemas de manejo e cobertura vegetal em Paty do Alferes (RJ). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 28, p. 731-737, 2004.

PINHEIRO, E. F. M. *Fracionamento físico e caracterização da material orgânica do solo sob diferentes coberturas vegetais*. 113p. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2007.

- PINHEIRO, E. F. M.; LIMA, E.; CEDDIA, M. B.; URQUIAGA, S.; ALVES, B. J. R.; BODDEY, R. M. Impact of pre-harvest burning versus trash conservation on soil carbon and nitrogen stocks on a sugarcane plantation in the Brazilian Atlantic forest region. *Plant and Soil*, v. 333, p. 71–80, 2010.
- POTES, M. L.; DICK, D. P.; DALMOLIN, R. S. D.; KNICKER, H.; ROSA, A. S. Matéria orgânica em Neossolos de altitude: Influência da queima da pastagem e do tipo de vegetação na sua composição e teor. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 34, p. 23-32, 2010.
- RANGEL-VASCONCELOS, L. G. T.; KATO, O. R.; VASCONCELOS, S. S. Matéria orgânica leve do solo em sistema agroflorestal de corte e trituração sob manejo de capoeira. *Pesquisa agropecuária brasileira*, Brasília, v. 47, p. 1142-1149, 2012.
- RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B.; CORRÊA, G. F. *Pedologia: base para distinção de ambientes*. 2. ed. Viçosa: NEPUT, 1997. 367 p.
- RHEINHEIMER, D. S.; SANTOS, J. C. P.; FERNANDES, V. B. B.; MAFRA, A. L.; ALMEIDA, J. A. Modificações nos atributos químicos de solo sob campo nativo submetido à queima. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 33, p. 49-55, 2003.
- RODRIGUES, M. A. C. M.; MIRANDA, I. S.; KATO, M. S. A. Flora e estrutura da vegetação secundária após o uso de diferentes trituradores florestais. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 42, p. 459-465, 2007.
- ROSCOE, R.; BUURMAN, P.; VELTHORST, E. J. Disruption of soil aggregate by different amounts of ultrasonic energy in SOM fractionation of a clay Latosol: carbon, nitrogen, and C^{13} distribution in particle-size fractions *European Journal of Soil Science*, v. 51, p. 445-454, 2000.
- ROSCOE, R.; MACHADO, P. L. O. A. *Fracionamento físico do solo em estudos da matéria orgânica*. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002. 86p.
- ROSCOE, R.; BUURMAN, P. Tillage effects on soil organic matter in density fractions of a Cerrado Oxisol. *Soil & Tillage Research*, v. 70, p. 107–119, 2003.
- SANTÍN, C.; KNICKER, H.; FERNÁNDEZ, S.; MENÉNDEZ-DUARTE, R.; ÁLVAREZ, M. A. Wildfires influence on soil organic matter in an Atlantic mountainous region (NW of Spain). *Catena*, v. 74, p. 286–295, 2008.
- SILVA JÚNIOR, M. L.; DESJARDINS, T.; SARRAZIN, M.; MELO, V. S.; SANTOS, E. R.; CARVALHO, J. R. Carbon content in Amazonian Oxisols after Forest conversion to pasture. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 33, p. 1603-1611, 2009.

SIX, J.; CONANT, R. T.; PAUL, E. A.; PAUSTIAN, K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, v. 241, p. 155-176, 2002.

SOHI, S.; MAHIEU, N.; ARAH, J. R. M.; POLWSON, D. S. P.; MADARI, B.; GAUNT, J. L. A procedure for isolating soil organic matter fractions suitable for modeling. *Soil Science Society of America Journal*, v. 65, p. 1121-1128, 2001.

SOMMER, R., DENICH, M., VLEK, P. L. G. Carbon storage and root penetration in deep soils under small-farmer land-use systems in the Eastern Amazon region, Brazil. *Plant and Soil*, v. 219, p. 231-241, 2000.

SWIFT, R.S. Sequestration of carbon by soil. *Soil Science*, v. 166, p. 858-871, 2001.

UHL, C. Factors controlling succession following slash-and-burn agriculture in Amazonia. *Journal of Ecology*, v.75, p.377-407, 1987.

ZARIN, D.J.; DAVIDSON, E.A.; BRONDIZIO, E.; VIEIRA, I.C.G. ; SA, T.; FELDPALUSCH, T.; SCHUUR, E.A.; MESQUITA, R.; MORAN, E.; DELAMONICA, P.; DUCHEY, M.J.; HURTT, G.C.; SALIMON, C.; DENICH, M. Legacy of fire slows carbon accumulation in Amazonian forest regrowth. *Frontiers in Ecology and the Environment*, v. 3, p. 365-369, 2005.

