UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
CENTRO DE ENERGIA NUCLEAR NA AGRICULTURA

SIGLEA SANNA DE FREITAS CHAVES

Estoque de carbono e qualidade da matéria orgânica do solo em diferentes sistemas agropecuários em Belterra, Amazônia Oriental

Piracicaba
2018

SIGLEA SANNA DE FREITAS CHAVES

Estoque de carbono e qualidade da matéria orgânica do solo em diferentes sistemas agropecuários em Belterra, Amazônia Oriental

Versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011

Tese apresentada ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Ciências

Área de Concentração: Química na Agricultura e no Ambiente

Orientador: Prof. Dr. Plínio Barbosa de Camargo

Piracicaba
2018

AUTORIZO A DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Técnica de Biblioteca - CENA/USP

Chaves, Siglea Sanna de Freitas

Estoque de carbono e qualidade da matéria orgânica do solo em diferentes sistemas agropecuários em Belterra, Amazônia Oriental / Siglea Sanna de Freitas Chaves; Plínio Barbosa de Camargo. - - versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2018.
77 p. : il.

Tese (Tese – Programa de Pós-Graduação em Ciências. Área de concentração: Química na Agricultura e no Ambiente) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo, 2018.

1. Florestas tropicais 2. Latossolos 3. Pastagens 4. Soja 5. Uso do solo I. Título

CDU 631.417.1 : 631.153.7

Elaborada por:
Marilia Ribeiro Garcia Henyei
CRB-8/3631
Resolução CFB Nº 184 de 29 de setembro de 2017

DEDICATÓRIA

À toda minha família maravilhosa que está sempre ao meu lado em todos os momentos, com atenção e amor, oferecendo apoio em todos os campos da minha vida: meus queridos pais, meu irmão, meus tios, meus avós, meus primos e meu marido. Com vocês a minha felicidade está completa.

Em especial, dedico à minha mãe (em memória), com quem aprendi a ter perseverança e nunca desistir dos meus objetivos, mesmo nos momentos mais difíceis.

AGRADECIMENTOS

Ao programa de Pós-Graduação em Ciências e à Diretoria do CENA/USP pela oportunidade de cursar o Doutorado e por todas as boas experiências vividas durante os últimos quatro anos.

Ao CNPQ e à CAPES pela concessão da bolsa de Doutorado.

Ao Professor Plínio Camargo pela orientação desta pesquisa. Ao Professor Luiz Antônio Martinelli por todo o apoio oferecido durante a Pós-Graduação. À Professora Tsai Siu Mui por disponibilizar recursos para a realização deste estudo. Ao Professor Raimundo Cosme de Oliveira pela contribuição nas atividades desenvolvidas no município de Belterra, PA. Aos professores Carlos Eduardo P. Cerri, ao professor Pablo Vidal Torrado e Débora Marcondes Millori pela colaboração em permitir a realização de parte das análises do solo nos laboratórios que estão sob suas respectivas coordenações. Aos Professores Carlos Tadeu Santos e Marcello Neiva pelo apoio na realização das análises estatísticas.

À equipe técnica e aos amigos de estudo do Laboratório de Ecologia Isotópica – CENA/USP, com quem compartilhei muitos momentos de aprendizado durante o Doutorado.

A todas as amizades novas, que foram formadas e experiências trocadas no decorrer da caminhada em Piracicaba. Aos amigos de longo tempo, que sempre emanam boas energias, mesmo à distância.

Ao Governo Federal, ao Governo do Estado de São Paulo e ao Governo do Estado do Pará que me possibilitaram estudar sempre em Instituições de Ensino Públicas e que graças a esta oportunidade eu consegui construir a minha formação. Desejo que o ensino público continue por muito tempo disponível para todos aqueles que necessitam e que todos tenham direitos iguais, torcendo também para que seja de qualidade.

Principalmente, agradeço à minha grande e maravilhosa família pela minha educação, pois se cheguei até aqui foi pela contribuição de todos. E ao meu marido, por todo o suporte durante esta caminhada na Pós-Graduação.

Muito obrigada!

EPÍGRAFE

“Se a educação sozinha não transforma a sociedade, sem ela, tampouco, a sociedade muda.”

P. Freire

RESUMO

CHAVES, S. S. F. **Estoque de carbono e qualidade da matéria orgânica do solo em diferentes sistemas agropecuários em Belterra, Amazônia Oriental**. 2018. 77 p. Tese (Doutorado em Ciências) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2018.

O objetivo desse trabalho foi investigar o estoque de carbono e a qualidade da matéria orgânica do solo (MOS) após a conversão floresta-pastagem e floresta-soja, em Belterra-PA. Neste município predomina o clima quente e úmido, com temperatura média anual de 25,3°C e pluviosidade média anual de 1943 mm, concentrada entre janeiro a junho. O solo das áreas de estudo é classificado como Latossolo Amarelo distrófico muito argiloso. Nesta pesquisa foram investigadas: (i) uma área de soja conduzida em cultivo mínimo há oito anos; (ii) uma área de soja conduzida em cultivo mínimo há 18 anos; (iii) uma pastagem nominal (implantada há quatro anos, manejada com fogo, sem correção da fertilidade do solo e com manejo extensivo do rebanho); (iv) uma pastagem melhorada (implantada há seis anos, manejada com rotação de cultura e correção da fertilidade do solo por um período de três anos, posteriormente, permanecendo como pastagem homogênea, onde o rebanho bovino é manejado em sistema rotacionado); (v) uma área de floresta nativa, utilizada como referência. Em cada área de estudo foram coletadas amostras de solo em seis pontos diferentes, equidistantes 50 m. As amostras deformadas foram coletadas nas camadas 0-10, 10-20, 20-30, 30-50, 50-80, 80-100 cm e as amostras indeformadas até a camada 50 cm. Avaliou-se o teor de carbono, a densidade do solo, o estoque de carbono e a relação C:N. A abundância natural 13C:12C foi utilizada para estimar a incorporação de carbono oriundo de gramíneas nas áreas de pastagens. A qualidade da MOS foi avaliada pelo índice de humificação e pelo fracionamento físico da MOS. Os resultados foram submetidos à análise da variância e teste de Tukey (5%). Observou-se que a densidade do solo aumentou significativamente após a conversão de floresta para implantação de sistemas agropecuários. O estoque de carbono acumulado na camada 0-50 cm e o grau de humificação da MOS não diferiram entre as áreas. Este resultado foi influenciado pelo alto teor de argila presente no solo, fator que favorece a lenta decomposição da MOS, após mudança no uso da terra. Entre as áreas de sojicultura, o cultivo de 18 anos apresentou o menor índice de manejo do carbono, indicando perda de carbono no solo. Quanto à origem da matéria orgânica do solo, observou-se que a pastagem melhorada incorporou mais carbono oriundo de plantas C4, em relação à pastagem nominal, refletindo efeito positivo do melhoramento da pastagem. Em suma, as conversões floresta-pastagem e floresta-soja ocasionaram aumento da densidade do solo, mas tiveram baixo impacto no estoque de carbono no solo e na qualidade da matéria orgânica, devido a característica granulométrica do solo e pouco tempo de cultivo dos sistemas. Por isso, recomenda-se mais estudos a longo prazo para identificação dos efeitos dos manejos aplicados a tais áreas de produção.

Palavras-chave: Florestas tropicais. Latossolos. Pastagens. Soja. Uso do solo

ABSTRACT

CHAVES, S. S. F. **Carbon stock and quality of soil organic matter in different agricultural systems in Belterra, Eastern Amazonia**. 2018. 77 p. Tese (Doutorado em Ciências) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2018.

The aim of this work was to investigate the carbon stock and soil organic matter (MOS) quality after the conversion from forest-pasture and forest-soybean in Belterra-PA. The climate there is hot and humid, and the annual average temperature is 25.3 °C, while rainfall averages are 1943 mm, concentrated between January and June. The soil of the region is classified as very clayey yellow Latosol. In this research we investigated: (i) a soybean areas in minimum tillage with similar managements - 18 years old; (ii) a soybean areas in minimum tillage with similar managements - 8 years old; (iii) a nominal pasture (implanted four years ago, managed with fire, without soil fertility correction and managed with extensive livestock) and an improved pasture (implanted six years ago, managed with crop rotation and soil fertility correction by a period of three years. Subsequently, it only remained homogeneous pasture, where the beef cattle herd is managed in a rotational system); (iv) an area of dense ombrophylous forest, used as the reference. Soil samples were collected at six different equidistant points every 50 m. Deformed samples were collected from 0-10, 10-20, 20-30, 30-50, 50-80, 80-100 cm depths and undisturbed samples were collect until 50 cm depth. We estimated the carbon content, soil density, carbon stocks and the C:N ratio. Natural abundance of 13C:12C was used to estimate the amount of carbon from grasses incorporated into the soil. The quality of the MOS was evaluated by humification index and by its physical fractionation. The same soil layers from different areas were compared by analysis of variance and Tukey test (5%). Both pastures were compared between them and in relation to forest area and soybean crops were also compared between them and the forest area. Soil bulk density increased significantly after forest to pasture conversion and forest to soybean conversion. The carbon stock accumulated in the 0-50 cm layer and the degree of humification of the MOS did not differ between the areas. This similarity may be the result of the high clay content presented in this soil, which leads to organic matter slow decomposition, even after changes in vegetation cover. On the soybean areas, the carbon management index was lower in the longer cultivated area, indicating a loss of carbon in this soil. On pasture areas, improved pasture incorporated more carbon from C_4 plants in the soil in relation to the nominal pasture, reflecting a positive effect of the rational management on this production system.

Keywords: Tropical florests. Latosols. Pastures. Soybean. Land use

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Valores médios (média ± erro padrão) do teor de argila, silte e areia nos perfis do solo das áreas de estudo (Belterra, PA). AR: Área de Referência; PN4: pastagem nominal; PM6: pastagem melhorada; SM8: plantio de soja em cultivo mínimo - recente; SM18: plantio de soja em cultivo mínimo - antigo 45

Tabela 2 - Análise química para fins de fertilidade do solo (valores médios ± erro padrão) das áreas de estudo (Belterra, PA). AR: área de referência; PM6: pastagem melhorada; PN4: pastagem nominal; SM8: plantio de soja em cultivo mínimo recente; SM18: plantio de soja em cultivo mínimo antigo 46

Tabela 3 - Densidade do solo (kg m^{-3}) nas áreas de estudo (Belterra, PA). AR: área de referência; PN4: pastagem nominal; PM6: pastagem melhorada; SM8: plantio de soja em cultivo mínimo – recente; SM18: plantio de soja em cultivo mínimo – antigo 48

Tabela 4 - Concentração C (g kg^{-1}) no solo das áreas de estudo (Belterra, PA). AR: área de referência; PN4: pastagem nominal; PM6: pastagem melhorada; SM8: plantio de soja em cultivo mínimo – recente; SM18: plantio de soja em cultivo mínimo – antigo 49

Tabela 5 - Estoque de carbono (Mg ha^{-1}) no solo das áreas de estudo (Belterra, PA). AR: área de referência; PN4: pastagem nominal; PM6: pastagem melhorada 50

Tabela 6 - Estoque de carbono (Mg ha^{-1}) no solo das áreas de estudo (Belterra, PA). AR: área de referência; SM8: plantio de soja em cultivo mínimo - recente; SM18: plantio de soja em cultivo mínimo - antigo 50

Tabela 7 - Relação C:N no solo das áreas de estudo (Belterra, PA). AR: área de referência; PN4: pastagem nominal; PM6: pastagem melhorada; SM8: plantio de soja em cultivo mínimo – recente; SM18: plantio de soja em cultivo mínimo – antigo.....51

Tabela 8 -Massa da fração orgânica (M-F.O), massa da fração mineral (M-F.M), massa das frações silte e argila (M-F.S.A) e massa da fração organomineral (M-F.O.M) avaliadas na camada 0-10 cm. Belterra, PA. AR: área de referência; PN4: pastagem nominal; PM6: pastagem melhorada.....53

Tabela 9 - Massa da fração orgânica (M-F.O), massa da fração mineral (M-F.M), massa das frações silte e argila (M-F.S.A) e massa da fração organomineral (M-F.O.M) avaliadas na camada 0-10 cm. Belterra, PA. AR: área de referência; SM8: plantio de soja em cultivo mínimo - recente; SM18: plantio de soja em cultivo mínimo - antigo.....53

Tabela 10 - Teor de carbono da fração orgânica (C-F.O), teor de carbono da fração mineral (C-F.M), teor de carbono da fração silte e argila (C-F.S.A), teor de carbono da fração organomineral (C-F.O.M) avaliados na camada 0-10 cm. Belterra, PA. AR: área de referência; PN4: pastagem nominal; PM6: pastagem melhorada 54

Tabela 11 - Teor de carbono da fração orgânica (C-F.O), teor de carbono da fração mineral (C-F.M), teor de carbono da fração silte e argila (C-F.S.A), teor de carbono da fração organomineral (C-F.O.M) avaliados na camada 0-10 cm. Belterra, PA. AR: área de referência; SM8: plantio de soja em cultivo mínimo - recente; SM18: plantio de soja em cultivo mínimo - antigo 54

Tabela 12 - Índice de labilidade (IL) e índice de manejo de carbono (IMC) calculados para as áreas de estudo (Belterra, PA) na camada 0-10 (cm). AR: área de referência; SM8: plantio de soja em cultivo mínimo – recente; SM18: plantio de soja em cultivo mínimo - antigo 55

Tabela 13 - Contribuição de Carbono oriundo de plantas de ciclo fotossintético C_4 nas áreas de pastagem estudadas em Belterra, PA. AR: área de referência; PN4: pastagem nominal; PM6: pastagem melhorada 57

Lista de Figuras

Figura 1 - Emissão de CO_2e (t) no Estado do Pará por setor.....24

Figura 2 - Emissão de CO_2e (t) no Brasil por setor 25

Figura 3 - Remoção de CO_2e (t) no Brasil e no Estado do Pará 25

Figura 4 - Desflorestamento e incremento do desflorestamento em Belterra, PA entre 2000 a 2017 27

Figura 5 - Área plantada (ha) de grãos no município de Belterra, PA entre 2000 a 2017 28

Figura 6 - Produção de grãos (t) no município de Belterra, PA entre 2000 a 2017 ...29

Figura 7 - Extração de madeira em tora e efetivo bovino no município de Belterra, PA entre 2000 a 2017 30

Figura 8 - Mapa de localização do município de Belterra, PA (delimitado na área em vermelho) 33

Figura 9 - Mapa do município de Belterra com identificação das principais classes de solo. Nos pontos amarelos estão identificadas as localizações das áreas de estudo e no ponto vermelho a sede do município.....37

Figura 10 - Grau de humificação da MOS (H_{FIL}) em amostras de solo das áreas de estudo (Belterra, PA AR: área de referência; PN4: pastagem nominal; PM6: pastagem melhorada; SM8: plantio de soja em cultivo mínimo – recente; SM18: plantio de soja em cultivo mínimo – antigo.....52

Figura 11 - $\delta^{13}C$ (média ± erro padrão) nos perfis do solo das áreas de estudo (Belterra, PA): AR: área de referência; SM8: plantio de soja em cultivo mínimo – recente; SM18: plantio de soja em cultivo mínimo - antigo 56

Figura 12 - $\delta^{13}C$ (média ± erro padrão) nos perfis do solo das áreas de estudo (Belterra, PA): AR: área de referência; PN4: pastagem nominal; PM6: pastagem melhorada 56

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 19
2 REVISÃO DE LITERATURA 21
2.1 Matéria orgânica do solo 21
2.2 Mudança de uso do solo no Estado do Pará 23
2.3 Cenário agrícola do município de Belterra, PA 26
3 MATERIAL E MÉTODOS 33
3.1 Localização do município de Belterra e caracterização edafoclimática 33
3.2 Áreas de estudo 34
3.3 Coleta das amostras de solo 34
3.4 Análises físico-químicas do solo 38
3.5 Estoque de carbono no solo 40
3.6 Origem da matéria orgânica no solo utilizando o modelo de diluição isotópica 41
3.7 Índice de Manejo do Carbono (IMC) 41
3.8 Análise dos resultados 43
4 RESULTADOS 45
4.2 Densidade do solo 48
4.3 Concentração e estoque de carbono no solo 48
4.4 Qualidade da matéria orgânica do solo 51
4.4.1 Relação C:N 51
4.4.2 Grau de humificação da MOS (H_{FIL}) 51
4.4.3 Fracionamento físico da MOS 52
4.5 Uso de isótopos estáveis para determinação da origem da MOS 55
4 DISCUSSÃO 59
5 CONCLUSÃO 67
REFERÊNCIAS 69

1 INTRODUÇÃO

A região amazônica desempenha papel importante no ciclo global do carbono (C) devido a sua extensão territorial e a quantidade de C armazenada na vegetação e no solo (Aguiar et al., 2012). Segundo Batjes e Dijkshoorn (1999), os solos tropicais armazenam cerca de 506 Pg C, sendo que 66 Pg C estão em solos da Amazônia. Neste sentido, observa-se a importância de investigar os efeitos das mudanças de uso da terra na Amazônia, que liberam o carbono contido na vegetação e no solo para atmosfera (Assad et al., 2013) e agravam as mudanças climáticas ora em curso (Lapola et al., 2014). Outra implicação que deve ser considerada no contexto de substituição da vegetação nativa na Amazônia, é na perda de matéria orgânica do solo (MOS), que interfere diretamente no processo de ciclagem de nutrientes, processo de fundamental importância nos solos da região, que são naturalmente de baixa fertilidade.

Além de avaliar a variação da quantidade da MOS, é importante também avaliar a sua qualidade, que estará diretamente influenciada pelo material de origem, pelo manejo aplicado ao sistema, assim como pelas condições climáticas do local. Uma pequena fração da MOS possui maior labilidade, podendo ser alterado rapidamente de acordo com as práticas de cultivo (Trumbore et al., 1995; Zinn et al., 2005). Porém, como, de maneira geral, há um predomínio de estruturas de carbono na forma de cadeias longas na MOS, que sofrem pouca influência com mudanças recentes no uso do solo (Eclesia et al., 2012; Chen et al., 2013), é importante o monitoramento de experimentos de longa duração para avaliar os efeitos prolongados.

Neste contexto, observa-se a importância de desenvolver pesquisas que avaliem as alterações na paisagem da Amazônia devido a expansão das áreas agrícolas. Neste cenário de abertura da fronteira agrícola para a Amazônia, destaca-se o município de Belterra-PA, inserido na mesorregião do Baixo Amazonas, que é caracterizado pela dualidade de manter preservada a biodiversidade da floresta amazônica e ao mesmo tempo sediar uma nova fronteira agrícola. No município de Belterra predomina o típico padrão de uso do solo em áreas de fronteira agrícola, co-existindo áreas de lavoura de soja e de pastagens em diferentes estágios de degradação.

Sabendo que as atividades agrícolas são essenciais para a produção de alimentos e de outros produtos fundamentais para o bem-estar humano, é imprescindível a adoção de sistemas produtivos sustentáveis. Segundo Fearnside

(2006), a contenção do avanço do desmatamento na Amazônia depende de políticas voltadas para o incentivo de ações de produção sustentável, tais como recuperação de áreas degradadas, manejo correto das áreas de produção, otimização da unidade produtiva e o incentivo por prestação de serviços ambientais. Nos últimos anos cresceu no Brasil políticas públicas voltadas para promover o aumento da produção agropecuária e ganhos ambientais, concomitantemente (Salton et al., 2014; Carvalho et al., 2014), porém estas práticas necessitam ser difundidas para todos os municípios brasileiros onde são desenvolvidas atividades rurais.