3 MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DE CARBONO EM ARGISSOLO NA AMAZÔNIA ORIENTAL

RESUMO

Os teores de carbono (C) no solo são indicadores sensíveis ao manejo do ambiente, porém a existência de métodos distintos para determinar este atributo do solo pode levar a resultados variáveis, comprometendo a sua interpretação. O objetivo foi testar três metodologias usuais na determinação do C: combustão via seca em analisador elementar, com perda de massa por ignição e combustão via úmida em amostras de solo provenientes de áreas com manejos distintos, localizadas no nordeste paraense. O método de combustão via úmida subestimou o teor de C. Foram encontrados elevados coeficientes de determinação de equações de predição do teor de C total (combustão via seca em analisador elementar) a partir de dados de C determinados por combustão via úmida e perda de massa por ignição. Dessa forma, recomenda-se o emprego do método perda de massa por ignição, reconhecidamente barato, rápido e de baixo impacto negativo ao ambiente, para predizer o teor de C total em Argissolo sob as condições deste estudo.

Palavras-chave: Carbono orgânico. Combustão via seca. Combustão via úmida. Perda de massa por ignição. Regressão.

ABSTRACT

Concentration and carbon stocks in the soil are sensitive indicators of environmental management, but the existence of a number of methods to determine this attribute soil can lead to different results, compromising its interpretation. The objective of this study was to test three usual methodologies for the carbon: dry combustion, mass loss on ignition and combustion in wet soil samples from areas with different managements, one with the use of fire and the other with crushing of vegetation, located in the Northeast of Pará. The wet combustion method underestimated the values of C. All methods showed significant correlation and high coefficients of determination in the regression equations. The method of mass loss on ignition can be preferably used in soil samples, to be more economical than the method of dry combustion and less toxic than the wet combustion method.

Keywords: Organic carbon. Dry combustion. Combustion wet. Mass loss on ignition. Regression.

3.1 Introdução

O carbono do solo (C) é um dos indicadores mais sensíveis de qualidade dos sistemas agrícolas (VEZZANI et al., 2008). A detecção do impacto do manejo agrícola sobre o teor de C do solo requer métodos analíticos precisos de determinação desse elemento (CONYERS et al., 2011). No entanto diversos estudos têm mostrado que há uma diferença em sensibilidade dos métodos atualmente usados no Brasil para determinar o teor de C do solo (GATTO et al., 2009; CARMO; SILVA, 2012; DIAS et al. 2013). A escolha do método analítico é fundamental para o entendimento da dinâmica do C em resposta ao manejo do solo ao longo do tempo (BRYE; SLATON, 2003).

A combustão via seca em analisador elementar, considerada como método padrão, baseia-se na combustão da amostra em forno à temperatura de 1.020–1.500°C, em que as moléculas orgânicas são oxidadas na forma N_xO_y e $CO_2-H_2O + O_2$. Posteriormente, carregadas sob fluxo de hélio, o N_2 e o CO_2 são separados em uma coluna cromatográfica e determinados em células de infravermelho (RHEINHEIMER et al., 2008). É amplamente utilizado nos laboratórios de referência, em virtude da agilidade, precisão e quantificação do C total, ou seja, de suas formas orgânicas e inorgânicas presentes na amostra de solo (GATTO et al., 2009). No entanto, o método apresenta desvantagens relacionadas ao alto custo por análise, que é resultante da aquisição e manutenção do analisador elementar, além dos custos do material de consumo usado na análise (GATTO et al., 2009; CARMO; SILVA, 2012).

O método Walkley-Black (WALKLEY; BLACK, 1934), baseado em combustão via úmida, atualmente é o mais usual em laboratórios de solos no Brasil, pois não requer equipamentos especializados e apresenta boa exatidão por oxidar as frações da matéria orgânica (MO) mais reativas no solo (NELSON; SOMMERS, 1996). Baseia-se na redução do dicromato ($Cr_2O_7^{2-}$) por compostos de C orgânico, e subsequente determinação do remanescente por titulação ou colorimetria (NELSON; SOMMERS, 1996). Contudo, apresenta problemas analíticos, pela limitação em oxidar as formas de C que se encontram mais protegidas ou complexadas com a fração mineral do solo, ocorrendo apenas uma oxidação parcial da MO, excluindo carvão e carbonatos (SEGNINI et al., 2008; NELSON; SOMMERS, 1996; CANTARELLA et al., 2001). A utilização desse método também traz prejuízos ambientais pela geração de resíduos

tóxicos contendo cromo (Cr^{6+}). Esta forma de cromo pode causar câncer por inalação, alterações genéticas hereditárias e sensibilização em contato com a pele dos analistas, e são muito tóxicos para organismos aquáticos (CHEMDAT, 2005).

A perda de massa por ignição (método gravimétrico) é um método de combustão via seca que consiste na quantificação da perda de massa, na forma de dióxido de C (CO_2), por incineração do material orgânico presente na amostra de solo (MIYAZAWA et al., 2000). Tem como vantagens não produzir resíduos de metal tóxicos ao ambiente e aos analistas. No entanto, este método não foi adotado amplamente em laboratórios no Brasil pela demora analítica e dificuldade de automação (MIYAZAWA et al., 2000).

A região amazônica é uma das principais fronteiras agrícolas do mundo, podendo contribuir como fonte ou dreno de C (MAIA et al., 2010). Por se tratar de um indicador de qualidade do solo em sistemas agrícolas e florestais, o teor de C deve ser determinado a partir de métodos analíticos precisos e exatos, que atendam as características intrínsecas à amostra, sobretudo em áreas com histórico de manejo com queima, como em sistemas agrícolas na Amazônia, em que o fogo é utilizado tradicionalmente no preparo de área para plantio (DENICH et al., 2004).

Este trabalho se justifica pela falta de estudos de comparação entre técnicas analíticas de quantificação de C por combustão via seca e via úmida em solos da Amazônia. Portanto, o objetivo foi avaliar os métodos de combustão via seca e úmida para a determinação do teor de C em Argissolo manejado com sistemas com e sem queima da vegetação no nordeste paraense.

3.2 Material e Métodos

3.2.1 Área de estudo

Amostras de solo foram coletadas na Fazenda Experimental de Igarapé-Açú (FEIGA), da Universidade Federal Rural da Amazônia, com coordenadas geográficas de 1,07155 S e 47,36127 W, no município de Igarapé-Açú, Pará, Amazônia Oriental.

O clima da região, pela classificação de Köppen, é quente úmido (Am_i), com temperatura do ar média entre 25 a 32 °C e precipitação anual entre 2.000 e 3.000 mm (BASTOS; PACHECO, 1999). O solo da região é classificado como Argissolo Amarelo Eutrófico (EMBRAPA, 2006), com textura média. A caracterização química e granulométrica do solo da área experimental está apresentada na Tabela 1.

Tabela 2. Caracterização química e granulometria das amostras de solo.

Tratamentos	Prof. cm	pH ⁽¹⁾ H ₂ O	P ⁽²⁾ K ⁽³⁾ Na ⁽³⁾			Ca ⁽⁴⁾ Mg ⁽⁴⁾ Al ⁽⁵⁾ H+Al ⁽⁶⁾				SB ⁽⁷⁾	Areia Silte Argila		
			mg dm ⁻³			cmol _c dm ⁻³					g kg ⁻¹		
Trituração	0-5	4,75	12,12	17,78	10,94	2,55	0,65	3,87	53,95	3,26	808	72	120
	5-10	4,59	6,62	8,43	6,20	1,00	0,46	11,75	57,49	1,49	757	83	160
	10-20	4,6	4,12	5,51	4,73	0,51	0,31	12,37	47,26	0,85	735	85	180
	20-30	4,7	2,25	4,30	3,64	0,49	0,19	12,37	38,58	0,69	670	70	260
Queima	0-5	4,98	2,62	9,46	7,61	1,85	0,48	3,25	38,40	2,36	807	53	140
	5-10	4,81	2,37	6,86	6,44	1,33	0,44	4,87	40,04	1,79	768	112	120
	10-20	4,64	1,62	4,87	4,67	0,71	0,34	7,12	35,91	1,07	747	93	160
	20-30	4,58	1,00	3,72	4,12	0,41	0,20	9,12	29,74	0,63	658	142	200
Floresta sucessional	0-5	4,66	3,43	8,31	10,23	1,04	0,51	9,25	53,98	1,59	759	121	120
	5-10	4,73	2,00	6,13	7,47	0,48	0,19	10,87	42,30	0,69	708	152	140
	10-20	4,79	1,50	5,99	6,07	0,40	0,19	10,62	37,14	0,61	686	174	140
	20-30	4,85	1,12	4,73	5,02	0,40	0,20	10,12	32,41	0,62	574	206	220

potenciômetro na relação solo: água de 1:2,5; ⁽²⁾ extraído com solução Mehlich I e determinado por colorimetria; ⁽³⁾ extraídos com HCl 0,05 mol L⁻¹ determinado por fotometria de chama; ⁽⁴⁾ extraídos com KCl 1 mol L⁻¹ e determinados por espectrometria de absorção atômica; ⁽⁵⁾ extraído com KCl 1 mol L⁻¹ e titulação com NaOH 0,025 mol L⁻¹; ⁽⁶⁾ extraído com KCl 1 mol L⁻¹ e determinado por titulação com EDTA 0,025 mol L⁻¹; ⁽⁷⁾ SB=soma de bases;

Fonte: Albuquerque, 2013

3.2.2 Sistemas de uso do solo avaliados

Foram avaliados dois sistemas de uso do solo, sendo: (a) sistema com corte e trituração da floresta sucessional, no preparo de área, que consiste na alternância de um ciclo de consórcio de milho (*Zea mays*) e mandioca (*Manihot esculenta*) ou feijão caupi (*Vigna unguiculata*) e mandioca (*Manihot esculenta*), e um ciclo de pousio com enriquecimento da floresta sucessional com espécies arbóreas de rápido crescimento como: o ingá (*Inga edulis*) e o taxi branco - carvoeira (*Sclerolobium paniculatum* Vogel); (b) sistema com corte e queima da floresta sucessional, no preparo de área, seguido pelo plantio de culturas alimentares, conforme descrito anteriormente, sem enriquecimento da floresta sucessional no período de pousio. Esses sistemas de uso do solo foram comparados com uma floresta sucessional, adjacente, com aproximadamente 25 anos de idade. Os sistemas de uso e a floresta sucessional representam os tratamentos neste estudo, todos com área de 2 ha.