Diante deste cenário, compreende-se a importância de realizar estudos que investiguem a influência da MOS sobre a sustentabilidade ambiental dos sistemas de produção existentes na região Amazônica, no intuito de identificar novas oportunidades de modelos produtivos que causem menor impacto nas propriedades edáficas. Neste sentido, é importante indagar se as mudanças no uso e na cobertura do solo, ora em curso no município de Belterra, influenciam na quantidade estocada de matéria orgânica do solo.

Visando responder este questionamento, o presente trabalho investigou as seguintes hipóteses: (i) pastagens com manejos distintos apresentam diferenças no estoque de carbono e na qualidade da matéria orgânica do solo; (ii) o cultivo de soja, ao longo do tempo, favorece a perda de carbono do solo e altera a qualidade da MOS.

O objetivo geral desta pesquisa foi investigar as alterações na quantidade e na qualidade da MOS após o processo de conversão “floresta-pastagem” e “floresta-soja” no município de Belterra, PA, sendo que foram estudadas duas pastagens com manejos distintos e duas áreas de cultivo de soja com idades diferentes. Para isso, os objetivos específicos foram: (i) avaliar a densidade e o estoque de C do solo nas diferentes áreas de pastagem e sojicultora em relação à floresta nativa; (ii) avaliar a qualidade da MOS com uso do índice de humificação da MOS e pelo fracionamento físico da MOS de todas as áreas de estudo; (iii) avaliar os efeitos do tempo de uso solo com cultivo de soja utilizando o índice manejo de carbono; (iv) averiguar a abundância natural de átomos de ^{13}C em relação à átomos de ^{12}C em todas as áreas de estudo; (v) estimar e comparar a percentagem de carbono oriundo de plantas C_4 nas áreas de pastagem com diferentes manejos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Matéria orgânica do solo

A matéria orgânica do solo é formada por biomassa viva (microrganismos e fragmentos de tecidos animais e de vegetais), fragmento de tecidos animais e vegetais em processo de decomposição, substâncias orgânicas complexas (amorfa e coloidal) e substâncias húmicas (BRADY; WEIL, 2013). Em solos minerais, o conteúdo de matéria orgânica pode variar de 0,5 a 5%, embora a fração de MOS seja pequena, é de fundamental importância para otimizar o funcionamento da área produtiva (SILVA et al., 2012).

A MOS é o principal componente de armazenamento de carbono (C) no solo, correspondendo a cerca de 50 a 58% de sua composição elementar, sendo que a concentração de oxigênio varia de 34 a 39%, o hidrogênio de 3 a 4,8% e o nitrogênio de 3 a 4% (SILVA et al., 2012). É importante ressaltar também que o solo concentra a maior parte do C presente no sistema solo-planta-atmosfera e é por este motivo que os sistemas de produção agropecuários devem priorizar práticas de manejo que preconizam a incorporação e a manutenção de matéria orgânica no solo, uma vez que a perturbação no ambiente para retirada da vegetação nativa pode interferir diretamente no ciclo global do carbono.

A dinâmica da MOS interfere diretamente nas características químicas, físicas e biológicas do solo. Entre os benefícios da matéria orgânica para o solo, cita-se como exemplo: ciclagem de nutrientes, aumento da CTC, complexação de metais, poder de tamponamento da acidez, formação e estabilização de agregados, aeração do solo, menor risco de erosão do solo, manutenção da umidade do solo, formação de ambiente favorável para a microbiota do solo, menor emissão de CO_2 para a atmosfera, entre outros (SILVA et al., 2012; BRADY; WEIL, 2013).

Segundo Dias-Filho (2011), em pastagens melhoradas ocorre maior acúmulo de carbono no solo, em relação às pastagens manejadas com fogo e/ou em processo de degradação. O autor ressalta ainda que pastos degradados são potenciais emissores de gases de efeito estufa, sendo a recuperação de pastagem uma técnica benéfica para aumentar o sequestro de carbono da atmosfera.

No contexto da produção agrícola nos solos do Bioma Amazônia (que são naturalmente de baixa fertilidade), é importante frisar que a ciclagem de nutrientes é

o principal vetor que contribui para o desenvolvimento e equilíbrio da vegetação nativa na referida região. Por isso, é fortemente recomendado que as áreas de produção de grãos, fibras, madeira e pasto, desenvolvidas na região, favoreçam práticas de conservação do solo, a fim de evitar a perda de produtividade da área e aumentar resiliência da unidade de produção.

Embora o clima quente e úmido da Amazônia favoreça a rápida decomposição da palhada sobre o solo, é importante incentivar o cultivo de lavouras em modelos de produção como o plantio direto ou cultivo mínimo, pois estes causam menor interferência na estrutura do solo e acumulam matéria orgânica por mais tempo na área. Pesquisas sobre a viabilidade e o manejo do plantio direto em lavoura de grãos na Amazônia iniciaram nos últimos 10 anos (SOUSA NETO et al., 2013; CASTRO E ALVES et. al., 2016, ALVES, 2015; MUNIZ et al., 2014), porém a adoção pelos produtores ainda é incipiente. Ao estudar dois sistemas de cultivo de milho, plantio direto e convencional, Oliveira Junior et al. (2015) identificaram que a produção de palhada e a concentração de nutrientes foram maiores no primeiro. Resultado positivo também foi encontrado por Castro e Alves (2016) em outra região da Amazônia Oriental, os autores observaram que a produção de grãos em sistema plantio direto foi de 3.667 kg ha^{-1}, enquanto no convencional foi de 2.609 kg ha^{-1}, ambos avaliados na segunda safra. Além disso, o sistema plantio direto mostrou-se eficiente para aumentar o estoque de carbono no solo em uma área após quatro anos de manejo para recuperação, e também proporcionou maior produtividade da cultura de milho implantada no local (MUNIZ et al., 2014).

Estudos sobre MOS em sistemas agrícolas são importantes ferramentas para gerar um diagnóstico sobre o solo do sistema de produção, sendo necessário avaliar tanto a quantidade, como a composição e a sua qualidade. De maneira geral, a qualidade da MOS é classificada conforme suas características de labilidade (material de rápida decomposição) ou recalcitrância (material de lenta decomposição). Brady e Weil (2013) classificam a MOS em três grupos diferentes:

(i) compartimento ativo: material facilmente decomponível, com meia vida de poucos dias/anos, sendo responsável por fornecer o conteúdo para manter a ciclagem de nutrientes ativa no sistema. Este compartimento é comumente denominado de matéria orgânica partícula ou fração leve. Alterações na quantidade desta fração no solo pode ser observada após

práticas de manejo a curto prazo, quando comparado às demais de maior recalcitrância.

(ii) compartimento lento: material com meia vida variando de 15 a 100 anos, caracterizado por frações orgânicas ricas em lignina e outras frações lentamente decomponíveis;

(iii) compartimento passivo: materiais com maior recalcitrância, que podem durar no solo centenas ou milhares de anos, pois estão protegidos pelo complexo húmus-argila, sendo responsável pela CTC e retenção de água no solo. Sua quantidade varia de maneira lenta no solo, não sendo possível observar modificações ocasionadas por mudança de uso da terra a curto prazo.

A origem da MOS também é um aspecto importante para ser estudado em ambientes em que houve mudança de uso da terra, onde uma vegetação com ciclo fotossintético do tipo C_3 (grãos, florestas, entre outros) é substituída por uma do tipo C_4 (pastagens, cana-de-açúcar e milho), ou no sentido inverso. Nestas pesquisas é avaliado o fracionamento isotópico da MOS, tendo como objeto de estudo os isótopos estáveis ^{12}C e ^{13}C (em abundância natural) contido nas amostras de solo. O fracionamento isotópico ($\delta^{13}C$) em estudos edáficos, consiste na avaliação da variação (razão) dos isótopos ^{13}C:^{12}C que ocorre em um composto (solo, tecido vegetal, serapilheira) ao passar por transformações físico-químicas, sendo que estas variações dependem de fatores como a origem da cobertura vegetal (ciclo fotossintético), das condições edafoclimáticas, da diferença no grau de decomposição da MOS e do manejo aplicado à área (MARTINELLI et al., 2009).

De posse dos resultados do $\delta^{13}C$, e com uso do modelo de mistura, é possível estimar a percentagem de contribuição das diferentes fontes (plantas C_3 e C_4) para a formação da matéria orgânica daquele solo. Por este motivo é uma importante ferramenta para as pesquisas sobre a dinâmica da MOS desenvolvidas na Amazônia, uma vez que o histórico de ocupação da região, para desenvolvimento da agropecuária nos últimos 40 anos, seguiu o modelo de retirada da floresta nativa para implantação de pastagens para pecuária extensiva.

2.2 Mudança de uso do solo no Estado do Pará

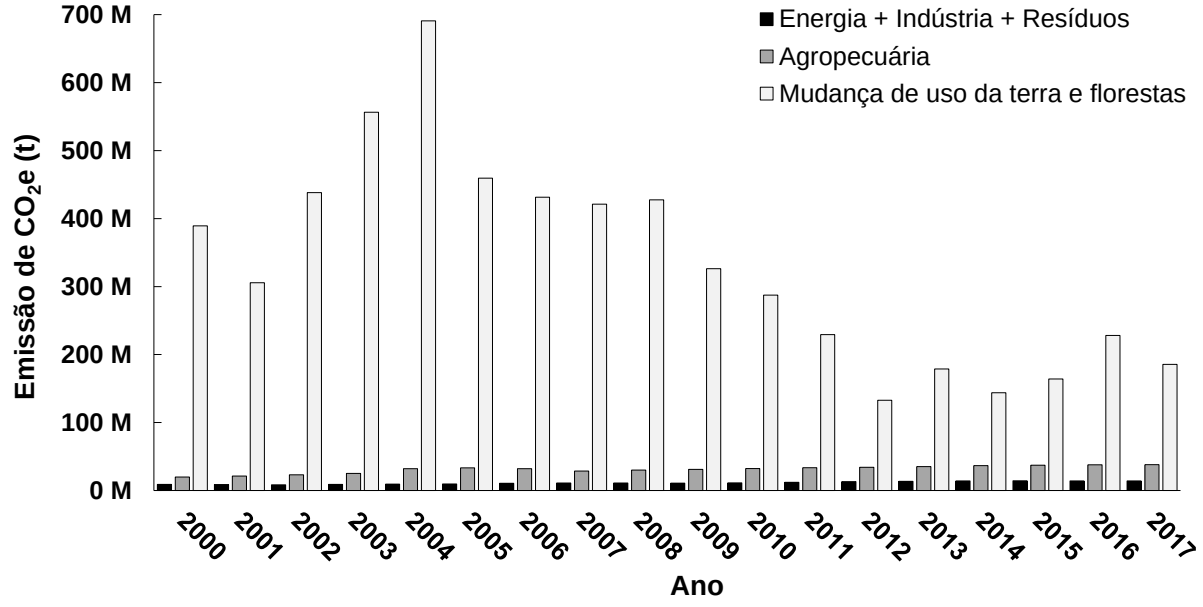
Tendo em vista que a Amazônia Legal abriga a maior área de floresta tropical do mundo e sua extensão territorial, compreende-se que a intensificação no

desmatamento desta área pode afetar diretamente em mudanças no clima (AGUIAR et al., 2012; LAPOLA et al., 2014; ASSAD et al., 2013). Devido ao intenso incentivo à expansão das atividades agropecuárias desde a década de 1970, com intensificação ao cultivo de grãos a partir da década de 2000, aumentou o número de focos de desmatamento na Amazônia brasileira, com a maior taxa relatada no ano de 2004.

No cenário da agricultura na Amazônia Legal, no Estado do Pará ocorrem as maiores taxas de desmatamento desde 2008, cerca de 37% (INPE, 2018). Sendo que no ano de 2017 o Pará esteve em primeiro lugar do ranking de emissão de CO_2 dos estados Brasileiros, sendo que cerca de 80% das emissões foram ocasionadas principalmente por atividades agropecuárias, tais como alterações no uso do solo e criação de gado de corte, conforme observado na Figura 1 (SEEG, 2018). Ao mesmo tempo, o Pará é o segundo estado no ranking de remoção de CO_2 da atmosfera, devido sua grande área de floresta preservada, que corresponde a 69% (SEEG, 2018)

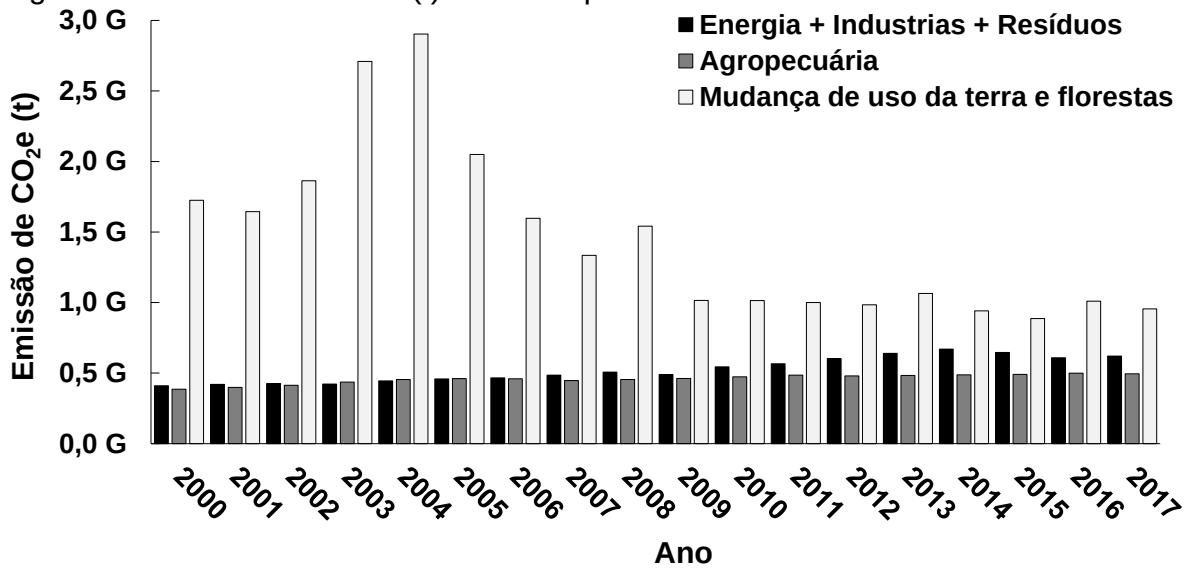
A emissão de CO_2e no Estado do Pará apresentou pico em 2004, período em que mudanças de uso da terra foram intensificadas, seguido por uma fase de redução na emissão deste gás (Figura 1), dinâmica semelhante na emissão do dióxido de carbono também ocorreu no território brasileiro em geral (Figura 2). A emissão de CO_2 ocasionada pela mudança de uso da terra reduziu em todo o território brasileiro (Figura 2), porém esta atividade ainda é que mais contribui para emissão do dióxido de carbono para atmosfera (SEEG, 2018).

Figura 1 - Emissão de CO_2e (t) no Estado do Pará por setor



Fonte: SEEG, 2018

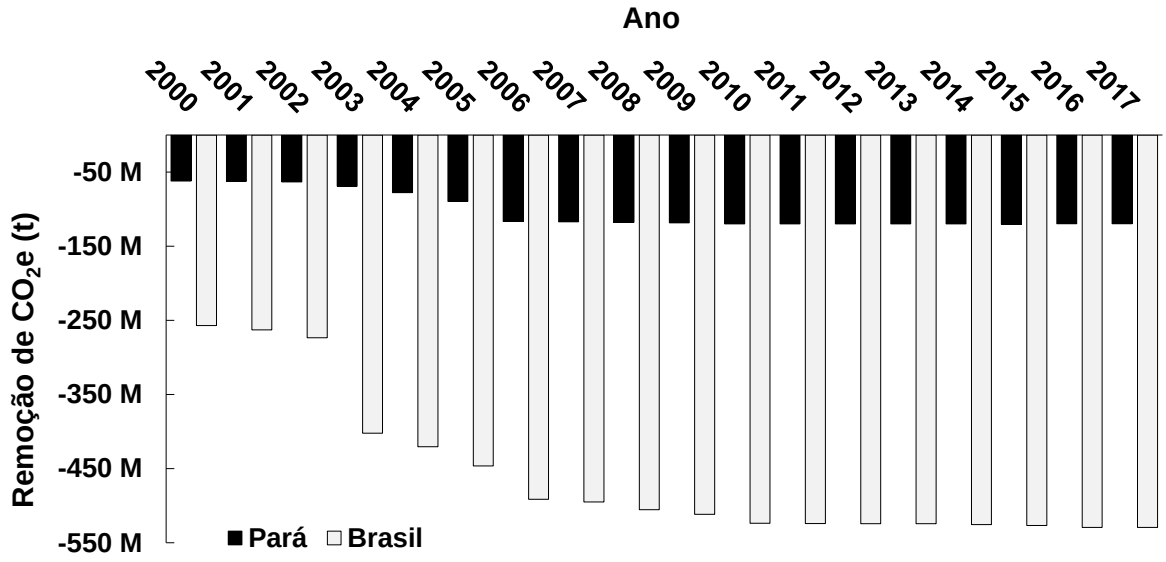
Figura 2 - Emissão de CO_2e (t) no Brasil por setor



Fonte: SEEG, 2018

O aumento do desmatamento na Amazônia culminou em uma crise ambiental em 2004, que ocasionou uma crise econômica, afetando o setor de produção agropecuária. Tais acontecimentos foram os motivos para a criação de políticas públicas voltadas para o monitoramento das áreas de vegetação nativa e de incentivo a práticas agropecuárias responsáveis. Com isso, houve uma redução nas taxas de emissão de CO_2 a partir do ano 2005 (Figuras 1 e 2), favorecendo o aumento da remoção do GEE no território brasileiro, assim como no Pará (Figura 3).

Figura 3 - Remoção de CO_2e (t) no Brasil e no Estado do Pará



Fonte: SEEG, 2018

Embora as taxas de desflorestamento na Amazônia Legal estejam regredindo, é necessário que o monitoramento da região e também o desenvolvimento de pesquisas sejam contínuos para evitar novos focos de remoção da vegetação natural. Berenguer et al. (2014) afirmam que a falta de informações sobre os impactos gerados pela degradação florestal poderá aumentar emissões de GEE pelos países tropicais, e consequente poderá causar impactos sobre o clima mundial.

Neste sentido, muitas pesquisas vêm sendo conduzidas com o objetivo de incentivar a recuperação de áreas degradas para implantação de novos sistemas agropecuários (BRASIL, 2013). A elaboração de políticas públicas assim como a sua difusão em todos os municípios amazônicos, que praticam atividades agropecuárias, é de fundamental importância para promover o desenvolvimento da Amazônia no âmbito ambiental, social e econômico.