O sistema com corte e queima já teve dois períodos de cultivo (2002 e 2007) e no momento da coleta estava em pousio natural há 2 anos e meio. O sistema com

trituração já foi submetido a três ciclos de cultivo e no momento da coleta estava em pousio a 2 anos (2002, 2005 e 2006).

3.2.3 Amostragem e processamento do solo

A amostragem de solo foi realizada com trado tipo caneco em janeiro de 2010, foram coletadas 10 amostras compostas, contendo cinco simples, em cada sistema avaliado, nas camadas 0-5, 5-10, 10-20 e 20-30 cm. Em laboratório, as amostras foram secas ao ar, destorroadas, peneiradas em malha de 2 mm, moídas em gral de porcelana e, finalmente, peneiradas em malha de 60 mesh.

3.2.4 Determinações de C

3.2.4.1 Combustão via úmida (Walkley-Black)

Para a determinação do teor de C orgânico por via úmida (CO_{CU}), utilizou-se o método Walkley-Black modificado por Cantarella et al. (2001). Em tubo de digestão, adicionou-se 0,5 g de amostra de solo, 10 mL de dicromato de potássio 99% de pureza P. A. (Vetec) ($K_2Cr_2O_7$) no teor de $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ e 5 mL de ácido sulfúrico > 99% pureza P. A. (VETEC) (H_2SO_4) concentrado. Em seguida os tubos foram levados para aquecimento em bloco digestor pré-aquecido a 150°C , e mantidos nesta temperatura por 30 minutos. Posteriormente foram retirados do bloco e, então, adicionaram-se 50 mL de cloreto de bário 99% de pureza (Dinâmica) ($BaCl_2$) 0,4%. Em seguida, adicionaram-se 200 mL de água destilada aos tubos, os quais, após agitação manual, foram mantidos sob repouso por uma noite, posteriormente foi realizada a leitura em espectrofotômetro com filtro de transmissão máxima de 650 nm.

3.2.4.2 Combustão via seca (perda de massa por ignição)

Para determinação do teor de C total por perda de massa por ignição (CT_{PI}) (BEN-DOR; BANIN, 1989), foram pesados aproximadamente 10 g de amostra de solo em cadinhos de porcelana e colocados para secar por 1 h a 105°C , em seguida, foram pesados. Posteriormente, levaram-se as amostras ao forno de mufla da marca Quimis (modelo Q 318M) até a estabilização da temperatura a 400°C , na qual foram mantidas por 4 h. Após incineração, foram secas em estufa a 105°C por 24 h, colocadas em

dessecador para resfriamento e novamente pesadas. O conteúdo de matéria orgânica foi determinado pela diferença entre as massas secas antes e após incineração. O teor de C foi estimado considerando-se um teor de 58% de C na matéria orgânica (NELSON; SOMMERS, 1996).

3.2.4.3 Combustão via seca (analisador elementar)

Na determinação do teor de C total por combustão via seca em analisador elementar (CT_{AE}), foi pesado 0,2 g de solo em barcas de porcelana, que foram introduzidas em forno de combustão à temperatura aproximada de 1350°C, onde foram oxidadas na presença de oxigênio (O_2) com alto grau de pureza (99,9%). A análise foi realizada em analisador elementar da marca LECO, modelo CNS 2000 (NELSON; SOMMERS, 1982) e foi utilizado padrão solo da LECO com 2,34% de C ($\pm 0,05$).