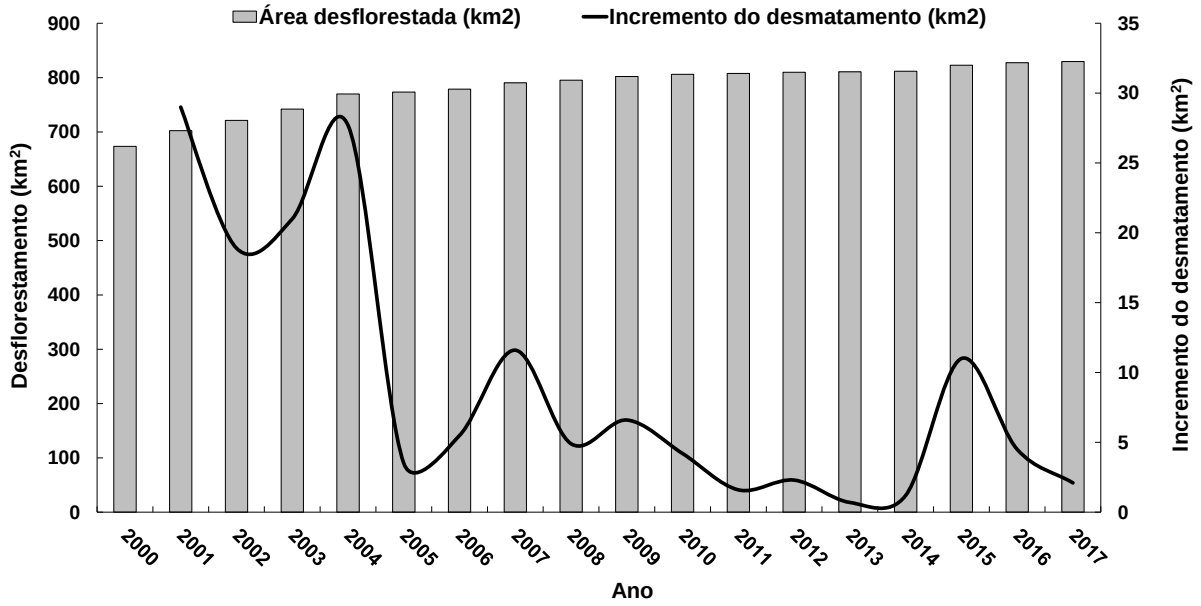
2.3 Cenário agrícola do município de Belterra, PA

O município de Belterra está localizado na região oeste paraense e compõe a microrregião de Santarém no Baixo Amazonas. Segundo Neres e Pereira (2013), cerca de 86% do território de Belterra é destinado à zona rural, sendo assim constituído: Floresta Nacional do Tapajós – Flona Tapajós (59%), Área de Proteção Ambiental Aramanaí (3%) e área agrícola ou em expansão (24%).

A Flona Tapajós é uma unidade de conservação que contém uma diversidade de espécies da fauna e da flora amazônica, sendo algumas ameaçadas de extinção, além de abrigar tribos indígenas e comunidades tradicionais ribeirinhas em seu território. Aguiar et al. (2012) afirmam que é importante promover ações voltadas para a conservação de áreas florestadas, pois em virtude da atual conjuntura de aumento na demanda pela produção de alimentos, novas áreas de florestas podem ser foco de avanço da fronteira agrícola, assim como ocorreu no início da década de 2000 na região norte do país. Embora uma menor área de Belterra seja destinada à agricultura, é necessário investigar as práticas de manejo aplicadas nas lavouras e pastagens do município, visto a importância da região na prestação de serviços ecossistêmicos. Ressalta-se ainda que tais pesquisas podem gerar indicadores relevantes e com potencial para serem utilizados na tomada de decisão sobre a qualidade do solo e resiliência dos sistemas de produção, ou ainda apontar novas oportunidades de modelos produtivos que fazem melhor uso dos recursos naturais.

A expansão da fronteira agrícola para a região do Baixo Amazonas teve início no começo da década de 2000, subsidiada por ações conjuntas entre o Estado e empresários rurais. Os principais motivos para a implantação do polo produtor de grãos em Belterra foram: condições climáticas com excelente aptidão agrícola, baixo preço das terras, elevado preço internacional da soja e incentivos governamentais. No município de Belterra, intensificação da produção de grãos resultou nas maiores taxas de desmatamento no início da década de 2000 (Figura 4).

Figura 4 - Desflorestamento e incremento do desflorestamento em Belterra, PA entre 2000 a 2017



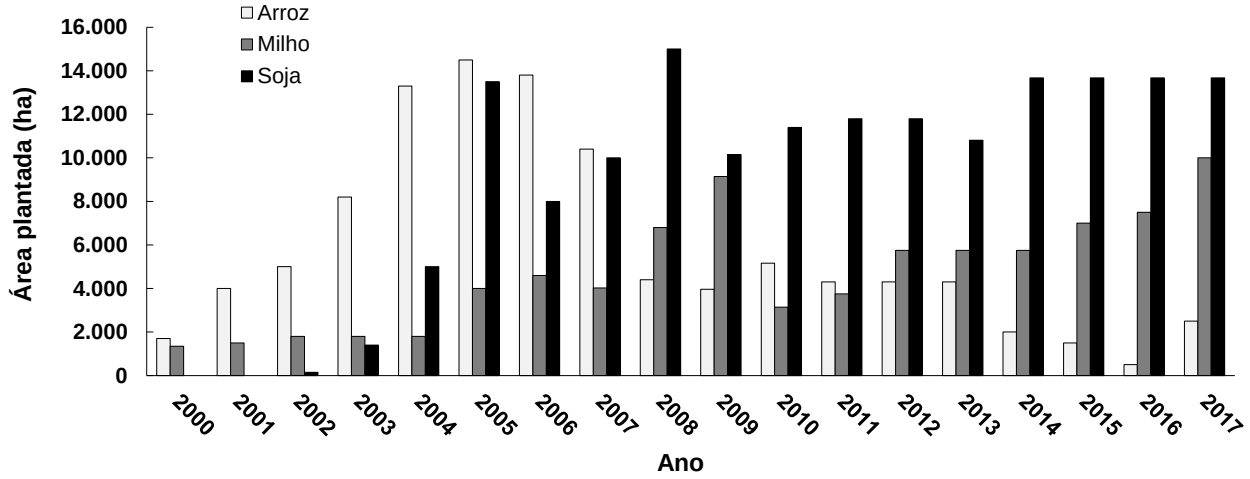
Fonte de dados: INPE, 2018

Para impulsionar a agricultura nesta região, no início da década de 2000 iniciaram estudos sobre a viabilidade econômica da produção de grãos, além disso cresceram os incentivos ao asfaltamento da rodovia BR-163, que interliga o Baixo Amazonas às regiões centro-oeste e sul do Brasil. Como intuito de atrair novos produtores rurais para a região, também foram ofertados financiamentos públicos, junto com flexibilização da legislação ambiental e também concessão de terras, principalmente, nos municípios de Santarém e Belterra (FEARNSIDE, 2006; VENTURIERI et al., 2007; MIRANDA E SILVA, 2016).

A atração de novas empresas produtoras de grãos para a região foi maior após a implantação do Terminal Graneleiro da Cargill (Empresa Exportadora de Grãos) no município de Santarém, às margens do Rio Tapajós. O funcionamento desta obra possibilitou a otimização da logística para a exportação da produção, barateando os custos via escoamento fluvial (Oliveira e Santana, 2012; Oliveira et al., 2013). Segundo Oliveira e Santana (2012), os custos com frete da carga para o porto exportador saindo de Belterra e Santarém é, em média, 10 vezes menor em relação aos municípios de Sinop e Sorriso no Mato Grosso, tornando a atividade competitiva no Baixo Amazonas.

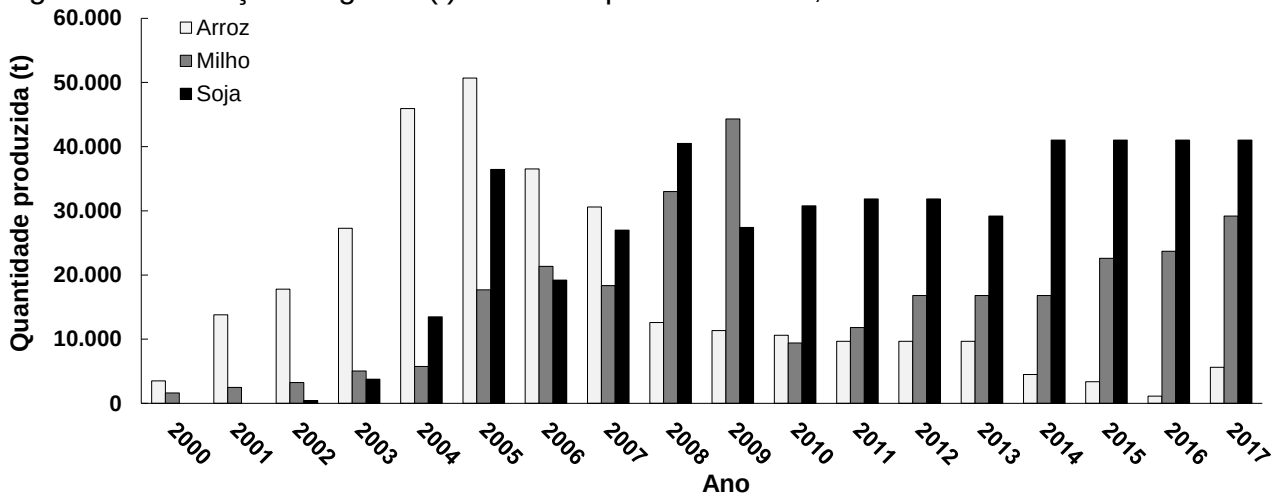
Atualmente a microrregião de Santarém representa o segundo maior pólo de produção de arroz, milho e soja do Estado do Pará (IBGE, 2016). Em Belterra, a sojicultura é a principal atividade agrícola desenvolvida, seguida pela cultura do milho e do arroz (Figuras 5 e 6). Anualmente são produzidas até duas safras de soja na região, a depender do planejamento feito pelo produtor rural. Toda lavoura de soja produzida no Baixo Amazonas é comprada e exportada pela empresa estrangeira Cargil (MIRANDA; SILVA, 2016); o milho é, geralmente, comercializado na região, sendo as empresas avícolas o consumidor final (OLIVEIRA; SANTANA, 2016); e o arroz é vendido para empresas do setor alimentício da própria região ou do Sul do Brasil (OLIVEIRA; SANTANA, 2016).

Figura 5 - Área plantada (ha) de grãos no município de Belterra, PA entre 2000 a 2017



Fonte de dados: IBGE, 2018

Figura 6 - Produção de grãos (t) no município de Belterra, PA entre 2000 a 2017



Fonte de dados: IBGE, 2018

Embora a área de produção de soja seja a principal atividade agrícola de Belterra, o município ainda recebe pouco incentivo, por parte de instituições públicas, para promover o desenvolvimento de tecnologias agrícolas que maximizem a produtividade e que ao mesmo tempo sejam ambientalmente sustentáveis (NERES; PEREIRA, 2013; OLIVEIRA; SANTANA, 2016). A introdução de novas tecnologias na agricultura é importante tanto para garantir alta produtividade, quanto para minimizar possíveis impactos ao meio ambiente.

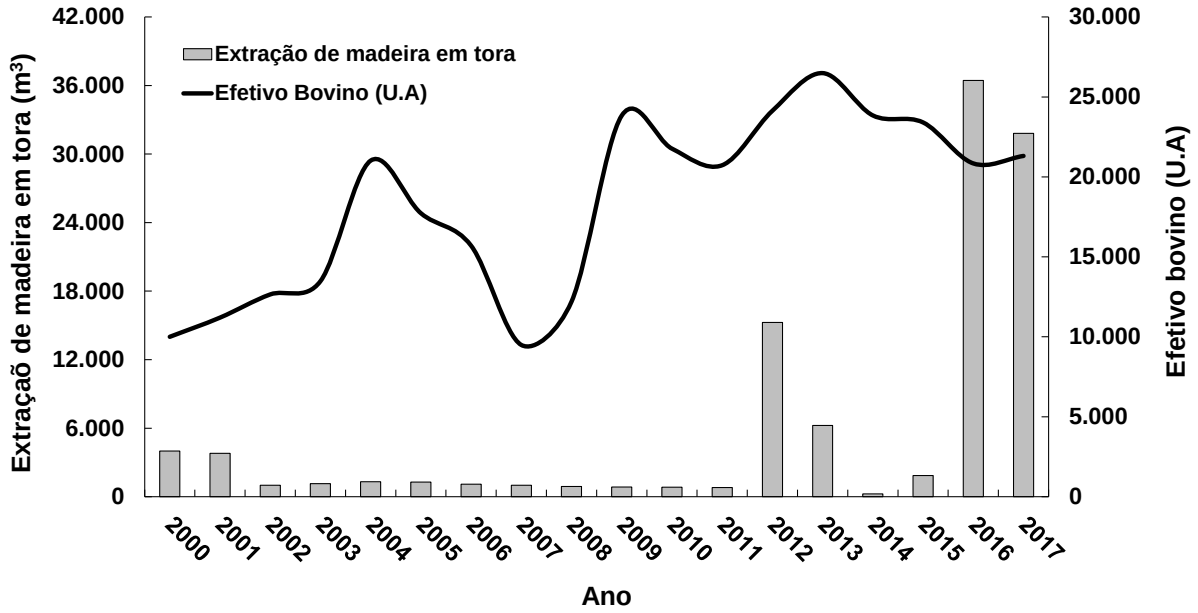
Oliveira et al. (2013), estudando a viabilidade econômica da sojicultura em Santarém e Belterra, identificaram que o sistema de plantio direto apresentou maiores vantagens econômicas em relação ao sistema convencional devido a menor utilização de defensivos agrícolas, fertilizantes, sementes e uso de maquinário. Os mesmos autores constataram que a maioria dos sistemas produtivos implementados naquela região ainda são tecnicamente rudimentares. Esta é uma característica das recentes fronteiras agrícolas, que apresentam baixa tecnologia aplicada ao sistema de produção e eficiência limitada (OLIVEIRA et al., 2013), quando comparadas às áreas pioneiras que investem em inovações tecnológicas para otimizar a produção e aumentar a lucratividade (CHAVAS et al., 2010).

Em Belterra há predominância de áreas destinadas à lavoura de grãos, mesmo que a região apresente características edafoclimáticas favoráveis para outras culturas. Sistemas agroflorestais são poucos expressivos, sendo mais comuns em pequenas propriedades rurais, voltadas para a produção familiar muitas vezes em formato de

quintais florestais, com árvores frutíferas. A silvicultura não é uma atividade praticada na região, sendo a madeira oriunda somente de extrativismo. Vale ressaltar que o extrativismo vegetal, se mal manejado, pode ser uma atividade danosa ao meio ambiente. Observou-se que no ano 2012 a extração de madeira em tora alcançou o valor recorde desde a criação do município em 1997 (Figura 7), sendo, aproximadamente 10 vezes superior em relação à média dos anos anteriores (IBGE, 2016).

O efetivo bovino na região, embora seja crescente desde 2016 (Figura 7), também segue modelos produtivos pouco rentáveis. As atividades agrícolas são essenciais para a produção de alimentos e de outros produtos fundamentais para o bem-estar humano, por isso é imprescindível a adoção de sistemas produtivos sustentáveis.

Figura 7 - Extração de madeira em tora e efetivo bovino no município de Belterra, PA entre 2000 a 2017



Fonte de dados: IBGE, 2018

Segundo Minervino et al. (2008) o sistema pecuário da região é caracterizado por baixa adoção de técnicas como: recuperação de pastagens, suplementação alimentar e infraestrutura adequada para avaliar a produtividade e o desempenho do

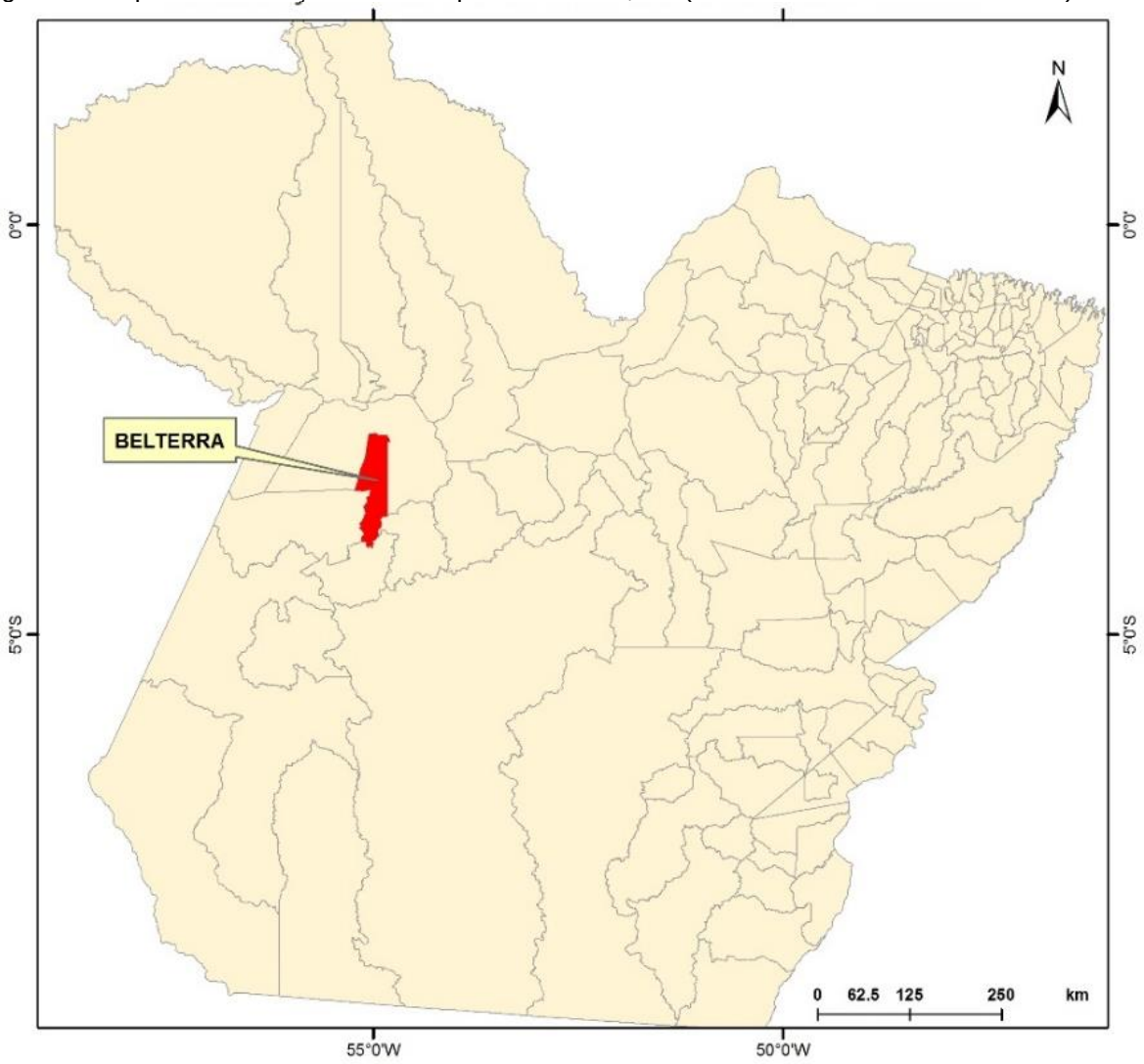
seu rebanho. Como alternativa para esse cenário, pode ser vantajosa a difusão de informações sobre as vantagens de sistemas de produção integrada, seja agrossilvipastoril ou silvipastoril. Vale ressaltar que o modelo de produção deve ser planejado de acordo com as condições reais do produtor rural. As árvores implantadas nos sistemas, além de incrementar a renda do produtor ao final do seu ciclo, também beneficia no conforto térmico para produção animal. O cultivo das essências florestais em conjunto com a pastagem, incentiva o produtor a não renovar o pasto com uso de fogo, evitando assim focos de queimada da vegetação nativa e perda de matéria orgânica do solo. Silva et al. (2014) destaca que o sistema integração lavoura-pecuária apresenta potencial para agir como sumidouro de CO_2, desde que apresente correta intensidade de pastejo.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização do município de Belterra e caracterização edafoclimática

A pesquisa foi conduzida no município de Belterra, localizado na região oeste do Estado do Pará (Figura 8). Em Belterra predomina o clima tipo tropical, classificado como Am de acordo com Köppen e Geiger. A pluviosidade média anual do município é de 2000 mm, sendo que o período chuvoso é concentrado entre os meses de janeiro a junho (70% a precipitação anual) e a temperatura média anual é de 25,3°C (OLIVEIRA-JUNIOR; CORREA, 2001). A classe de solo predominante no município é Latossolo Amarelo de textura muito argilosa (OLIVEIRA-JUNIOR; CORREA, 2001).

Figura 8 - Mapa de localização do município de Belterra, PA (delimitado na área em vermelho)



Fonte: elaborado pela autora

3.2 Áreas de estudo

Nesta pesquisa foram investigadas duas áreas de soja em cultivo mínimo e em idades diferentes (uma implantada há oito anos e outra há 18 anos) e mais duas áreas de pastagem com manejos diferentes (uma pastagem melhorada e outra nominal). Para critério de referência às referidas áreas, avaliou-se também uma área de floresta nativa. Os históricos de uso das áreas estão descritos no Quadro 1. A distribuição espacial das áreas de estudo dentro do município de Belterra está representado na Figura 9.

3.3 Coleta das amostras de solo

As coletas de solo foram efetuadas no ano de 2016. Em cada área de estudo, delimitou-se uma parcela uniforme de 1 ha, aproximadamente, levando-se em consideração o relevo do terreno (plano) e a proximidade da estrada de acesso. Todas as coletas foram feitas a uma margem de 100 m de distância da borda dos terrenos. Em cada uma das áreas foram coletadas seis repetições de amostras de solo, equidistantes 50 m. As amostras deformadas foram coletadas nas camadas 0-10, 10-20, 20-30, 30-50, 50-80, 80-100 cm com uso de trado holandês. As amostras indeformadas, para análise da densidade do solo, foram coletadas nas profundidades 0-10, 10-20, 20-30, 30-50 cm, utilizando trado do tipo TAI, que apresenta um anel metálico de volume conhecido na extremidade, onde o solo é coletado.

Após a coleta, as amostras deformadas foram secas, destorroadas e passadas em peneira de malha 2 mm para separar resíduos vegetais e pedregulhos, conforme determinação para preparo da terra fina seca ao ar (TFSA). Em seguida as amostras foram homogeneizadas e encaminhadas para as análises químicas efetuadas neste estudo. As amostras indeformadas foram secas em estufa para determinação da densidade do solo.

Quadro 1 – Descrição das áreas de estudo investigadas no presente estudo. Todas as áreas estão localizadas do município de Belterra-PA e as amostras de solo foram coletadas no ano de 2016

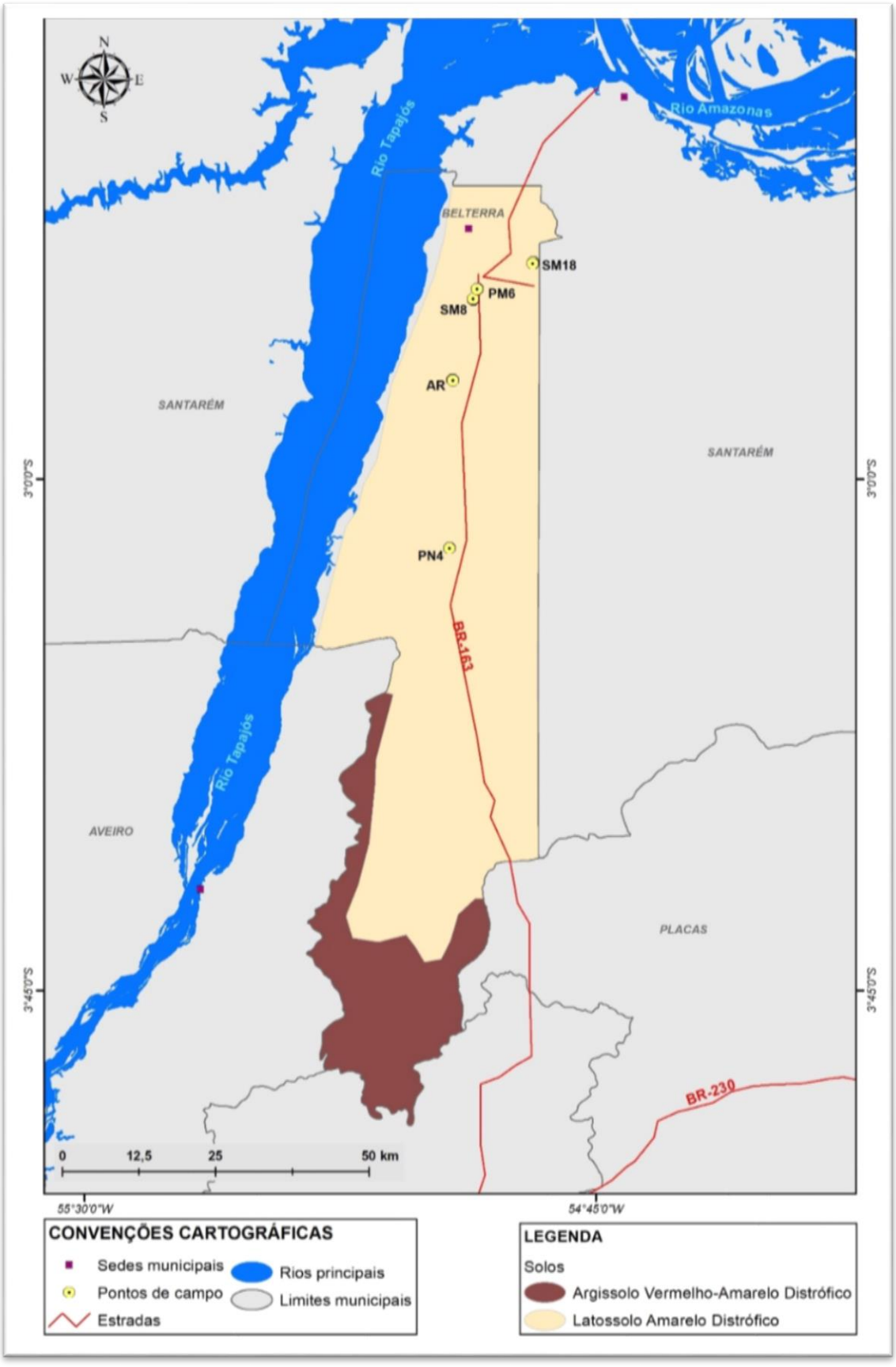
Área de estudo	Sigla utilizado	Caracterização e localização	Histórico de uso
Área de referência	AR	A área é classificada como floresta ombrófila densa (IBGE, 2012). A principal característica ecológica deste tipo de vegetação é o fato de pertencer a ambientes localizados em região de clima tropical com temperatura média de 25ºC e de alta precipitação, com período chuvoso bem distribuído durante o ano (de 0 a 60 dias secos). Este tipo de vegetação é caracterizado por fanerófitos, além de lianas lenhosas e epífitas em abundância (IBGE, 2012). Coordenadas geográficas: 2º 51’ 18,0’’ S e 54º 57’ 34,8’’ W	Vegetação nativa, sem registro de perturbação antrópica. Esta área de estudo compõem a Flona Tapajós e está localizada no km 67 da Rodovia BR-163 (Cuiabá-Santarém). O local de coleta das amostras de solo fica distante, aproximadamente, 8 km da margem da rodovia.
Pastagem nominal	PN4	Pastagem nominal consiste em uma pastagem que não recebe nenhum insumo agrícola ou manejo para otimizar o seu desenvolvimento (MAIA et al., 2009). Este tipo de manejo favorece processo de degradação da pastagem ao longo do tempo, seja por infestação de plantas daninhas ou por erosão do solo. Coordenadas geográficas: 3º 06’ 04,8’’ S e 54º 57’ 51,2’’ W	A pastagem foi implantada no ano de 2012, formada por *Brachiaria brizantha* cv. marandu. No solo desta pastagem nunca foi aplicado fertilizante e o manejo do rebanho bovino é extensivo, com 0,5 U.A ha^{-1}. Até o ano de 2011 a referida área era ocupada por uma formação florestal (aproximadamente 30 anos), sendo que naquele ano foi aplicado fogo no local, com o objetivo de realizar a limpeza da área antes da implantação da pastagem. No final do ano de 2015 foi aplicado fogo na área para renovação da pastagem (cerca de seis meses antes da coleta do solo para este estudo).

continua

conclusão

Área de estudo	Acrônimo utilizado	Caracterização e localização	Histórico de uso
Pastagem melhorada	PM6	Pastagem melhorada consiste em uma pastagem manejada com fins de otimizar a produtividade da área, seja por meio de correção da fertilidade do solo, rotação de culturas, consorciação com leguminosas ou irrigação (MAIA et al., 2009). Coordenadas geográficas: 2º 43’ 17,9’’ S e 54º 55’ 27,2’’ W	A pastagem foi implantada no ano de 2010, formada por *Brachiaria brizantha* cv. piatã e permaneceu em rotação com diferentes culturas agrícolas até o ano de 2013, seguindo pressupostos do sistema plantio direto: • 2010 e 2011: rotação com *Oryza sativa* – arroz (350 kg ha^{-1} de N-P-K 4-20-20 e 60 kg ha^{-1} de Ureia) • 2012 - rotação com *Zea mays* – milho (450 kg ha^{-1} de N-P-K 10-28-20 e 150 kg ha^{-1} de Ureia) • 2013 - rotação com *Glycine Max* – soja (400 kg ha^{-1} de N-P-K 10-28-20) A partir de 2014 a área foi conduzida como pastagem e o rebanho bovino manejado em sistema rotacionado, com 1,5 U.A ha^{-1}. Antes da pastagem, esta área esteve ocupada por uma formação florestal (aproximadamente 30 anos),
Plantio de soja em cultivo mínimo (recente – 8 anos)	SM8	O sistema de “cultivo mínimo” consiste na redução de uma ou mais operações do preparo do solo, em comparação ao sistema convencional. Na área da presente pesquisa, não é realizada aração no terreno, sendo aplicada apenas uma escarificação da camada superficial seguida por gradagem leve. Coordenadas geográficas: SM8: 2º 44’ 14,1’’ S e 54º 55’ 46,3’’ W SM18: 2º 40’ 57,6’’ S e 54º 48’ 39,7’’ W	Cultivo de soja (*Glycine Max*) implantado no ano de 2008. Anualmente é realizada aplicação de 400 kg ha^{-1} de N-P-K 10-28-20 para a produção do grão. O manejo desta área é caracterizado pela prática de escarificação do solo e da gradagem niveladora antes da semeadura da soja. Esporadicamente esta área é manejada em rotação com sorgo (*Sorghum bicolor*) ou milho (*Zea mays*), com o objetivo de incorporar matéria orgânica ao solo durante a entressafra e não deixar o solo desprotegido. Anteriormente ao cultivo de soja, esta área esteve ocupada por uma formação florestal (aproximadamente 30 anos),
Plantio de soja em cultivo mínimo (antigo – 18 anos)	SM18		

Figura 9 - Mapa do município de Belterra com identificação das principais classes de solo. Nos pontos amarelos estão identificadas as localizações das áreas de estudo e no ponto vermelho a sede do município



Fonte: IBGE, 2001

3.4 Análises físico-químicas do solo

3.4.1 Análise de granulometria, fertilidade e densidade do solo

Para caracterização das áreas de estudo, realizou-se as análises de fertilidade e de granulometria do solo nos Laboratórios de Fertilidade do Solo e de Física do Solo (ESAL/USP), respectivamente, conforme proposto por Embrapa (1997).

A análise de densidade do solo foi realizada no laboratório de Ecologia Isotópica (CENA/USP), de acordo com procedimentos descritos por EMBRAPA (1997), onde a amostra de solo indeformada é seca em estufa a 105 ºC, até obter peso constante. O cálculo da densidade é realizado segundo a Equação 1.

$$\mathrm{Ds} = \frac{\mathrm{M}}{\mathrm{V}} \quad (1)$$

D = densidade da amostra (kg m^{-3})

M = massa da amostra (kg)

V = volume do anel ou cilindro (m^{-3})

3.4.2 Determinações das concentrações de carbono e razão natural $^{13}C:^{12}C$

As determinações de C e razão natural $^{13}C:^{12}C$ foram conduzidas no laboratório de Ecologia Isotópica do CENA/USP. As amostras de solo (TFSA) foram maceradas e passadas em malha de 0,250 mm, posteriormente foram pesadas em cápsulas de estanho e finalmente analisada. Esta determinação foi feita com uso de um espectrômetro de massas de razão isotópica em fluxo contínuo (Delta Plus – Thermo Scientific), ao qual é acoplado um analisador elementar Carlo Erba CHN 1110 (para análise de C). A razão isotópica $^{13}C:^{12}C$ da amostra é expressa como o desvio em relação à um padrão em partes por mil (Equação 2), conforme proposto por Craig (1957).

$$\delta^{13}\mathrm{C} = \frac{R_{amostra} - R_{padrão}}{R_{padrão}}\ 10^3 \quad (2)$$

sendo, R da amostra e do padrão é a razão isotópicas $^{13}C:^{12}C$ da amostra e do padrão (VPDB - Vienna Pee Dee Belemnite).

Ressalta-se ainda que o erro analítico aceitável para os teores de carbono e nitrogênio é de 1 e 2 %, respectivamente. Para a razão isotópica, o erro analítico é de no máximo 0,15 e 0,25 ‰ para ^{13}C e ^{15}N, respectivamente.

3.4.3 Fracionamento físico da matéria orgânica do solo

O fracionamento físico da MOS foi realizado para a camada 0-10 cm, com três repetições para cada área, no Laboratório de Matéria Orgânica do Solo da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP). A separação das frações da matéria orgânica do solo foi realizada seguindo o método granulométrico, de acordo com Cambardella e Elliott (1992) e adaptada por Feller e Beare (1997).

Os procedimentos metodológicos da referida análise são os seguintes: (a) em um frasco de vidro, com capacidade para 100 ml, foi adicionado 20 g de solo (TFSA) e 70 mL de água destilada; (b) a amostra foi submetida à dispersão por ultrassom durante 15 min, a 70% da potência do aparelho, fornecendo uma energia de 130 J mL^{-1}; (c) Após a dispersão, a amostra foi passada por um conjunto de duas peneiras empilhadas, sendo a de cima com malha de 75 µm e de baixo com malha de 53 µm; (d) As frações que ficaram retidas na peneira de 75 µm foram separadas por flotação em água para separação, sendo que a fração mais leve é denominada de Fração Orgânica (F.O) e a fração mais densa é denominada de Fração Mineral (F.M); (e) As frações retidas na malha de 53 µm é denominada Fração Organomineral (F.O.M); (f) As frações menores que 53 µm são denominadas Fração Silte+Argila (F.S.A); (g) Após a fase de separação das frações, cada amostra foi identificada e levada à estufa a 45°C até secagem total; (h) Após a secagem, as amostras foram pesadas e macedaras para posterior análise do teor de carbono, conforme metodologia descrita no item 2.5.2. Ressalta-se que também foi analisado o teor de carbono total da amostra não fracionada (TFSA), nas três repetições utilizadas para fazer o fracionamento físico da MOS; (g) A partir das massas de cada fração e dos teores de C, foram calculadas as quantidades de C nas frações do solo (g kg^{-1}).

Ao fim da análise, observou-se que após o fracionamento físico a recuperação da massa inicial da amostra foi superior a 99%, indicando que não houve perda significativa de massa das amostras durante o processo de fracionamento físico.

3.4.4 Grau de humificação da matéria orgânica do solo (H_{FIL})

As determinações do grau de humificação da MOS por fluorescência induzida por laser (H_{FIL}) foram realizadas no Laboratório de Óptica e Fotônica da Embrapa Instrumentação. Foram analisadas as seguintes camadas: 0-10, 10-20 e 20-30 e 30-50 cm, com três repetições por camada de cada área de estudo. A fluorescência induzida por laser (FIL) é uma tecnologia utilizada para analisar o grau de humificação da matéria orgânica do solo, de maneira ágil e em condição próxima à natural (MILORI et al., 2006). A técnica consiste em excitar os grupos funcionais da MOS com um laser cuja emissão está na região do ultravioleta/azul, o que resulta na fluorescência de grupos funcionais da matéria orgânica relacionados com o processo de humificação. Esta fluorescência ocorre na região do visível com pico em aproximadamente 510 nm. O HFIL é obtido pela razão entre a área do espectro de emissão de fluorescência (ACF) e o teor de C orgânico total (g kg^{-1}) presente na amostra, onde o resultado é dado em unidade arbitrária (a.u), conforme descrito em Milori et al. (2006).

3.5 Estoque de carbono no solo

O cálculo do estoque de carbono (Equação 3) foi realizado segundo Ellert & Bettany (1995), sendo a área de floresta nativa utilizada como referência para corrigir a massa do solo nas demais (Conceição, 2006).

$$E = \frac{T * Ds * e}{10} \quad (3)$$

E= estoque de carbono (Mg ha^{-1})

T= teor de carbono (g kg^{-1})

Ds= densidade do solo (g cm^{-3})

e= espessura da camada do solo (cm)

3.6 Origem da matéria orgânica no solo utilizando o modelo de diluição isotópica

A origem C em cada uma das camadas do solo (Equação 4) foi estimada através do modelo de diluição isotópica (Martinelli et al., 2009). Em seguida, multiplicou-se o valor de A pelo valor do estoque de carbono, em camadas correspondentes, com o intuito de estimar a contribuição do estoque de carbono oriundo de plantas de ciclo fotossintético C4 no estoque total de C no solo.

$$A = \frac{\delta_P - \delta_B}{\delta_A - \delta_B} * 100 \quad (4)$$

A: contribuição da fonte A para a composição do solo (%)

δP é a razão isotópica $^{13}C:^{12}C$ do solo estudado (‰)

δB é a razão isotópica $^{13}C:^{12}C$ da MOS da área de floresta nativa (‰)

δA é a razão isotópica $^{13}C:^{12}C$ da MOS da planta C_4 (‰)

3.7 Índice de Manejo do Carbono (IMC)

Este índice é utilizado para avaliar possíveis alterações (perda ou acúmulo de MOS) causadas após mudança de uso do solo, levando em consideração uma área de referência (Blair et al., 1995). O cálculo do IMC avalia tanto a qualidade, quanto o teor de carbono orgânico presente no solo investigado. Neste estudo, o IMC foi calculado para a camada 0-10 cm.

Para o cálculo do IMC (Equação 5), fez-se os cálculos prévios necessários para a investigação das seguintes variáveis:

- Carbono orgânico total (CT): teor de carbono orgânico das amostras de solo.
- Índice de compartimento de carbono (ICC): calculado pela razão entre o CT da área cultivada e o CT da área de referência (Equação 6).
- Carbono lábil (CL): fração da MOS retida na malha de 75 µm durante o processo de fracionamento da matéria orgânica.
- Carbono não lábil (CNL): calculado pela diferença entre o CT e o CL (Equação 7).

- Labilidade do carbono (L): calculada pela razão entre o CL e o CNL (Equação 8).
- Índice de labilidade (IL): calculado pela relação entre a labilidade do carbono da área cultivada e a labilidade do carbono da área de referência (Equação 9).