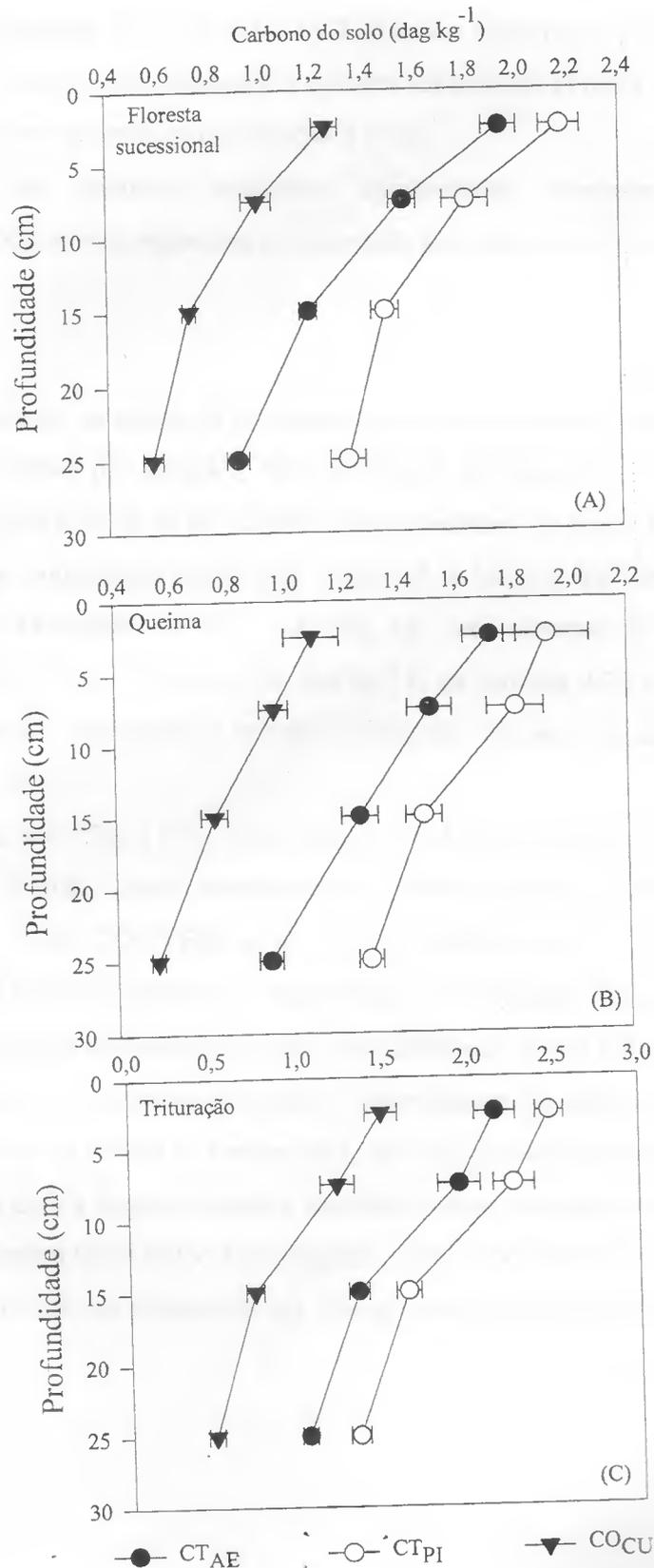
3.2.5 Análises estatísticas

Os resultados do teor de C foram submetidos à análise de variância no programa SigmaPlot 11.0, para testar o efeito dos métodos de quantificação em cada profundidade por sistema de uso do solo. Quando necessário, os dados foram transformados (logaritmo) para atender aos requisitos de normalidade da distribuição e homogeneidade das variâncias. Os resultados, no entanto, foram apresentados com média e erro padrão originais. Quando constatado efeito significativo ($p \leq 0,05$), as médias foram comparadas pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$). Adicionalmente, foi realizada análise de regressão linear da concentração de C obtida por cada método.

3.3 Resultados

O teor de C orgânico por combustão via úmida (CO_{CU}) foi menor em todas as profundidades e sistemas, em relação ao C total por combustão via seca em analisador elementar (CT_{AE}) e combustão via seca por perda de massa por ignição (CT_{PI}) (Figura 1). Na floresta sucessional, as concentrações médias de CT_{PI} foram maiores em todas as profundidades (Figura 1A), seguidas por CT_{AE} e CO_{CU} . No sistema com queima, as maiores médias de CT_{PI} ocorreram nas profundidades 5-10 e 20-30 cm, não diferindo significativamente do CT_{AE} nas demais profundidades avaliadas (Figura 1B). O teor de CT_{PI} no sistema com trituração, na profundidade 20-30 cm, foi maior, em relação aos demais métodos. Nas outras profundidades, o CT_{PI} não diferiu significativamente do CT_{AE} (Figura 1C).

Figura 1. Teor de carbono em diferentes camadas do solo em (A) floresta sucessional, (B) sistema com queima e (C) sistema com trituração, determinada pelos métodos combustão via seca em analisador elementar (CT_{AE}), combustão via seca por perda de massa por ignição (CT_{PI}) e combustão via úmida (CO_{CU}). Dados são média \pm erro padrão (n = 10). Em uma dada camada, médias com letras minúsculas entre métodos e letras maiúsculas entre sistemas não diferem entre si pelo Teste Tukey a 5%.



Os métodos apresentaram sensibilidade semelhante para diferenciar os sistemas em relação ao teor de C, nas profundidades 0-5, 10-20 e 20-30 cm (Figura 1). Na camada 0-5 cm, independentemente do método de determinação de C, o sistema com trituração apresentou o maior teor de C, não diferindo significativamente da área de floresta sucessional, que, por sua vez, não diferiu estatisticamente da área com queima (Figura 1). Na camada 5-10 cm, CT_{PI} e CT_{AE} foram maiores no sistema com trituração, em relação ao sistema com queima e à floresta sucessional (Figura 1); nesta camada, os sistemas não diferiram entre si em relação a CO_{CU} .

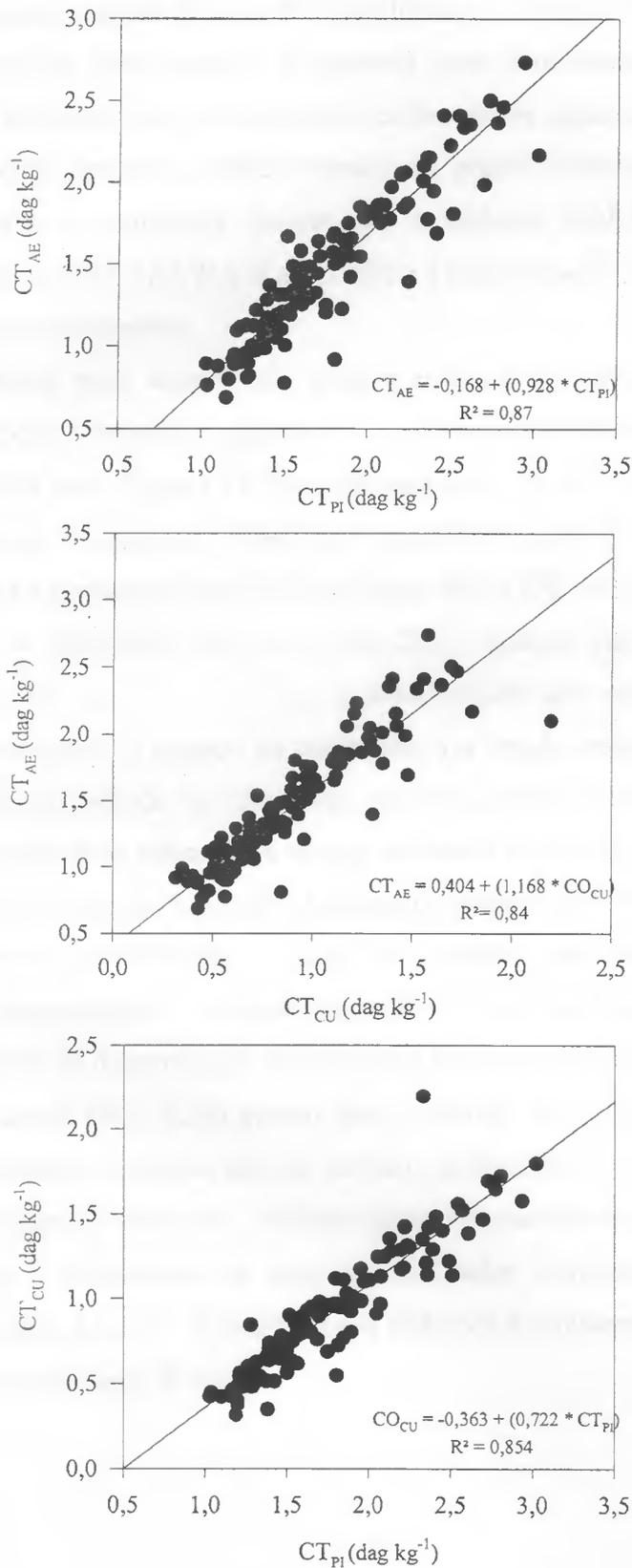
Todos os métodos avaliados apresentaram elevados coeficientes de determinação (R^2) para as equações de regressão dos teores de C no solo (Figura 2).

3.4 Discussão

Neste estudo, os teores de C variaram de 0,49 (combustão via úmida) a 2,48 $dag\ kg^{-1}$ (perda de massa por ignição), ficando dentro da faixa de variação para solos na Amazônia (DESJARDINS et al., 2004). Outros estudos na mesma região observaram teores de C por combustão via úmida, entre 1,2 a 1,4 $dag\ kg^{-1}$ em solos de floresta sucessional de 18 meses e 0,8 a 1,8 $dag\ kg^{-1}$ em sistema de cultivo alternativo (ARAGÃO et al., 2012), e 0,92 e 2,61 $dag\ kg^{-1}$ C na camada 0-25 cm, em sistema com queima e trituração, utilizando o método combustão via seca em analisador elementar (COMTE et al., 2012).

Os teores de CT_{AE} e CT_{PI} foram mais elevadas do que aquelas determinados por combustão via úmida, como observado em outros estudos (GATTO et al., 2009; SEGNINI et al., 2008; CONYERS et al., 2011; COSER et al., 2012; DIAS et al., 2013). Estes resultados estão relacionados à capacidade da combustão via seca em oxidar todas as formas de C que se encontram no solo, com diferentes graus e formas de proteção ou complexação com os minerais, incluindo C proveniente do carvão. A combustão via úmida não é capaz de oxidar as formas de C do solo que se encontram mais protegidas ou complexadas com a fração mineral e também formas inorgânicas (carvão, carbonatos e carbono elementar) (NELSON; SOMMERS, 1996; CONYERS et al., 2011). Portanto, a utilização do método de combustão via úmida para quantificação de C em amostras de

Figura 2. Regressão linear simples entre os teores de carbono obtidas pelos métodos de combustão via seca por perda de massa por ignição (CT_{PI}) e em analisador elementar (CT_{AE}) (A); combustão via úmida (CO_{CU}) e combustão via seca em analisador elementar (CT_{AE}) (B); e perda de massa por ignição (CT_{PI}) e combustão via úmida (CO_{CU}) (C); $n=120$.



solo provenientes de áreas que possuem histórico de queima da vegetação pode gerar resultados subestimados, levando a conclusões equivocadas em relação ao impacto do sistema de uso e manejo do solo nestes agroecossistemas.