Índice de Manejo do Carbono

$$IMC = ICC \times IL \times 100 \quad (5)$$

ICC: índice de compartimento de carbono

IL: índice de labilidade

Índice de Compartimento de Carbono (ICC)

$$ICC = \frac{CT\ ac}{CTar} \quad (6)$$

CTac: carbono orgânico total da área cultivada

CTar: carbono orgânico total da área de referência

Carbono não lábil (CNL)

$$CNL = CT - CL \quad (7)$$

CT= carbono orgânico total

CL= carbono lábil

Labilidade do Carbono (L):

$$L = \frac{CL}{CNL} \quad (8)$$

CL: carbono lábil

CNL: carbono não lábil

Índice de Labilidade (IL)

$$IL = \frac{Lac}{Lar} \quad (9)$$

Lc= labilidade da área cultivada

Lr= labilidade da área de referência

3.8 Análise dos resultados

A análise estatística foi realizada comparando-se camadas iguais do solo entre as diferentes áreas de estudo, sendo que as áreas PN4 e PM6 foram comparadas entre si e em relação AR, assim como as áreas SM8 e SM18 também foram comparadas entre si e em relação a AR. Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e teste de comparação de médias, utilizando-se o teste de Tukey a 5% de probabilidade.

4 RESULTADOS

4.1 Caracterização granulométrica e fertilidade do solo

Nas áreas de estudo predomina a fração argila (Tabela 1), sendo o solo classificado como Latossolo Amarelo Distrófico de textura muito argilosa (OLIVEIRA; CORREA, 2001). O pH do solo dos locais de pesquisa é baixo, característica comum dos solos da Amazônia (Tabela 2). A saturação por base (V%) foi maior nas áreas de soja, onde é realizado o manejo da fertilidade do solo anualmente. A saturação por alumínio (m%) foi maior na área de floresta, onde o pH é menor e a concentração de Al é maior.

Tabela 1 - Valores médios (média ± erro padrão) do teor de argila, silte e areia nos perfis do solo das áreas de estudo (Belterra, PA). AR: Área de Referência; PN4: pastagem nominal; PM6: pastagem melhorada; SM8: plantio de soja em cultivo mínimo - recente; SM18: plantio de soja em cultivo mínimo - antigo

Área	Camada	Argila	Silte	Areia
	(cm)		(g kg^{-1})	
AR	0-10	863 ± 3,4	110 ± 3,4	27 ± 0,05
	10-20	825 ± 3,4	155 ± 3,5	21 ± 0,16
	20-30	893 ± 2,3	89 ± 2,3	18 ± 0,02
	30-50	958	27	15
	50-80	969	16	15
	80-100	925	61	15
PN4	0-10	586 ± 3,0	47 ± 1,3	366 ± 2,17
	10-20	696 ± 1,1	28 ± 0,4	275 ± 0,77
	20-30	732 ± 0,2	38 ± 0,6	230 ± 0,39
	30-50	780	19	200
	50-80	797	20	183
	80-100	798	18	184
PM6	0-10	815 ± 5,4	135 ± 5,8	50 ± 0,42
	10-20	834 ± 4,0	125 ± 4,3	41 ± 0,40
	20-30	915 ± 0,2	53 ± 0,2	32 ± 0,02
	30-50	918	55	27
	50-80	840	139	21
	80-100	967	14	19
SM8	0-10	808 ± 2,5	66 ± 1,5	127 ± 0,97
	10-20	799 ± 2,7	82 ± 2,5	119 ± 0,60
	20-30	822 ± 0,4	76 ± 0,4	102 ± 0,47
	30-50	902	21	77
	50-80	917	17	66
	80-100	785	165	50
SM18	0-10	882 ± 2,2	82 ± 2,2	35 ± 0,20
	10-20	877 ± 2,0	92 ± 2,0	31 ± 0,08
	20-30	903 ± 2,1	68 ± 2,1	28 ± 0,05
	30-50	935	43	22
	50-80	958	18	24
	80-100	954	21	25

Tabela 2 - Análise química para fins de fertilidade do solo (valores médios ± erro padrão) das áreas de estudo (Belterra, PA). AR: área de referência; PM6: pastagem melhorada; PN4: pastagem nominal; SM8: plantio de soja em cultivo mínimo recente; SM18: plantio de soja em cultivo mínimo antigo. P (Fósforo); K (Potássio); Ca (Cálcio); Mg (Magnésio); Al (Alumínio); SB (soma de base); t (CTC efetiva); T (CTC potencial); V (saturação por base); m (saturação por alumínio); L.Q (limite de quantificação)

Área	Profundidade	pH	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	t	T	V	m
	cm	H_2O	mg dm^{-3}					$mmol_c$ dm^{-3}				%	
AR	5	3,9 ± 0,1	6,0± 0,1	< 0,1	2,5± 0,3	1,81± 0,2	19,9± 0,5	92,3± 8,8	4,3	24,2	96,6	4,4	82,2
	15	3,9 ± 0,1	2,6± 0,2	< 0,1	1,7± 0,2	1,21± 0,2	18,2± 1,0	74,3± 3,5	2,9	21,1	77,2	3,7	86,3
	25	4,0 ± 0,1	0,2± 0,1	< 0,1	1,4± 0,3	0,72± 0,2	16,7± 0,5	61,3± 4,8	2,1	18,8	63,4	3,3	88,9
	50	4,2	< L.Q	< 0,1	1,3	0,36	15,3	64,0	1,7	17,0	65,7	2,6	90,1
	75	4,1	< L.Q	< 0,1	0,8	0,36	14,5	50,0	1,1	15,6	51,1	2,2	92,8
	100	4,1	< L.Q	< 0,1	0,7	0,18	14,7	47,0	0,8	15,5	47,8	1,8	94,6
PM6	5	4,3± 0,1	5,1± 3,0	0,7± 0,2	10,9± 0,7	3,14± 1,1	6,9± 1,3	45,7± 0,7	14,8	21,6	60,4	24,4	31,7
	15	4,2± 0,1	5,6± 1,8	0,3± 0,2	6,7± 0,9	2,29± 0,4	9,5± 1,3	51,7± 3,3	9,0	18,5	60,7	14,9	51,3
	25	4,1± 0,1	2,2± 1,6	< 0,1	4,0± 0,7	1,81± 0,5	11,1± 1,0	44,7 ± 0,1	6,0	17,1	50,7	11,9	64,7
	50	4,2	< L.Q	< 0,1	3,7	1,63	9,8	30,5	5,4	15,2	35,9	15,0	64,6
	75	4,3	< L.Q	< 0,1	2,7	1,09	9,4	29,0	3,8	13,2	32,8	11,7	71,0
	100	4,3	< L.Q	< 0,1	3,0	0,91	9,2	28,0	3,9	13,1	31,9	12,1	70,4
PN4	5	5,1± 0,1	7,3± 3,4	0,6	27,5± 4,8	14,78± 1,4	0,4± 0,1	24 ± 1,2	42,9	43,3	66,9	64	1,0
	15	4,3± 0,2	4,7± 0,9	0,5	6,8± 2,3	4,59± 1,5	6,2± 3,1	36 ± 1,2	11,9	18,2	47,9	24,9	34,3
	25	4,1± 0,1	0,9± 0,6	0,5	2,6± 0,9	2,53± 0,9	8,2± 2,6	36 ± 4,3	5,6	13,8	41,6	13,6	59,1
	50	4,2	< L.Q	< 0,1	1,6	1,63	8,1	29,0	3,3	11,4	37,6	10,1	71,2
	75	4,1	< L.Q	< 0,1	< L.Q	0,54	11,2	28,0	0,5	11,7	28,5	1,9	95,4
	100	4,1	< L.Q	<0,1	< L.Q	0,72	10,8	28,0	0,8	11,6	28,8	2,9	92,8

continua

conclusão

Área	Profundidade	pH	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	t	T	V	m
	cm	H_2O	mg dm^{-3}					$mmol_c$ dm^{-3}				%	
SM8	5	5,0± 0,4	12,0± 5,9	0,9± 0,2	34,4± 10,8	7,30± 2,5	2,7± 1,6	37,3± 9,0	42,6	45,3	79,9	53,3	5,9
	15	4,8± 0,2	21,8± 9,0	0,9± 0,1	24,5± 7,6	6,52± 2,4	4,1± 2,6	39,0± 8,1	31,7	35,8	70,7	44,8	11,5
	25	4,3± 0,1	9,2± 1,8	0,6± 0,1	12,0± 2,6	2,96± 0,7	6,9± 0,6	44,7± 3,1	15,4	22,3	60,1	25,7	31,0
	50	4,2	1,4	0,2	5,7	1,81	6,7	28,0	7,7	14,4	35,7	21,6	46,4
	75	4,0	1,0	< 0,1	3,3	1,09	9,4	33,0	4,4	13,8	37,4	11,8	67,9
	100	4,1	< L.Q	< 0,1	2,9	1,09	9,2	26,0	3,9	13,1	29,9	13,2	70,0
SM18	5	4,8± 0,3	22,8± 3,7	1,0± 0,4	32,9± 13,9	10,20± 4,3	3,1± 1,8	30,3± 5,8	44,2	47,2	74,5	59,3	6,5
	15	4,6± 0,2	13,3± 2,2	0,9	20,8 ± 8,6	5,43± 1,9	3,1± 1,4	32,7± 4,7	26,8	30,0	59,5	45,1	10,5
	25	4,3± 0,2	5,7± 1,9	0,4	10,9± 3,5	3,50± 1,2	6,7± 2,0	35,3± 3,4	14,8	21,5	50,1	29,5	31,3
	50	4,0	< L.Q	< 0,1	2,9	0,91	10,7	34,0	3,8	14,5	37,8	10,0	74,0
	75	4,0	< L.Q	< 0,1	3,1	1,27	9,1	33,0	4,3	13,4	37,3	11,6	67,7
	100	4,0	2,0	< 0,1	1,9	0,72	12,7	34,0	2,6	15,3	36,6	7,1	83,1

4.2 Densidade do solo

A densidade do solo foi significativamente menor na floresta em relação às pastagens ao longo de todo o perfil do solo (Tabela 3). Da mesma maneira, a densidade do solo foi menor na floresta em relação as áreas cultivadas com soja ao longo de todo o perfil do solo (Tabela 3).

Tabela 3 - Densidade do solo (kg m^{-3}) nas áreas de estudo (Belterra, PA). AR: área de referência; PN4: pastagem nominal; PM6: pastagem melhorada; SM8: plantio de soja em cultivo mínimo – recente; SM18: plantio de soja em cultivo mínimo – antigo

Camada (cm)	AR	PN4	PM6	SM8	SM18
0-10	0,96 ± 0,02 aA	1,09 ± 0,04 b	1,13 ± 0,02 b	1,08 ± 0,03 B	1,06 ± 0,02 B
10-20	0,77 ± 0,05 aA	1,00 ± 0,05 b	1,07 ± 0,03 b	1,01 ± 0,03 B	1,05 ± 0,04 B
20-30	0,94 ± 0,03 aA	1,19 ± 0,04 b	1,15 ± 0,03 b	1,07 ± 0,04 B	1,12 ± 0,03 B
30-50	1,01 ± 0,06 aA	1,17 ± 0,03 b	1,19 ± 0,02 b	1,22 ± 0,04 B	1,18 ± 0,03 B

Letras minúsculas comparam médias (média ± erro padrão da média) entre AR, PN4 e PM6 dentro de uma mesma camada de solo. Letras maiúsculas comparam médias (média ± erro padrão da média) entre AR, SM8 e SM18 dentro de uma mesma camada de solo. Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey (α = 0,05)

4.3 Concentração e estoque de carbono no solo

A concentração de carbono do solo foi mais elevada nas camadas superficiais do solo em todas as áreas de estudo (Tabela 4). A concentração de carbono no solo foi semelhante entre as áreas PN4 e PM6 ao longo do perfil avaliado, sendo que ambas também foram semelhantes à AR até 50 cm de profundidade. Nas camadas subsuperficiais (50 a 100 cm) a área de floresta apresentou maior concentração de C no solo, diferindo das pastagens (Tabela 4). Nas áreas cultivadas com soja (SM8 e SM18), não houve diferença significativa entre ambas, nem mesmo entre estas áreas e o solo da floresta (Tabela 4).

Os estoques de C acumulado nas camadas 0-30 e 0-50 cm do solo da floresta não foram diferentes dos estoques de carbono nas pastagens (Tabela 5). Porém é válido ressaltar que o manejo da PM6 possibilitou o incremento de, aproximadamente, 6 Mg C ha^{-1} em comparação a PN4, considerando o perfil analisado até 50 cm. Ao

avaliar o estoque de C, em cada uma das camadas do solo, identificou-se que abaixo de 20 cm de profundidade as áreas AR e PN4 diferiram significativamente entre si, contribuindo para a diferença de 10,5 Mg C ha^{-1} no perfil avaliado (Tabela 5).

Também não houve diferença no estoque de C do solo florestal e os solos cultivados com soja (Tabela 6). Porém ao comparar a camada 0-50 cm da área de floresta nativa à área de soja com 18 anos, constatou-se que houve um decréscimo de 8 Mg C ha^{-1} (Tabela 6). Observou-se também que o estoque de C na área SM18 (manejo mais antigo) apresentou os menores estoques de C em relação a SM8 (manejo recente), correspondendo a perda de 4 Mg C ha^{-1} na camada 0-50 cm, indicando que a sojicultora neste sistema de manejo pode favorecer possíveis perdas de matéria orgânica do solo no processo de cultivo ao longo do tempo.

Tabela 4 - Concentração C (g kg^{-1}) no solo das áreas de estudo (Belterra, PA). AR: área de referência; PN4: pastagem nominal; PM6: pastagem melhorada; SM8: plantio de soja em cultivo mínimo – recente; SM18: plantio de soja em cultivo mínimo – antigo

Camada (cm)	AR	PN4	PM6	SM8	SM18
0-10	22,2 ± 0,2 aA	20,7 ± 0,21 a	20,9 ± 0,05 a	20,0 ± 0,12 A	17,4 ± 0,11 A
10-20	15,7 ± 0,15 aA	13,0 ± 0,04 a	16,4 ± 0,09 a	16,1 ± 0,08 A	14,7 ± 0,10 A
20-30	13,6 ± 0,14 aA	9,9 ± 0,05 a	11,9 ± 0,18 a	13,3 ± 0,05 A	12,4 ± 0,10 A
30-50	8,3 ± 0,03 aA	5,8 ± 0,04 b	7,1± 0,34 ab	7,2 ± 0,02 A	7,6 ± 0,06 A
50-80	6,8 ± 0,03 aA	4,8 ± 0,03 b	5,1 ± 0,23 b	6,0 ± 0,04 AB	6,1 ± 0,02 B
80-100	6,1 ± 0,02 aA	4,3 ± 0,03 b	4,8 ± 0,14 b	5,1 ± 0,03 A	7,2 ± 0,15 A

Letras minúsculas comparam médias (média ± erro padrão da média) entre AR, PN4 e PM6 dentro de uma mesma camada de solo. Letras maiúsculas comparam médias (média ± erro padrão da média) entre AR, SM8 e SM18 dentro de uma mesma camada de solo. Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey ($\alpha = 0,05$)

Tabela 5 - Estoque de carbono (Mg ha^{-1}) no solo das áreas de estudo (Belterra, PA). AR: área de referência; PN4: pastagem nominal; PM6: pastagem melhorada

Camada (cm)	AR	PN4	PM6
0-10	21,4 ± 1,9 a	20,9 ± 2,2 a	20,1 ± 0,4 a
10-20	12,2 ± 1,1 a	11,3 ± 1,2 a	12,7 ± 0,7 a
20-30	12,7 ± 1,3 a	8,9 ± 1,4 b	11,1± 1,7 ab
30-50	16,8 ± 0,7 a	11,5 ± 1,2 b	14,3 ± 6,8 ab
0 - 30	46,3 ± 3,6	41,1 ± 4,2	43,9 ± 2,3
0 - 50	63,1 ± 3,7	52,6 ± 5,3	58,2 ± 8,9

Letras minúsculas comparam médias (média ± erro padrão da média) entre os diferentes sistemas estudados dentro de uma mesma camada de solo. Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey (α = 0,05)

Tabela 6 - Estoque de carbono (Mg ha^{-1}) no solo das áreas de estudo (Belterra, PA). AR: área de referência; SM8: plantio de soja em cultivo mínimo - recente; SM18: plantio de soja em cultivo mínimo - antigo

Camada (cm)	AR	SM8	SM18
0-10	21,4 ± 1,9 a	19,3 ± 1,2 a	16,7 ± 1,1 a
10-20	12,2 ± 1,1 a	12,5 ± 0,6 a	11,4 ± 0,8 a
20-30	12,7 ± 1,3 a	12,5 ± 0,5 a	11,7 ± 1,0 a
30-50	16,8 ± 0,7 a	14,5 ± 0,5 a	15,3 ± 1,3 a
0 - 30	46,3 ± 3,6	44,3 ± 2,1	39,8 ± 2,8
0 - 50	63,1 ± 3,7	58,8 ± 2,5	55,1 ± 3,8

Letras minúsculas comparam médias (média ± erro padrão da média) entre os diferentes sistemas estudados dentro de uma mesma camada de solo. Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey (α = 0,05)

4.4 Qualidade da matéria orgânica do solo

4.4.1 Relação C:N

A relação C:N do solo decresceu com a profundidade em todas as áreas investigadas e apresentou valores semelhantes entre as pastagens, assim como entre as áreas de cultivo de soja (Tabela 7).