De forma geral, observou-se que o método de perda de massa por ignição resultou nos maiores valores de teor de C em todos os sistemas avaliados, em relação aos demais métodos. Este método é aplicável para determinação do C em solos brasileiros, pois nestes há uma alta correlação entre matéria orgânica do solo (MOS) e C orgânico, e a MOS apresenta grande número de grupos funcionais com átomos de oxigênio (alto grau de oxidação), favorecendo a oxidação total do material orgânico presente na amostra (MIYAZAWA et al., 2000) e a quantificação completa do conteúdo de matéria orgânica da amostra.

Nas camadas mais superficiais, onde o acúmulo de material orgânico é mais intenso, os métodos tenderam a apresentar a mesma sensibilidade em diferenciar os sistemas de uso da terra (Figura 1). Esta resposta tem relação direta com a MOS que está disponível em formas mais lábeis nas camadas superficiais, principalmente em sistemas em que há deposição superficial de liteira (ROSCOE; MACHADO, 2002).

Embora os resultados dos teores de CO_{CU} tenham sido inferiores, quando comparados aos métodos CT_{PI} e CT_{AE} , a sensibilidade dos métodos em diferir os sistemas foi semelhante. O método de combustão via úmida recuperou menores teores de C, em relação ao método de combustão via seca, porém ambos tiveram a mesma resposta para distinguir os sistemas de manejo avaliados em estudo realizado em frações leves da matéria orgânica em Latossolo Amarelo (COSER et al., 2012).

Os métodos possibilitaram o ajuste de modelos com elevada capacidade de predição do C, destacando-se o método da perda de massa por ignição que apresentou elevado coeficiente de determinação na regressão linear tanto em relação ao método de combustão via úmida ($R^2 = 0,85$) quanto para o método de combustão via seca ($R^2 = 0,87$). Esses resultados mostram que os métodos apresentam boa exatidão, apesar das diferenças operacionais entre eles. Melhor ajuste foi encontrado entre combustão via úmida (Mebius) e combustão via seca em analisador elementar para amostras de Argissolo Vermelho-Amarelo de Santa Maria (RS) por Rheinheimer et al. (2008), com coeficiente de determinação $R^2=0,97$.

A aplicação do método de perda de massa por ignição, nas condições deste estudo, é uma alternativa viável e promissora, pois proporciona condições menos insalubre aos analistas e menor geração de resíduos tóxicos pelo uso de cromo no método combustão via úmida (PIMENTEL et al., 2006). Além disso, entre os métodos de combustão via seca, o perda de massa por ignição é economicamente mais viável que o método em analisador elementar. Vale ressaltar que se trata de um estudo muito localizado e, portanto, a aplicabilidade para outras áreas requer novos estudos com outras amostras de solo.

3.5 Conclusões

O método combustão via úmida subestimou as concentrações de C do solo;

O teor de C total (combustão via seca em analisador elementar) pode ser estimado com precisão adequada a partir do teor de C determinado pelo método de perda de massa por ignição. O que representa uma alternativa relativamente barata para a obtenção do C total.

AGRADECIMENTOS

À Embrapa Amazônia Oriental, pelo apoio logístico e financeiro; ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio na forma de bolsa ITI (processo 556810/2009-0) e auxílio financeiro (processo 474794/2010-5); e ao Deutscher Akademischer Austauschdienst (DAAD)/PRODEMA, pelo apoio na forma de bolsa de mestrado.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, G. D. P. *Atributos químicos do solo em sistemas de derruba-e-queima e corte-e-trituração na Amazônia Oriental*. 40 p. 2013. Dissertação (Mestrado em Agronomia)-Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2013.
- ARAGÃO, D. V.; CARVALHO, C. J. R.; KATO, O. R.; ARAÚJO, C. M.; SANTOS, M. T. P.; MOURÃO JR, M. Avaliação de indicadores de qualidade do solo sob alternativas de recuperação do solo no Nordeste Paraense. *Acta Amazonica*, v. 42, n. 1, p.11-18, 2012.
- BASTOS, T. X. ; PACHECO, N. A. *Característica agroclimatológicas de Igarapé Açu, PA e suas implicações para as culturas anuais: feijão caupi, milho arroz e mandioca*. Boletim de Pesquisa, Belém: Embrapa Amazônia Oriental, v. 25, n. 25, p. 1-30, 1999.
- BEN-DOR, E.; BANIN, A. Determination of organic matter content in arid zone using a simple loss-on-ignition method. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 20, n. 15, p. 1675-1695, 1989.
- BRYE, K.R.; SLATON, N.A. Carbon and nitrogen storage in a Typic Albaqualf as affected by assessment method. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 34, n. 5, p. 1637– 1655, 2003.
- CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; RAIJ, B. V. Determinação da matéria orgânica. In: RAIJ, B. V.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. *Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais*, ed., v. 9, Campinas, p. 173–180, 2001.
- CARMO, D. L.; SILVA, C. A. Métodos de quantificação de carbono e matéria orgânica em resíduos orgânicos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 36, n. 4, p. 1211-1220, 2012.
- CHEMDAT, *The Merck Chemical Database*, Merck KGaA: Darmstadt, 2005.
- COMTE, I.; DAVIDSON, R.; LUCOTTE, M.; CARVALHO, C. J. R.; OLIVEIRA, F. A.; SILVA, B. P.; ROUSSEAU, G. X. Physicochemical properties of soils in the Brazilian Amazon following fire-free land preparation and slash-and-burn practices. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 156, n. 1, p. 108–115, 2012.
- CONYERS, M. K.; POILE, G. J.; OATES, A. A.; WATERS, D.; CHAN, K. Y. Comparison of three carbon determination methods on naturally occurring substrates and the implication for the quantification of soil carbon. *Soil Research*, v. 49, n. 1, p. 27-33, 2011.
- COSER, T. R.; FIGUEIREDO, C. C.; RAMOS, M. L. G.; JANNUZZI, H.; MARCHÃO, R. L. Recuperação de carbono obtida por três métodos em frações da matéria orgânica de latossolo, sob consórcio milho-forrageiras, no Cerrado. *Bioscience Journal*, v. 28, n. 1, p. 91-97, 2012.