Tabela 7 - Relação C:N no solo das áreas de estudo (Belterra, PA). AR: área de referência; PN4: pastagem nominal; PM6: pastagem melhorada; SM8: plantio de soja em cultivo mínimo – recente; SM18: plantio de soja em cultivo mínimo – antigo

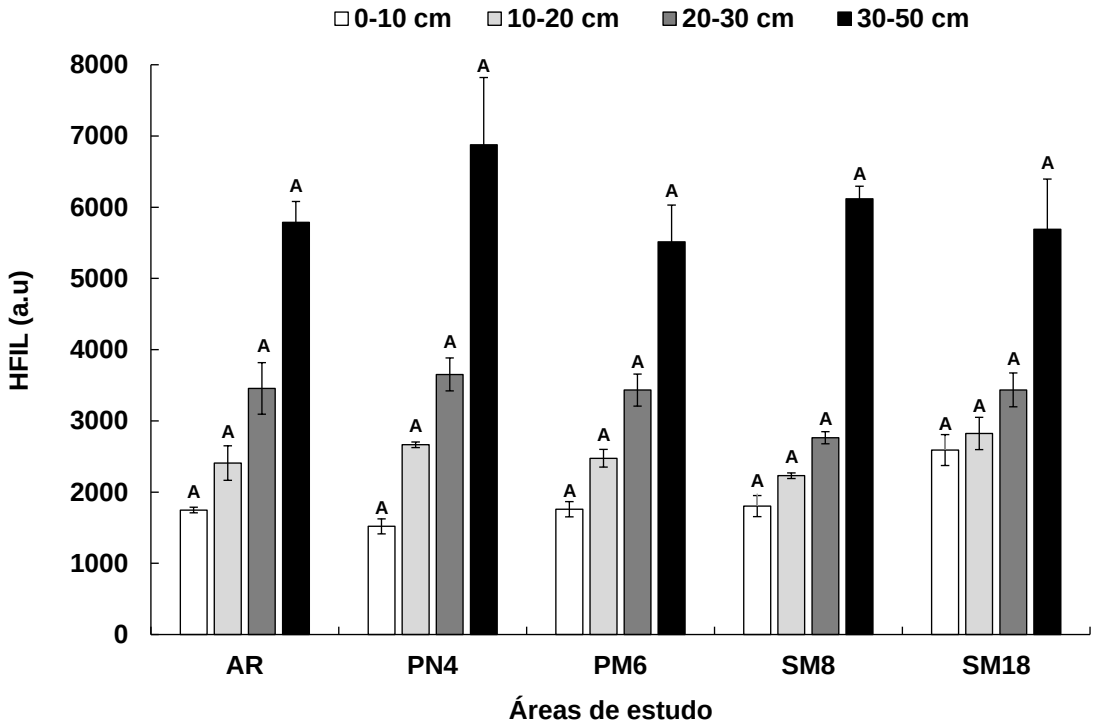
Camada (cm)	AR	PN4	PM6	SM8	SM18
0-10	12,1 ± 0,1 aA	12,9 ± 0,3 a	12,4 ± 0,2 a	12,9 ± 0,4 A	12,0 ± 0,3 A
10-20	12,0 ± 0,1 aA	11,9 ± 0,1 a	11,7 ± 0,1 a	12,6 ± 0,2 A	12,0 ± 0,3 A
20-30	11,9 ± 0,1 aA	11,3 ± 0,3 a	10,9 ± 0,4 a	12,5 ± 0,1 A	11,9 ± 0,3 A
30-50	11,0 ± 0,1 aA	10,0 ± 0,3 a	10,0 ± 0,8 a	10,3 ± 0,2 A	10,7 ± 0,4 A
50-80	10,7 ± 0,2 aA	9,4 ± 0,1 a	9,5 ± 0,7 a	10,0 ± 0,2 A	10,2 ± 0,1 A
80-100	10,6 ± 0,1 aA	9,2 ± 0,1 a	9,8 ± 0,5 a	9,5 ± 0,2 A	10,1 ± 0,3 A

Letras minúsculas comparam médias (média ± erro padrão da média) entre AR, PN4 e PM6 dentro de uma mesma camada de solo. Letras maiúsculas comparam médias (média ± erro padrão da média) entre AR, SM8 e SM18 dentro de uma mesma camada de solo. Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey (α = 0,05)

4.4.2 Grau de humificação da MOS (H_{FIL})

Os valores de H_{FIL}, observados nas diferentes áreas de estudo, foram estatisticamente semelhantes entre si (Figura 10). De maneira geral, os menores valores de H_{FIL} foram identificados nas camadas superficiais (variando de 1519 até 2589 a.u) e os maiores valores na camada 30-50 cm (variando entre 5514 a 6877 a.u), indicando que o a MOS com maior grau de humificação tende a se concentrar nas camadas mais profundas.

Figura 10 - Grau de humificação da MOS (H_{FIL}) em amostras de solo das áreas de estudo (Belterra, PA AR: área de referência; PN4: pastagem nominal; PM6: pastagem melhorada; SM8: plantio de soja em cultivo mínimo – recente; SM18: plantio de soja em cultivo mínimo – antigo



Letras minúsculas comparam médias (média ± erro padrão da média) entre os diferentes sistemas estudados dentro de uma mesma camada de solo. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey (α = 0,05)

4.4.3 Fracionamento físico da MOS

Nas Tabelas 8 e 9 estão os resultados das massas das diferentes frações da MOS em cada uma das áreas de estudo. A referida massa é um indicativo da porção de MOS disponível para ciclagem de nutrientes e da sua recalcitrância no solo. Entre as áreas de pastagem, observou-se que as frações lábeis (M-F.O e M-F.M) foram mais abundantes na pastagem nominal (PN4), quando comparada às áreas de floresta nativa (AR) e de pastagem melhorada (PM6), conforme a Tabela 8. As frações mais recalcitrantes da MOS (M-F.S.A e M-F.O.M) foram mais abundantes na AR, seguida pela PM6 e o menor valor foi na PN4 (Tabela 8). Os altos valores das massas das frações lábeis encontradas na PN4 está fortemente relacionada ao maior teor de areia contido no solo desta área.

Ao comparar a área de floresta nativa às áreas de cultivo de soja, observou-se que a massa da fração orgânica foi semelhante entre as áreas AR e SM8, sendo que

ambas diferiram da SM18 (Tabela 9). A massa da fração organomineral foi maior na AR, diferindo significativamente de SM8 e de SM18 (Tabela 9).

Tabela 8 -Massa da fração orgânica (M-F.O), massa da fração mineral (M-F.M), massa das frações silte e argila (M-F.S.A) e massa da fração organomineral (M-F.O.M) avaliadas na camada 0-10 cm. Belterra, PA. AR: área de referência; PN4: pastagem nominal; PM6: pastagem melhorada

Áreas de estudo	**M-F.O**	**M – F.M**	**M – F.S.A**	**M – F.O.M**
	(g kg^{-1})			
AR	4,3 ±0,3 ab	19,9 ±0,8 a	952,2 ±4,0 a	13,8 ±0,8 a
PN4	7,8 ±1,2 a	331,2 ±23,3 b	653,3 ±22,5 b	5,7 ±0,1 b
PM6	3,7 ±0,8 b	43,2 ±1,1 a	946,9 ±2,7 a	3,7 ±0,1 b

Letras minúsculas comparam médias (média ± erro padrão da média) entre os diferentes sistemas estudados dentro de uma mesma camada de solo. Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey (α = 0,05)

Tabela 9 - Massa da fração orgânica (M-F.O), massa da fração mineral (M-F.M), massa das frações silte e argila (M-F.S.A) e massa da fração organomineral (M-F.O.M) avaliadas na camada 0-10 cm. Belterra, PA. AR: área de referência; SM8: plantio de soja em cultivo mínimo - recente; SM18: plantio de soja em cultivo mínimo - antigo

Áreas de estudo	**M-F.O**	**M – F.M**	**M – F.S.A**	**M – F.O.M**
	(g kg^{-1})			
AR	4,3 ±0,3 a	19,9 ±0,8 a	952,2 ±4,0 a	13,8 ± 0,8 a
SM8	3,8 ±0,5 a	120,5 ±9,2 b	870,6 ±9,7 b	3,0 ± 0,1 b
SM18	1,9 ±0,3 b	31,5 ±0,6 c	963,4 ±1,1 a	1,3 ±0,02 b

Letras minúsculas comparam médias (média ± erro padrão da média) entre os diferentes sistemas estudados dentro de uma mesma camada de solo. Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey (α = 0,05)

Na Tabela 10 estão descritos os resultados do teor de carbono encontrado em cada uma das frações da MOS nas áreas de pastagem em comparação com a área de referência. A concentração de C na fração orgânica foi maior na PN4, diferindo das áreas PM6 e AR, que apresentaram semelhança entre si. Ao avaliar a concentração de C nas frações recalcitrantes (C-F.S.A e C-F.O.M), observou-se que PN4 apresentou menores valores, diferindo da AR (Tabela 10).

Ao comparar as áreas de cultivo de soja à área de referência, observou-se que em relação às frações mais recalcitrantes a AR diferiu da SM18 (Tabela 11). A concentração de C na fração organomineral da área SM18 foi metade do encontrado na SM8, diferindo significativamente.

Tabela 10 - Teor de carbono da fração orgânica (C-F.O), teor de carbono da fração mineral (C-F.M), teor de carbono da fração silte e argila (C-F.S.A), teor de carbono da fração organomineral (C-F.O.M) avaliados na camada 0-10 cm. Belterra, PA. AR: área de referência; PN4: pastagem nominal; PM6: pastagem melhorada

Áreas de estudo	**C-F.O**	**C – F.M**	**C – F.S.A**	**C – F.O.M**
	(g kg^{-1})			
AR	0,9 ± 0,06 a	0,17 ± 0,02 a	24,5 ± 1,3 a	0,99 ± 0,07 a
PN4	3,0 ± 0,50 b	0,81 ± 0,43 a	18,8 ± 1,5 b	0,29 ± 0,04 b
PM6	1,2 ± 0,44 a	0,48 ± 0,16 a	19,4 ± 0,8 ab	0,50 ± 0,03 b

Letras minúsculas comparam médias (média ± erro padrão da média) entre os diferentes sistemas estudados dentro de uma mesma camada de solo. Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey (α = 0,05)

Tabela 11 - Teor de carbono da fração orgânica (C-F.O), teor de carbono da fração mineral (C-F.M), teor de carbono da fração silte e argila (C-F.S.A), teor de carbono da fração organomineral (C-F.O.M) avaliados na camada 0-10 cm. Belterra, PA. AR: área de referência; SM8: plantio de soja em cultivo mínimo - recente; SM18: plantio de soja em cultivo mínimo - antigo

Áreas de estudo	**C-F.O**	**C – F.M**	**C – F.S.A**	**C – F.O.M**
	(g kg^{-1})			
AR	0,9 ± 0,06 a	0,17 ± 0,02 a	24,5 ± 1,3 a	0,99 ± 0,07 a
SM8	1,0 ± 0,26 a	0,57 ± 0,10 b	20,0 ± 2,1 ab	0,38 ± 0,05 b
SM18	0,5 ± 0,11 a	0,20 ± 0,03 a	16,3 ± 1,2 b	0,15 ± 0,00 c

Letras minúsculas comparam médias (média ± erro padrão da média) entre os diferentes sistemas estudados dentro de uma mesma camada de solo. Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey (α = 0,05)

Nas áreas de cultivo de soja também foi estimado o índice de labilidade – IL (relação da labilidade da MOS da área de sojicultura com a labilidade da área de referência) e o índice de manejo do carbono – IMC (índice que estima a contribuição

de determinado manejo para o acúmulo de matéria orgânica no solo, e serve como um indicador de qualidade do solo, levando em consideração a fração lábil da MOS).

Ao comparar o IL e o IMC das áreas de estudo, observou-se que a área SM18 apresentou os menores valores em relação a área de referência (Tabela 12). É importante destacar que resultado encontrado para o IMC mostrou que a área SM18 apresentou um valor cerca de 50% menor que o encontrado na AR (SM18: IL= 0,80; ICC= 0,68; IMC= 52), indicando que a retirada da floresta nativa para condução de sistema agrícola ocasionou perda de carbono no solo ao longo dos 18 anos de cultivo (Tabela12).

De maneira geral, as frações mais recalcitrantes da MOS foram maiores na área de floresta, quando comparada às áreas de pastagem e de cultivo de soja (Tabela 8, 9, 10 e 11).

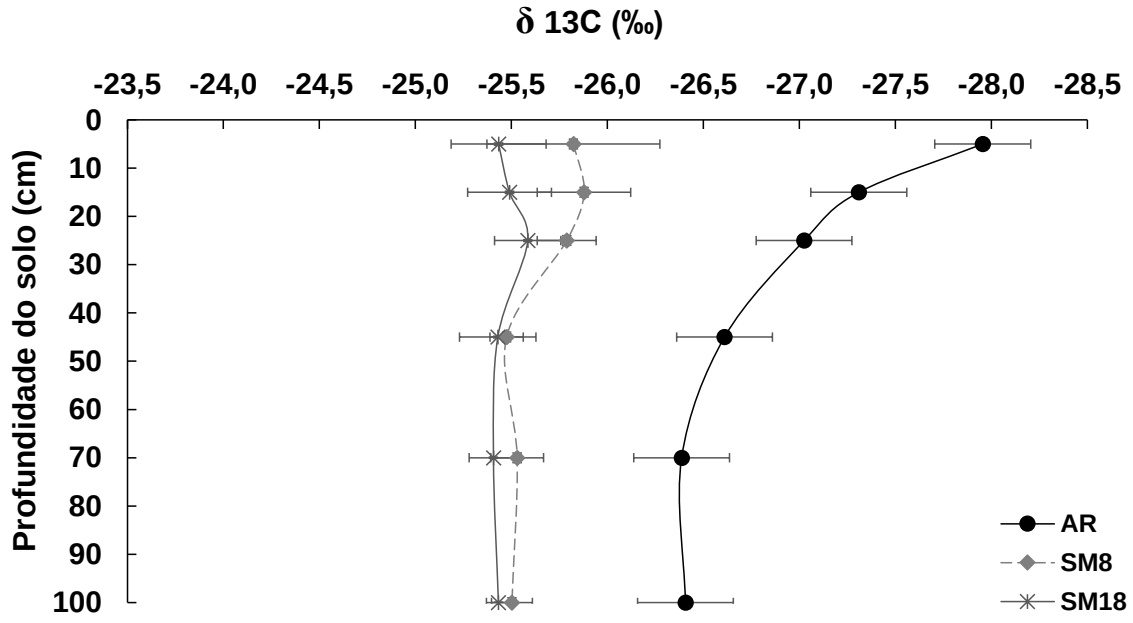
Tabela 12 - Índice de labilidade (IL) e índice de manejo de carbono (IMC) calculados para as áreas de estudo (Belterra, PA) na camada 0-10 (cm). AR: área de referência; SM8: plantio de soja em cultivo mínimo – recente; SM18: plantio de soja em cultivo mínimo - antigo

Áreas de estudo	IL	IMC
AR	1,00	100
SM8	1,16	108
SM18	0,80	52

4.5 Uso de isótopos estáveis para determinação da origem da MOS

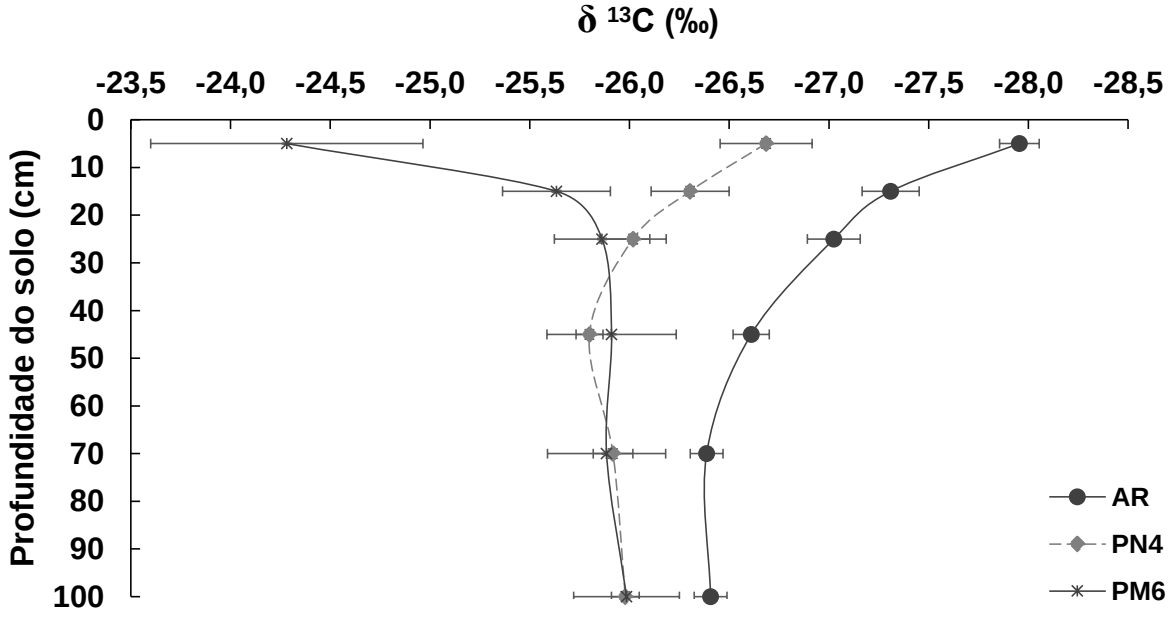
Embora a soja seja uma planta que realiza fotossíntese do tipo C_3, assim como a vegetação que compõem a floresta nativa, houve diferença significativa nos valores de $\delta^{13}C$ do solo entre AR e as áreas SM8 e SM18, até a profundidade de 30 cm, porém as áreas de soja foram semelhantes entre si ao longo do perfil do solo (Figura 11).

Figura 11 - $\delta^{13}C$ (média ± erro padrão) nos perfis do solo das áreas de estudo (Belterra, PA): AR: área de referência; SM8: plantio de soja em cultivo mínimo – recente; SM18: plantio de soja em cultivo mínimo - antigo



Valores de $\delta^{13}C$ do solo nas áreas PN4 e PM6 foram significativamente maiores do que os valores encontrados no solo da floresta, principalmente nas camadas superficiais do solo (Figura 12). Na camada 0-30 cm as pastagens difeririam significativamente da área de referência. A partir de 50 cm todas as áreas apresentaram semelhança ente si, apresentando o valor de -26‰, aproximadamente (Figura 11).

Figura 12 - $\delta^{13}C$ (média ± erro padrão) nos perfis do solo das áreas de estudo (Belterra, PA): AR: área de referência; PN4: pastagem nominal; PM6: pastagem melhorada



A proporção de carbono oriundo de plantas C_4 foi maior no solo da PM6 em relação à PN4 nas camadas mais superficiais do solo (Tabela 13). Houve diferença estatística entre PM6 e PN4 na camada 0-20 cm, as áreas apresentaram valores médios de 20% e 10%, respectivamente (Tabela 13). No entanto, no geral, a proporção de carbono oriundo de plantas C_4 no solo foi em média 14% a partir de 30 cm de profundidade.

Tabela 13 - Contribuição de Carbono oriundo de plantas de ciclo fotossintético C_4 nas áreas de pastagem estudadas em Belterra, PA. AR: área de referência; PN4: pastagem nominal; PM6: pastagem melhorada

Camada (cm)	**Área de estudo**	
	PN4 (%C_4)	**PM6 (%C_4)**
0 - 10	8,8 ± 1,5 a	24,8 ± 4,5 b
10 - 20	11,3 ± 1,3 a	15,8 ± 1,8 b
20 - 30	13,2 ± 1,1 a	14,3 ± 1,6 a
30 - 50	14,7 ± 0,5 a	13,9 ± 2,2 a
50 - 80	13,9 ± 0,7 a	14,1 ± 2,0 a
80 - 100	13,5 ± 0,5 a	13,4 ± 1,8 a

Letras minúsculas comparam médias (média ± erro padrão da média) entre os diferentes sistemas estudados. Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste t ($\alpha = 0,05$)

4 DISCUSSÃO

4.1 Densidade do solo

Neste estudo, a conversão de floresta nativa para o cultivo de soja, assim como para condução de pastagem, levou a um aumento na densidade do solo. Resultados semelhantes também foram observados por Durigan et al. (2017) e Cherubin et al. (2015) em estudos sobre conversão de vegetação nativa para condução de sistema agrícola. A alteração na densidade do solo, nas áreas agrícolas deste estudo, foi influenciada pela redução na incorporação de matéria orgânica no solo, devido, principalmente, ao decréscimo na entrada de matéria orgânica oriunda da vegetação (Silva et al. 2018). Vale ressaltar que o tráfego de máquinas agrícolas e o pisoteio do rebanho bovino (no caso das pastagens), também leva a compactação do solo e consequente aumento de sua densidade.

De maneira geral, em todas as áreas de estudo, os valores de Ds aumentaram em profundidade, característica comum em solos com alto teor de argila, devido à eluviação da argila ao longo do perfil, ao sobrepeso exercido pelas camadas superiores e também pela menor incorporação de matéria orgânica em camadas mais profundas do solo (REICHARDT; TIM, 2004; FREITAS et al., 2018). Porém é válido destacar que nenhum dos locais de estudo apresentou valores de densidade do solo que pudessem comprometer o desenvolvimento da cultura agrícola, pois todos permaneceram abaixo de 1,5 kg m^{-3}, valor considerado como crítico para solos argilosos por Carmargo e Alleoni (1997).