DENICH, M.; VIELHAUER, K.; KATO, M. S. A.; BLOCK, A.; KATO, O. R.; SA, T. D. A.; LUCKE, W.; VLEK, P. L. G. Mechanized land preparation in forest-based fallow systems: the experience from Eastern Amazonia. *Agroforestry Systems*, v. 61, n. 7, p. 91-106, 2004.

DESJARDINS, T.; BARROS, E.; SARRAZIN; GIRARDIN M.; MARIOTTI, A. Effects of forest conversion to pasture on soil carbon content and dynamics in Brazilian Amazonia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 103, n. 2-4, p. 365-373, 2004.

DIAS, R. S.; DE ABREU, C. A.; DE ABREU, M. F.; PAZ-FERREIRO, J.; MATSURA, E. E.; GONZÁLEZ, A. P. Comparison of methods to quantify organic carbon in soil samples from São Paulo State, Brazil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 44, n. 1-4, p. 429-439, 2013.

EMBRAPA. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.

GATTO, A.; BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F.; SILVA, I.R.; MENDONÇA, E. S.; VILLANI, E.M.A. Comparação de métodos de determinação do carbono orgânico em solos cultivados com eucalipto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 33, n. 3, p. 735-740, 2009.

MAIA S. M. F; OGLE S. M; CERRI C. C.; CERRI C. E. P. Changes in soil organic storage under different agricultural management systems in the Southwest Amazon Region of Brazil. *Soil Tillage Research*, v. 106, n. 5, p. 177-184, 2010.

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A.; OLIVEIRA, E. L.; IONASHIRO, M.; SILVA, A. K. Gravimetric determination of soil organic matter. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, v. 43, n. 5, p. 475-478, 2000.

NELSON, D. W.; SOMMERS, L. E. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: PAGE, A.L.; MILLER, R.H.; KEENEY, D.R. (Ed) *Methods of soil analysis*. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy, p. 539-579, 1982.

NELSON, D.W.; SOMMERS, L.E. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: SPARKS, D. L.; PAGA, A. L.; HELMKE, P. A.; LOEPPERT, R. H.; SOLTANPOUR, P. N.; TABATABAI, M. A.; JOHNSTON, C. T.; SUMMER, M. E., eds. *Methods of soil analysis: Chemical methods*. Part 3. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, p. 961-1010, 677p., 1996.

PIMENTEL, L. C. F.; CHAVES, C. R.; FREIRE, L. A. A.; AFONSO, J. C. O inacreditável emprego de produtos químicos perigosos no passado. *Química Nova*, v. 29, n. 5, 1138-1149, 2006.

RHEINHEIMER, D. S.; CAMPOS, BEN-HUR COSTA; GIACOMINI, S. J. CONCEIÇÃO, P. C.; BORTOLUZZI, E. C. Comparação de métodos de determinação

de carbono orgânico total no solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, n.1, 435-440, 2008.

ROSCOE, R.; MACHADO, P. L. O. A. *Fracionamento físico do solo em estudos da matéria orgânica*. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002.86p.

SEGNINI, A.; SANTOS, L. M.; SILVA, W. T. L.; MARTIN NETO, L.; BORATO, C. E.; MELO, W. J. ; BOLONHEZI, D. Estudo comparativo de métodos para a determinação da concentração de carbono em solos com altos teores de Fe (Latossolos). *Química Nova*, v. 31, n. 1, p. 94-97, 2008.

VEZZANI, F. M.; CONCEIÇÃO, P. C.; MELO, N. A.; DIECKOW, J. Matéria orgânica e qualidade do solo. In: SANTOS, G. DE A.; SILVA, L. DA S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. 2. Ed. *Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais*. Rio Grande do Sul, 2008, part IV, p. 483-494.

WALKLEY, A.; BLACK, I.A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, v. 37, n. 2, p. 29-38, 1934.