As pastagens avaliadas, apesar de serem manejadas distintamente, tiveram densidades do solo semelhantes entre si. Provavelmente devido ao breve período de tempo de implantação dos dois sistemas pastoris (< 10 anos), não sendo é possível detectar mudanças edáficas na estrutura física do solo. Em uma pastagem nominal mais antiga (16 anos), manejada com fogo, Camargo et al. (1999) mediram na camada superficial do solo uma Ds igual a 1,21 kg m^{-3}, ou seja, mais elevada que a encontrada na PN4. Do mesmo modo, Moraes et al. (2002), Deon (2013) e Sales et al. (2018), ao avaliarem pastagens nominais na Amazônia, encontraram os seguintes valores de Ds na camada superficial do solo: 1,15 kg m^{-3}, 1,35 kg m^{-3} e 1,21 kg m^{-3}. Sales et al. (2018), encontraram em área sob agricultura convencional, os valores de Ds acima de 1,4 kg m^{-3}, superiores aos encontrados nas áreas SM8 e SM18, que são manejadas em sistema de cultivo mínimo.

4.2 Estoque de carbono no solo

O estoque de C acumulado na camada 0-30 cm da área de referência foi semelhante aos das áreas de soja e de pastagem. Provavelmente, a ausência de diferença significativa nos estoques de carbono do solo, após a conversão da floresta para as áreas de agricultura, deve-se ao fato de o solo conter alto teor de argila. Pois, segundo Tognon et al. (1998), a argila favorece a formação de agregados do solo e estes proporcionam a proteção física da MOS, portanto a perda de MOS é lenta em solos argilosos.

O fato de nos solos das pastagens (PM6 e PN4) a Ds e os estoques de carbono terem sido semelhantes entre si, não diminui a relevância dos impactos negativos que a prática contínua da queima da vegetação proporciona à qualidade do solo ao longo do tempo, como já ressaltado por vários autores (HERINGER et al., 2002; JACQUES, 2003; TOWSEND et al., 2010). Os danos causados pela queima da vegetação ao solo dependem do material da cobertura vegetal incinerada e da temperatura atingida durante a queima, que leva a carbonização da MOS e destruição da microbiota, culminando com a esterilização do solo. Adicionalmente, há também uma contundente perda de água, com perda de nutrientes importantes como nitrogênio e o fósforo, perda de água no solo; repelência à água causada pelas cinzas; alta mineralização do nitrato; perda de nitrogênio, fósforo, enxofre e cálcio (DIAS-FILHO, 2011). Por outro lado, é também importante lembrar que o manejo sustentável das pastagens minimiza significativamente os impactos causados pela conversão floresta-pastagem (MAIA et al., 2009; MAIA et al., 2013; SILVA et al., 2014; CERRI et al., 2018).

Outro resultado encontrado neste estudo, que se repetiu em vários outros estudos, foi o decréscimo do teor de carbono com a profundidade do solo. Segundo Cerri et al. (2007), cerca da metade do carbono do solo se concentra nos primeiros 20 cm, considerando-se uma profundidade de até 1 m. Corroborando com essa ideia, Montero (2008), ressalta que o principal fator responsável pela dinâmica da MOS em ambientes florestais é a decomposição da serapilheira e das raízes finas, as quais acumulam-se principalmente na superfície. Ressalta-se que a soja e as gramíneas forrageiras são conhecidas pelo abundante sistema radicular nas primeiras camadas do solo (SANTOS et al., 2007; AZEVEDO et al., 2004).

Embora o maior acúmulo de carbono esteja nas primeiras camadas do solo, é importante também avaliar o carbono presente em camadas mais profundas quando se trata de comparar o efeito da conversão de floresta nativa em sistemas

agropecuários na região tropical, onde predomina solo antigo e profundo. Isto porque o solo se comporta como o maior sumidouro de carbono do ecossistema terrestre, considerando o primeiro um metro de profundidade (LAL, 2008).

Vale ressaltar também que, em ambientes de floresta nativa, embora a maior concentração de carbono no solo esteja na camada superficial, pode ocorrer contínua incorporação de matéria orgânica ao longo do perfil do solo, em diferentes profundidades. Segundo Nepstad et al. (1994) o sistema radicular de árvores presentes em florestas da região Amazônica pode ultrapassar oito metros de profundidade. Camargo et al. (1999) estudando uma cronossequência "floresta nativa-regeneração natural-pastagem", sobre Latossolo argiloso na Amazônia, observou que abaixo de um metro de profundidade o ambiente florestal apresentou maior estoque de carbono no solo, sendo que entre um a cinco metros de profundidade o incremento de raízes na área de floresta chega a ser duas vezes maior em relação área de pastagem.

Na presente pesquisa, observou-se que o estoque de C diferiu, significativamente, entre a floresta nativa e a pastagem nominal nas camadas mais profundas (20 - 50 cm). Conforme observado, o solo da floresta teve um estoque de carbono cerca de 9 Mg ha^{-1} maior que o solo da pastagem PN4. Possivelmente, tal tendência se deva ao maior aporte de material vegetal oriundo do sistema radicular da floresta nativa que está melhor distribuído ao longo do perfil do solo, quando comparado à pastagem manejada com fogo, assim como maior disposição de serapilheira.

A análise do IMC das áreas de cultivo de soja mostrou que ao longo do tempo houve perda de carbono no solo no sistema SM18, sendo que esta mesma área teve 8 Mg C ha^{-1} a menos em relação AR (na camada 0-50 cm). Este resultado assemelha-se aos encontrados por Carvalho et al. (2014), que observaram que a conversão de vegetação nativa para agricultura levou a uma redução do estoque de C no solo, até mesmo em sistema manejados com plantio direto.

O estoque de carbono no solo da pastagem melhorada foi maior que na pastagem nominal manejada com fogo (aproximadamente 6 Mg ha^{-1}), no entanto, esta diferença não foi significativa. Portanto, futuras investigações serão necessárias nestas áreas para avaliar as consequências das diferentes técnicas de manejo, pois Maia et al. (2009) e Cerri et al. (2018) ao avaliarem o efeito do manejo do pasto sobre

o sequestro de C, identificaram resultados positivos com uso da prática de recuperação e melhoramento de pastagens no Brasil.

A diferença de 6 Mg ha^{-1} a mais de carbono no solo da PM6 em relação à PM4 foi provavelmente causada pelo processo de correção da fertilidade do solo e da rotação de culturas (em plantio direto), que ocorreu no período entre 2010 a 2013. Isto porque o desenvolvimento do plantio direto é capaz de aumentar o teor de C no solo, favorecendo o aporte de matéria orgânica na área a cada ciclo, sendo considerada uma alternativa sustentável de produção, quando comparado a sistemas de manejo convencionais (BAYER et al, 2000; CAMPOS et al., 2013). Segundo Chen et al. (2018), ao analisarem solos cultivados com milho, a palhada é capaz de aumentar o estoque de carbono no solo em algumas condições específicas, minimizando as perdas causadas pelo cultivo.

O melhoramento da pastagem além de aumentar o estoque de C no solo (CERRI et al., 2007; MAIA et al., 2009; BUSTAMANTE et al., 2012; CERRI et al., 2018) também é necessário para melhorar a produtividade. Silva et al. (2004) esclarece que em pastagens mal manejadas, em solos com baixa fertilidade, a produção da biomassa é reduzida e, consequentemente, proporciona baixo incremento de C na área. Ainda, Carvalho et al., (2014) destacam que dependendo do tempo em que a pastagem é mantida em manejo inadequado e do seu estágio de degradação, a perda de C do solo tende a aumentar.

O resultado do presente estudo também corrobora com o verificado por Oliveira (2018), que desenvolveu uma metanálise sobre potencial de sequestro de C em pastagens do território brasileiro. A referida autora observou que a conversão de vegetação nativa para pastagem leva a uma perda de 5% no acúmulo de C do solo na camada 0-30 cm, e ainda ressalta que em pastagens degradadas a perda de C chega até a 12% nos primeiros 30 cm de profundidade.

4.3 Qualidade da matéria orgânica do solo

A relação C:N da matéria orgânica do solo também foi semelhante entre as áreas de estudo, que por sua vez foram semelhantes aos encontrados por Chaves (2014), que estudou diferentes sistemas agropecuários em um Latossolo Amarelo argiloso na Amazônia. Resultado semelhante também foi encontrado do Durigan (2013) avaliando diferentes pastagens sobre a mesma classe de solo.

Estes resultados corroboram com o trabalho de Batjes e Dijkshoon (1999), onde afirmaram que valores de relação C:N em Latossolos da Amazônia podem variar entre 10 a 12. Tal resultado é ratificado ainda por Vieira (1971), que estudou diversos perfis de solos no Estado do Pará e concluiu que a relação C:N pode variar entre 6 a 16 em Latossolos Amarelos desta região.

Os menores valores de H_{FIL} foram observados nas camadas superficiais, devido à maior concentração de carbono lábil na superfície do solo (oriundo da biomassa fresca da cobertura vegetal do terreno). Ao longo do processo de degradação da MOS, as frações mais decompostas percolam no perfil, resultando em maior acúmulo de MOS humificada nas camadas mais profundas. Este mesmo padrão de comportamento (aumento do H_{FIL} em profundidade) também foi encontrado por Rosa et al. (2005), Favoretto et al. (2008), Freitas et al. (2017) e Oliveira (2018). Vale ressaltar que o processo de humificação da MOS também está relacionado à condição edafoclimática do local, ao tipo de material de origem, assim como ao manejo aplicado na área (BAYER et al., 2002).

Não foram identificadas diferenças estatísticas entre o H_{FIL} das áreas de soja. Mas é relevante observar que a SM18 apresentou maior H_{FIL} na camada superficial em relação às demais (Figura 3), este resultado sugere que a biomassa incorporada à área é decomposta em maior velocidade devido ao uso dos implementos agrícolas utilizados no cultivo dos grãos, conforme observado também por Freitas et al. (2017) e Martins et al. (2011).

Quanto à análise do fracionamento físico da MOS, notou-se que a área SM8 apresentou maior índice de manejo de carbono em relação à SM18. O cálculo do IMC leva em consideração tanto o estoque de carbono total, quanto o carbono das frações lábeis, por isso, considera-se que na SM18 houve perda de carbono e prejuízo na qualidade da MOS. Para Blair et al. (1995), quando o IMC apresenta valor abaixo de 100 indica impacto negativo no uso da terra. Segundo Freixo et al. (2002) e Rosa et al. (2003) afirmam que as frações lábeis da MOS são importantes indicadores de redução de MOS no sistema, visto que é um compartimento mais sensível às mudanças causadas pelo uso e manejo do solo.

4.4 Origem da matéria orgânica do solo

De maneira geral, em todas as áreas foi observado maior contribuição de plantas do tipo fotossintético C_3 no solo, fator que favorece a semelhança encontrada nos valores de H_{FIL} entre as áreas. Ao analisar os valores de $\delta^{13}C$ do solo das áreas de estudo, observou-se que houve aumento em profundidade, corroborando com Martinelli et al. (1996), que avaliaram perfis de solo em diferentes localidades da Amazônia e encontraram o mesmo padrão. Os referidos autores afirmaram que o aumento de $\delta^{13}C$ nas camadas mais profundas está relacionado a decomposição da MOS. De acordo com Assad et al. (2013), a decomposição da MOS pode ocasionar uma variação de até -4 ‰ ao longo do perfil do solo.

Os valores de $\delta^{13}C$ do solo nas áreas de soja foram próximos a -25‰, não variando ao longo do perfil. Tendência semelhante foi encontrada por Figueira (2013), que ao avaliar diferentes sistemas de cultivo de soja na região Amazônica observou valores de $\delta^{13}C$ variando entre -23‰ a -24‰.

Embora a soja e a vegetação florestal sigam o ciclo fotossintético do tipo C_3, os valores de $\delta^{13}C$ do solo foram distintos entre essas duas coberturas do solo. Fatores importantes que devem ser considerados na comparação entre o $\delta^{13}C$ do solo da floresta e do cultivo de soja são as condições ambientais como a incidência de luz, a concentração de CO_2 no meio e a disponibilidade de água para as plantas, pois todas estas são variáveis que interferem diretamente na regulação estomática e no processo fotossintético, que posteriormente irão interferir na composição isotópica da planta C_3 (TAIZ e ZEIGER, 2013). Com o aumento de temperatura, os estômatos tendem a fechar evitando perdas de água elevadas, com isso é reduzida a concentração do CO_2 intracelular provocando um aumento no valor do $\delta^{13}C$ da planta. Segundo Martinelli et al. (2009), em ambientes onde não há alta incidência de luz e não há restrição de água, são encontrados os menores valores de $\delta^{13}C$, tanto na vegetação, como nos solos.

A diferença nos valores de $\delta^{13}C$ entre a AR e os cultivos de soja também pode ter sido influenciada pela rotação esporádica da soja com milheto (C_4). Resultados semelhantes foram encontrados também por Loss et al. (2014) ao avaliarem um sistema de cultivo em plantio direto com rotação de soja e forrageira. Outro fator que pode ter contribuído para o resultado encontrado nas áreas SM8 e SM18, é o processo de mecanização da área agrícola, que acelera decomposição da MOS e favorece o

enriquecimento no valor do $\delta^{13}C$ do solo. Pois, segundo Martinelli et al. (2009) a decomposição do tecido vegetal ocasiona um enriquecimento de -1 ‰ a -2 ‰ no solo.

Nas áreas de pastagem, a composição isotópica do solo foi semelhante ao encontrado por Bernoux et al. (1999) e Trumbore et al. (1995), que também estudaram pastagens em Latossolos argilosos na Amazônia. A contribuição média de carbono originado por plantas do tipo C_4, nas camadas superficiais, foi cerca de 20% na área PM6, enquanto no solo da pastagem PN4 essa contribuição foi de apenas 10%, sugerindo que a pastagem nominal manejada com fogo teve menor contribuição carbono proveniente da forrageira implantada no local. Com base em tais resultados, infere-se que o manejo aplicado à PM6 (correção da fertilidade do solo, rotação de cultura e taxa de lotação do rebanho adequada) favoreceu a diferença encontrada nos valores de $\delta^{13}C$ nas camadas superficiais.

Embora as pastagens PM6 e PN4 apresentem histórico de manejos distintos, não se notou diferenças significativas na densidade do solo nem no estoque e qualidade da matéria orgânica do solo. Provavelmente, este se deva ao pouco de tempo de implantação das duas pastagens, pois ainda não foi estabelecido o equilíbrio dinâmico da MOS na área. Adicionalmente, o fato de a concentração de argila presente no solo das áreas estudadas ser elevada, que proporciona a formação de agregados, favorecendo a proteção física da MOS e retardando o processo de decomposição da MOS.

Diante do exposto, nota-se a importância da continuidade das investigações para se avaliar adequadamente o efeito dos manejos das pastagens PM6 e da PN4, visto que nesta região ainda predomina o manejo de pasto com queima para renovação, sendo que atualmente no município são identificadas apenas três propriedades rurais pioneiras na condução de pastagens melhoradas, visando a otimização da produção e dos recursos naturais.

5 CONCLUSÃO

A hipótese “pastagens com manejos distintos apresentam diferenças no estoque de carbono e na qualidade da matéria orgânica do solo” não foi confirmada. Infere-se que este resultado ocorreu porque as duas áreas apresentam pouco de tempo de implantação (idade próxima a cinco anos) e também pelo fato da granulometria do solo conter alto teor de argila. Porém, abaixo de 20 cm de profundidade somente a PN4 apresentou diferença significativa no estoque de C no solo em relação a AR. Ressalta-se ainda que na PM6 o ocorreu maior aporte de C oriundo de gramíneas (camada 0-20 cm), em relação a PN4, demonstrando eficiência do melhoramento da pastagem.

A hipótese “o cultivo de soja favorece a perda de carbono do solo ao longo do tempo e apresenta diferença na qualidade da MOS” não foi confirmada. As áreas de cultivo de soja, em diferentes idades, apresentaram semelhança entre si quanto ao estoque de C e ao índice de humificação da MOS. Porém ocorreu diferença no valor do índice de manejo do carbono, onde no cultivo SM8 foi maior que o encontrado no SM18, indicando perda da MOS lábil ao longo do tempo.

Desta forma, recomenda-se a continuidade de avaliações nos locais de estudo, a fim de verificar alterações na dinâmica do carbono e na qualidade da MOS ao longo do tempo. Tais dados são relevantes para avaliar os efeitos ocasionados pelos sistemas agropecuários implantados na região amazônica e gerar indicadores que poderão ser utilizados para tomada de decisão.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, A.P.D.; OMETTO, J.P.; NOBRE, C.; LAPOLA, D.M.; ALMEIDA, C.; VIEIRA, I.C.; SOARES, J.V.; ALVALA, R.; SAATCHI, S.; VALERIANO, D.; CASTILLA-RUBIO, J.C. Modeling the spatial and temporal heterogeneity of deforestation - driven carbon emissions: the INPE - EM framework applied to the Brazilian Amazon. **Global Change Biology**, Oxford, v. 18, p. 3346–3366, 2012.

ALVES, L.W.R. **Produção e dinâmica de degradação da fitomassa de planta para cobertura do solo no sistema plantio direto em Paragominas, PA**. Macapá: Embrapa Amapá, 2015. 20 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 90).

ASSAD, E.D.; PINTO, H.S.; MARTINS, S.C.; GROPPO, J.D.; SALGADO, P.R.; EVANGELISTA, B.; VASCONCELLOS, E.; SANO, E.E.; PAVÃO, E.; LUNA, R.; CAMARGO, P.B.; MARTINELLI, L.A. Changes in soil carbon stocks in Brazil due to land use: paired site comparisons and a regional pasture soil survey. **Biogeosciences**, Katlenberg-Lindau, v. 10, p. 6141-6160, 2013.

AZEVEDO, D.M.P.; LEITE, L.F.C.; TEIXEIRA NETO, M.L. **Distribuição do sistema radicular da soja sob diferentes métodos de preparo do solo**. Teresina: Embrapa Meio Norte, 2004. 15 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 95).

BARRIE, A.; PROSSER, S. Automated analysis of light-element stable isotopes by isotope ratio mass spectrometer. In: BOUTTON, T.W.; YAMASAKI, S. **Mass spectrometry of soils**. New York: Marcel Dekker, 1996. p. 1-46.

BATJES, N.H.; DIJKSHOORN, J.A. Carbon and nitrogen stocks in the soils of the Amazon Region. **Geoderma**, Amsterdam, v. 89, n. 3/4, p. 273-286. 1999.

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; SAAB, S.C.; MILORI, D.M.B.P.; BAGNATO, V. Tillage and cropping system effects on soil humic acid characteristics as determined by electron spin resonance and fluorescence spectroscopies. **Geoderma**, Amsterdam, v. 105, p. 81–92, 2002.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; MARTIN NETO, L. Efeito de sistemas de preparo e de cultura na dinâmica da matéria orgânica e na mitigação das emissões de CO2. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 599-607, 2000.

BERENGUER E.; FERREIRA J.; GARDNER T. A. et al. A large-scale field assessment of carbon stocks in human-modified tropical forests. **Global Change Biology**. v. 20, p. 3713–3726. 2014.

BLAIR, G.J.; LEFROY, R.D.B.; LISLE, L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. **Australian Journal of Agricultural Research**, Victoria, v. 46, n. 7, p. 1459-1466, 1995.

BRADY, N.C.; WEIL, R.R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3ª.ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 704p

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Desenvolvimento. **Plano setorial de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas para a consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono na agricultura**. Brasília, 2012. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/download.pdf>. Acesso em: 15 set. 2013.

BUSTAMANTE, M.M.C.; NOBRE, C.A.; SMERALDI, R.; AGUIAR, A.P.D.; BARIONI, L.G.; FERREIRA, L.G.; LONGO, K.; MAY, P.; PINTO, A.S.; OMETTO, J.P.H.B. Estimating greenhouse gas emissions from cattle raising in Brazil. **Climatic Change**, Dordrecht, v. 115, p.559–577, 2012.

CAMARGO, O.A. de; ALLEONI, L.R.F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba: ESALQ, 1997. 132 p.

CAMARGO, P.B.; TRUMBORE, S.E.; MARTINELLI, L.A.; DAVIDSON, E.A.; NEPSTAD, D.C.; VICTORIA, R.L. Soil carbon dynamics in regrowing forest of eastern Amazonia. **Global Change Biology**, Oxford, v. 9, p. 693–702, 1999.

CAMBARDELLA, C.A.; ELLIOTT, E.T. Particulate soil organic matter change across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, p. 777-783, 1992.

CARVALHO, J.L.N.; RAUCCI, G.S.; FRAZÃO, L.A.; CERRI, C.E.P.; BERNOUX, M.; CERRI, C.C. Crop-pasture rotation: a strategy to reduce soil greenhouse gas emissions in the Brazilian Cerrado. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 183, p. 167–175, 2014.

CASTRO, G.S.A.; ALVES, L.W.R. **Produtividade da soja em sistema plantio direto ou convencional no Cerrado amapaense**. Macapá: Embrapa Amapá, 2016. (Comunicado Técnico, 142).

CERRI, C. E. P.; CERRI, C. C.; MAIA, S. M. F.; CHERUBIN, M. R.; FEIGL, B. J.; LAL, R. Reducing Amazon deforestation through agricultural intensification in the Cerrado for advancing food security and mitigating climate change. **Sustainability**, Basel, v. 10, p. 989-1007, 2018.

CERRI, C.E.P.; EASTER, M.; PAUSTIAN, K.; KILLIAN, K.; COLEMAN, K.; BERNOUX, M.; FALLOON, P.; POWLSON, D.S.; BATJES, N.H.; MILNE, E.; CERRI, C.C. Predicted soil organic carbon stocks and changes in the Brazilian Amazon between 2000 and 2030. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 122, p. 58-72, 2007.

CHAVAS, J.P.; CHAMBERS, R.G.; POPE, R.D. Production economics and farm management: a century of contributions. **American Journal of Agricultural Economics**, 92: 356-375. 2010.

CHAVES, S.S.F. **Dinâmica do carbono no solo sob diferentes usos da terra em Paragominas, PA.** 2014. 85 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

CHEN, J.; HEILING, M.; RESCH, C.; MBAYE, M.; GRUBER, R.; DERCON, G. Does maize and legume crop residue mulch matter in soil organic carbon sequestration? **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 265, p. 123–131, 2018.

CHEN, S.; HUANG, Y.; ZOU, J.; SHI, Y. Mean residence time of global topsoil organic carbon depends on temperature, precipitation and soil nitrogen. **Global and Planetary Change**, Amsterdam, v. 100, p. 99–108, 2013.

CHERUBIN, M.R. et al. Qualidade física, química e biológica de um Latossolo com diferentes manejos e fertilizantes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 2, p. 615-625, 2015.

CONCEIÇÃO, P.C. **Agregação e proteção física da matéria orgânica em dois solos do sul do Brasil**. 2006. 155 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

CRAIG, H. Isotopic standards for carbon and oxygen and correction factors for mass spectrometric analysis of carbon dioxide. **Geochim Cosmochim Acta**. v. 12, p. 133-149, 1957.

DEON, D.S. **Mudança de uso da terra e impacto na matéria orgânica do solo em dois locais no Leste da Amazônia**. 2013. 151 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

DIAS-FILHO, M. **Degradação de pastagens: processos, causas e estratégias de recuperação**. 4ª. ed. Belém: Ed. do autor. 215 p. 2011.

DICK, D.P.; MARTINAZZO, R.; DALMOLIN,RI. S.D.; JACQUES,A. VI. Á.; MIELNICZUK, J. ALESSANDRO SAMUEL ROSA. Impacto da queima nos atributos químicos e na composição química da matéria orgânica do solo e na vegetação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 5, p. 633-640, 2008.

DURIGAN, M. R.; CHERUBIN, M. R.; CAMARGO, P. B.; FERREIRA, J. N.; BERENGUER, E.; GARDNER, T. A.; BARLOW, J.; DIAS, C. T. S.; SIGNOR, D.; OLIVEIRA-JUNIOR, R. C.; CERRI, C. E. P. Soil Organic Matter Responses to Anthropogenic Forest Disturbance and Land Use Change in the Eastern Brazilian Amazon. **Sustainability**, Basel, v. 9, p. 379-394, 2017.

ECLESIA, R. P.; JOBBAGY, E. G.; JACKSON, R.B.; BIGANZOLI, F.; PIÑEIRO, G. Shifts in soil organic carbon for plantation and pasture establishment in native forests and grasslands of South America. **Global Change Biology**, Oxford, v. 18, p. 3237–3251, 2012.

ELLERT, B.H.; BETTANY, J.R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 75, p. 529-538, 1995.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise do solo**. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

FAVORETTO, C.M.; GONÇALVES, D.; MILORI, D.M.B.P.; ROSA, J.A.; LEITE, W.C.; BRINATTI, A.M.; SAAB, S.C. Determination of humification degree of organic matter of an oxisol and of its organo-mineral fractions. **Química Nova**, São Paulo, v. 31, p. 1994-1996, 2008.

FEARNSIDE, P. M. Desmatamento na Amazônia: dinâmica, impactos e controle. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 36, n. 3, p. 395-400, 2006.

FEARNSIDE, P. M. Soybean cultivation as a threat to the environment in Brazil. **Environmental Conservation**, v. 28, p. 23-38, 2001.

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

FIGUEIRA, A. M. S. **O cultivo de soja na região sudeste da Amazônia e suas implicações na dinâmica de nitrogênio**. 2013. 92 p. Tese (Doutorado em Ciências) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

FREITAS, I. A. O.; CASAGRANDE, J. C.; SILVA, L. S.; CAMPOS, M. C. C. Estoque de carbono de Latossolos em sistemas de manejo natural e alterado. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 28, n. 1, p. 228-239, 2018.

FREITAS, R. C. Soil Organic Matter Quality in Jatropha spp. Plantations in Different Edaphoclimatic Conditions. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 41, e0160218, 2017.

FREIXO, A.; MACHADO, P.L.O.A.; GUIMARÃES, C.M.; DIAS, C.A.; FADIGAS, F. Estoques de carbono e nitrogênio e distribuição de frações orgânicas de Latossolo do cerrado sob diferentes sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 425-434, 2002.

HERINGER, I.; JACQUES, A.V.A. Características de um Latossolo Vermelho sob pastagem natural sujeita à ação prolongada do fogo e de práticas alternativas de manejo. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 32, n. 2, p. 309-314, 2002.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Manual técnico da vegetação brasileira**: sistema fitogeográfico, inventário das formações florestais e campestres, técnicas e manejo de coleções botânicas, procedimentos para mapeamentos. Rio de Janeiro: IBGE - Diretoria de Geociências, 2012. 271 p. (Manuais Técnicos de Geociências, 1).

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Disponível em: <https://mapas.ibge.gov.br/tematicos/solos.html>. Acesso em: 2 dez. 2018

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/>. Acesso em: 28 jul. 2016.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Disponível em: <http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes>. Acesso em: 5 out. 2018

JACQUES, A. V. A. A queima das pastagens naturais - efeitos sobre o solo e a vegetação. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n.1, 2003.

LAL, R. Carbon sequestration. Philosophical Transactions of the Royal Society. Biological Sciences, London, v. 363, n. 2, p.815-830. 2008.

LAPOLA, D.M.; MARTINELLI, L.A.; PERES, C.A.; OMETTO, J.P.H.B.; FERREIRA, M.E.; NOBRE, C.A.; AGUIAR, A.P.D.; BUSTAMANTE, M.M.C.; CARDOSO, M.F.; COSTA, M.H.; JOLY, C.A.; LEITE, C.C.; MOUTINHO, P.; SAMPAIO, G.; STRASSBURG, B.B.N.; VIEIRA, I.C.G. Pervasive transition of the Brazilian land-use system. **Nature Climate Change**, 4: 27-35. 2014.

MAIA, S.M.F.; CARVALHO, J.L.N.; CERRI, C.E.P.; LAL, R.; BERNOUX, M.; GALDOS, M.V.; CERRI, C.C. Contrasting approaches for estimating soil carbon changes in Amazon and Cerrado biomes. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 133, p. 75-84, 2013.

MAIA, S.M.F.; OGLE, S.M.; CERRI, C.E.P.; Cerri, C.C. Effect of grassland management on soil carbon sequestration in Rondônia and Mato Grosso states, Brazil. **Geoderma**, Amsterdam v. 149, p. 84-91, 2009.

MARTINELLI L.A.; PESSENDA, L.C.R.; ESPINOZA, E.; CAMARGO, P.B.; TELLES, E.C.; CERRI, C.C.; VICTORIA, R.L.; ARAVENA, R.; RICHEY, J.; TRUMBORE; S. Carbon-13 variation with depth in soils of Brazil and climate change during the Quartenary. **Oecologia**, Berlin, v. 106, p. 376-381, 1996.

MARTINELLI, L.A.; OMETTO, J.P.H.B.; FERRAZ, E.S.; VICTORIA, R.L.; CAMARGO, P.B.; MOREIRA, M.Z. Desvendando questões ambientais com isótopos estáveis. São Paulo: Oficina de Textos, 144 p, 2009.

MARTINS, T.; SAAB, S.C.; MILORI, D.M.B.P.; BRINATTI, A.M.; ROSA, J.A.; CASSARO, F.A.M.; PIRES, L.F. Soil organic matter humification under different tillage managements evaluated by Laser Induced Fluorescence (LIF) and C/N ratio. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 11, p. 231–235, 2011.

MILORI, D. M. B. P.; GALETI, H. V. A.; MARTIN-NETO, L.; DIEKOW, J.; GONZÁLEZPÉREZ, M.; BAYER, C.; SALTON, J. Organic matter study of whole soil sample using laser induced fluorescence spectroscopy. **Soil Science Society American Journal**, v. 70, p. 57-63, 2006.

MINERVINO, A.H.H.; CARDOSO, E.C.; ORTOLANI, E.L. Características do sistema produtivo da pecuária no município de Santarém, Pará. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 38, n. 1, p. 11-16, 2008.

MIRANDA R. R.; SILVA M. A. P. Das agroestratégias aos eixos territoriais do agronegócio no estado do Pará. Boletim DATALUTA n. 99. 2016.

MONTERO, L. L. Carbono em solos de cerrado: efeitos do uso florestal. 2008. 130 p. Tese (Doutorado em Ecologia) - Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

MORAES, J.F.L.; NEILL, C.; VOLKOFF, B.; CERRI, C.C.; LIMA, V.C.; STEUDLER, P.A. Soil carbon and nitrogen stocks following forest conversion to pasture in the Western Brazilian Amazon Basin. ActaScientiarum, Maringá, v. 24, n. 5, p.1369-1376, 2002.

MORAES, M.F.; OLIVEIRA, G.C.; KLIEMANN, H.J.; SEVERIANO, E.C.; SARMENTO, P.H.L.; NASCIMENTO, M.O. Densidade e porosidade do solo como diagnóstico do estado de degradação de solos sob pastagens na região dos Cerrados. In: SIMPÓSIO NACIONAL SOBRE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, Belo Horizonte. Água e biodiversidade: anais. Belo Horizonte: SOBRADE, 2002. p. 256-258, 2002,

MUNIZ, A. W.; CORRÊA, R. B.; FONTES, J. R. A.; OLIVEIRA, I. J. de Acúmulo de carbono orgânico no sistema de plantio direto de milho no Amazonas. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental. Embrapa Amazônia Ocidental. Circular técnica, 48. 2015.

NEPSTAD, D.C.; CARVALHO, C.R.; DAVIDSON, E.A.; JIPP, P.H.; LEFEBVRE, P.; NEGREIROS, G.H.; SILVA, E.D.; STONE, T.A.; TRUMBORE, S.E.;VIEIRA, S.The role of deep roots in the hydrological and carbon cycles of Amazonian forests and pastures. Nature, London, v. 372, p. 666-669, 1994.

NERES A. T.; PEREIRA I. C. N. Análise da dinâmica da paisagem em Belterra (PA) no contexto da agricultura mecanizada: mudanças e processos. In: X ENCONTRO DA ECOECO. 2013

NOBRE, C.A.; GASH, J. Desmatamento muda clima da Amazônia. Ci. Hoje, 22:33-42. 1997.

OLIVEIRA JUNIOR, R. C. de; SOUSA NETO, T. L. de; TAKETOMI, Y. C.; OLIVEIRA, D. R. de; SOUSA, D. B. de; TANABE, C. S. Quantificação de restos culturais e concentração de nutrientes na cultura do milho no Município de Belterra/PA. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 35. Natal. O solo e suas múltiplas funções: anais. Natal: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2015.

OLIVEIRA JÚNIOR, R.C.; CORREA, J.R.V. Caracterização dos solos do município de Belterra, Estado do Pará. EMBRAPA Amazônia Oriental, Belém. n. 88, p. 39, 2001.

OLIVEIRA, C. M.; SANTANA, A. C. A governança no Arranjo Produtivo de Grãos de Santarém e Belterra, Estado do Pará: uma análise a partir do grão soja. RESR, Piracicaba-SP. vol. 50, n. 4, p. 683-704. 2012.

OLIVEIRA, C. M.; SANTANA, A. C. Competitividade das Empresas no Arranjo Produtivo Local de Grãos em Santarém e Belterra/Pará. Desenvolvimento em Questão. 14, n. 34, p. 351-382. 2016.

OLIVEIRA, C.M.; SANTANA, A.C.; HOMMA, A.K.O. Os custos de produção e a rentabilidade da soja nos municípios de Santarém e Belterra, estado do Pará. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 43, n. 1, p. 23-31, 2013.

OLIVEIRA, D.C. **Potencial de sequestro de carbono no solo e dinâmica da matéria orgânica em pastagens degradadas no Brasil**. 2018. 76 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2018.

PORTUGAL, A. F. et al. Determinação de estoques totais de carbono e nitrogênio e suas frações em sistemas agrícolas implantados em argissolo vermelho-amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 5, p. 2091-2100, 2008.

REICHARDT, K.; TIMM, L.C. **Solo, planta e atmosfera**: conceitos, processos e aplicações. Barueri: Manole, 2004. 478 p.

ROSA, A.H.; SIMÕES, M.L.; OLIVEIRA, L.C.; ROCHA, J.C.; MARTIN NETO, L.; MILORI, D.P. Multimethod study of the degree of humification of humic substances extracted from different tropical soil profiles in Brazil's Amazonian region. **Geoderma**, Amsterdam, v. 127, p. 1-10, 2005.

ROSA, M.E.C.; OLSZEVSKI, N.; MENDONÇA, E.S.; COSTA, L.M.; CORREIA, J.R. Formas de carbono em Latossolo Vermelho Eutroférrico sob plantio direto no sistema biogeográfico do Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 911-923, 2003.

SALES, A.; SILVA, A. R.; VELOSO, C. A. C.; CARVALHO, E. J. M.; MIRANDA, B. M. Carbono orgânico e atributos físicos do solo sob manejo agropecuário sustentável na Amazônia Legal. Colloquium Agrariae, v. 14, n.1, Jan-Mar. p.01-15. 2018.

SALTON, J. C.; MERCANTE, FABIO. M.; TOMAZI, M.; ZANATTA, J. A.; CONCENÇO, G.; SILVA, W. M.; RETORE, M. Integrated crop-livestock system in tropical Brazil: Toward a sustainable production system. Agriculture, Ecosystems & Environment, 190: 70-79. 2014.

SANTOS, R.S.M. dos; OLIVEIRA, I.P. de; MORAIS, R.F. de; URQUIAGA, S.C.; BODDEY, R.M.; ALVES, B.J.R. Componentes da parte aérea e raízes de pastagens de *Brachiaria* spp. em diferentes idades após a reforma, como indicadores de produtividade em ambiente de Cerrado. Pesquisa Agropecuária Tropical, Goiânia, v.2, p.119-124, 2007.

SILVA, F.D.; AMADOB, T.J.C.; FERREIRA, A.O.; ASSMANNC, J.M.; ANGHINONID, I.; CARVALHO, P.C.F. Soil carbon indices as affected by 10 years of integrated crop–livestock production with different pasture grazing intensities in Southern Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 190, p. 60–69, 2014.

SILVA, J.; RESCK, D.V.S.; CORAZZA, E.E.J.; VIVALDI, L.; Carbon storage in clayeyOxisol cultivated pastures in the “Cerrado” region Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 103, p. 357–363, 2004.

SILVA, L. S.; CAMARGO, F. A. O.; CARETTA C. A. Composição da fase sólida orgânica do solo. In: MEURER, E. J. **Fundamentos de química do solo**. 5ª ed. Porto Alegre: Evangraf. cap. 3. p. 61-70. 2012

SILVA,T. P.; NUNES, M. C. M.; LIMA, C. L. R.; BRUM, R.; PAIVA, L. S. B.; FISCHER, L. O. Qualidade estrutural de um Argissolo ermelho-amarelo sob diferentes usos no bioma pampa no Sul do Brasil. Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável, v.8, n.2, p.115-123, Junho, 2018.

Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG). Disponível em: <http://seeg.eco.br/o-que-e-o-seeg/>. Acesso em: 3 dez. 2018

SOUSA NETO, T. L. de; TAKETOMI, Y. C.; OLIVEIRA JUNIOR, R. C. de; OLIVEIRA, D. R. de; GALLO, J.; TANABE, C. S.; MARTINS, I. C. T.; SILVA, A. D. da. Quantificação de restos culturais e concentração de nutrientes na cultura do milho no Município de Belterra/PA. **Espaço Científico**. Santarém. v. 14, p. 60-68, 2013.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. 918 p.

TOGNON, A.A.; DEMATTÊ, J.L.I.; DEMATTÊ, J.A.M. Teor e distribuição da matéria orgânica em latossolos das regiões da floresta amazônica e dos cerrados do Brasil Central. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 55, p. 343-354, 1998.

TOWSEND, C. R.; COSTA, N. L.; PEREIRA, R. G. A. Aspectos econômicos da recuperação de pastagens no Bioma Amazônia. **Amazônia Ci. & Desenvolv**., Belém, v.5, n. 10. 2010

TRUMBORE, S.; BRANDO, P.; HARTMANN, H. Forest health and global change. **Science**, Washington, DC, v. 349, p. 814–818, 2015.

TRUMBORE, S.E.; DAVIDSON, E.A.; CAMARGO, P.B. de; NEPSTAD, D.C.; MARTINELLI, L.A. Belowground cycling of carbon in forest and pastures of Eastern Amazonia. **Global Biogeochem Cycles**, Washington, DC, v. 9, n. 4, p. 515–528, 1995.

VENTURIERI A.; COELHO A. S.; THALES M. C.; BACELAR M. D. R. Análise da expansão da agricultura de grãos na região de Santarém e Belterra, oeste do estado do Pará. Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianopolis, Brasil. p. 8. 2007.

VIEIRA, L.S. Os solos do Estado do Pará. Belém: Instituto do Desenvolvimento Econômico Social do Pará, 175 p. 1971.

ZINN, Y.L.; LAL, R.; RESCK, D.V.S. Changes in soil organic carbon stocks under agriculture in Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 84, p. 28–40, 2005.