

**JANAÍNA DE MOURA OLIVEIRA**

**CARBONO NO SOLO EM SISTEMAS INTEGRADOS DE  
PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA NO CERRADO E NA TRANSIÇÃO  
CERRADO - AMAZÔNIA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, da Universidade Federal de Goiás, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Agronomia, área de concentração: Solo e Água.

Orientadora:

**Dra. Beáta Emöke Madari**

Co-orientadores:

**Dra. Flávia Aparecida de Alcântara**

**Dr. Luiz Fernando Carvalho Leite**

Goiânia, GO ó Brasil  
2015

Ficha catalográfica elaborada automaticamente  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a), sob orientação do Sibi/UFG.

Moura Oliveira, Janaina

CARBONO NO SOLO EM SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO  
AGROPECUÁRIA NO CERRADO E NA TRANSIÇÃO CERRADO -  
AMAZÔNIA [manuscrito] / Janaina Moura Oliveira. - 2015.  
90 f.: il.

Orientador: Profa. Dra. Beáta Emöke Madari; co-orientadora Dra.  
Flávia Aparecida de Alcântara; co-orientador Dr. Luiz Fernando  
Carvalho Leite.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de  
Agronomia (EA) , Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Goiânia,  
2015.

Bibliografia.

Inclui gráfico, tabelas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. sistema de integração lavoura-pecuária. 2. sistema de integração  
lavoura-pecuária-floresta. 3. estoque de carbono. 4. modelo de dinâmica  
de carbono CQESTR. 5. calibração. I. Emöke Madari, Beáta, orient. II.  
Aparecida de Alcântara, Flávia, co-orient. III. Título.

## TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR AS TESES E DISSERTAÇÕES ELETRÔNICAS (TEDE) NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

**1. Identificação do material bibliográfico:**       Dissertação       Tese

### 2. Identificação da Tese ou Dissertação

Autor (a):	Janaina de Moura Oliveira				
E-mail:	janainamouraol@gmail.com				
Seu e-mail pode ser disponibilizado na página?	<input type="checkbox"/> Sim		<input checked="" type="checkbox"/> Não		
Vínculo empregatício do autor					
Agência de fomento:	Capes			Sigla:	
País:	Brasil	UF:	GO	CNPJ:	
Título:	CARBONO NO SOLO EM SISTEMAS DE INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGRÍCOLA NO CERRADO E NA TRANSIÇÃO CERRADO/AMAZÔNIA				
Palavras-chave:					
Título em outra língua:					
Palavras-chave em outra língua:					
Área de concentração:	Solo e Água				
Data defesa: (26/06/2015)					
Programa de Pós-Graduação:	em Agronomia (PPGA/UFG)				
Orientador (a):	Dra. Beáta Emöke Madari				
E-mail:					
Co-orientador (a):*	Flávia A. Alcântara e Luiz F. C. Leite				
E-mail:					

\*Necessita do CPF quando não constar no SisPG

### 3. Informações de acesso ao documento:

Concorda com a liberação total do documento  SIM       NÃO<sup>1</sup>

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF ou DOC da tese ou dissertação.

O sistema da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações garante aos autores, que os arquivos contendo eletronicamente as teses e ou dissertações, antes de sua disponibilização, receberão procedimentos de segurança, criptografia (para não permitir cópia e extração de conteúdo, permitindo apenas impressão fraca) usando o padrão do Acrobat.

\_\_\_\_\_  
Assinatura do (a) autor (a)

Data: \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_

<sup>1</sup> Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

**JANAINA DE MOURA OLIVEIRA**

**CARBONO NO SOLO EM SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO  
AGROPECUÁRIA NO CERRADO E NA TRANSIÇÃO CERRADO - AMAZÔNIA**

Dissertação DEFENDIDA E APROVADA em 26 de Junho de 2015, pela Banca Examinadora constituída pelos membros:

---

Dra. Beáta Emöke Madari  
Presidente ó Embrapa Arroz e Feijão

---

Prof. Dr. Cimélio Bayer  
Membro ó Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul

---

Dr. Paulino Ribeiro Villas-Boas  
Membro ó Embrapa Instrumentação  
Agropecuária

---

Prof. Dr. Wilson Mozena Leandro  
Membro ó Universidade Federal de Goiás

---

Dr. Luís Fernando Stone  
Membro ó Embrapa Arroz e Feijão

*Por que o planeta terra parece mais o  
trabalho de um estagiário relaxado do que  
o produto de uma consciência superior,  
toda poderosa e sábia?*

*George Carlin*

À  
*Antônio Martins de Oliveira;  
Sônia Maria de Moura Oliveira;  
Eleuza da Silva Borges;  
Wellington Moura de Oliveira; e  
Jairo Augusto de Oliveira Peres,*

*Dedico*

## AGRADECIMENTOS

*Agradeço à Deus, pela vida...*

*Agradeço à UFG, pela oportunidade de cursar o doutorado.*

*Embrapa e Agricultural Research Service (ARS-USDA), pelo apoio em forma de recursos financeiro, estrutural e humano recebidos.*

*À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior ó CAPES ó pelas bolsas de estudo concedidas para os cursos de doutorado e doutorado sanduíche.*

*Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico ó CNPq ó pelo apoio financeiro para o desenvolvimento do trabalho de pesquisa.*

*À Dra. Beáta E. Madari, pela oportunidade de cursar o doutorado sob sua orientação, pelo incentivo, confiança, competência e profissionalismo na realização deste trabalho e, principalmente, por me instigar a dar sempre o melhor de mim.*

*À Dra. Hero Gollany, por me receber para o doutorado sanduíche, me apoiar, pelos ricos ensinamentos e o espírito de avançar sempre.*

*Ao Dr. Luiz F. Carvalho Leite, pela colaboração inicial ao meu doutorado sanduíche.*

*Ao Laboratório de Física e Química do solo e seus integrantes (Adilson, Sílvio e Roberto e Diego) pelas análises realizadas. Em especial ao Wesley Gabriel de Oliveira Leal, pelas análises, ensinamentos, companhia e momentos de descontração no laboratório.*

*Ao Wayne Polumsky, pela imensa colaboração durante o trabalho no ARS-USDA.*

*À Dra. Flávia Aparecida de Alcântara, por todo apoio durante as coletas e palavras de incentivo em todo este período.*

*Ao departamento de apoio da Embrapa, na pessoa do Romildo, do Tucura e do Marcelo, pelo auxílio nas coletas de amostras.*

*Aos colegas de curso, Aniele Lemes, Fabrício Salgado, Glaucilene Carvalho, Paula Camylla, em especial à Sinnara Godoy, pelos ótimos momentos de convívio, pela amizade, por estarem comigo...*

*À minha família, pelo apoio incondicional, me incentivando sempre nesta jornada para a obtenção do título de doutora, especialmente aos meus pais, Antônio e Sônia, meus irmãos, Welington e Eleuza, não podendo esquecer a vovó Zita e tia Fiuca*

*(Ambrósia) pelo apoio com as amostras. Valeu, gente!!!*

*Ao meu namorado, noivo, amigo, companheiro de todos os momentos, Jairo Augusto, por tudo! Compreensão, ajudas, apoio físico e psicológico de sempre.*

*O meu muito obrigada!!!*

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>7</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>8</b>
<b>RESUMO GERAL.....</b>	<b>10</b>
<b>GENERAL ABSTRACT .....</b>	<b>11</b>
<b>1 INTRODUÇÃO GERAL.....</b>	<b>12</b>
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>14</b>
2.1 A EXPANSÃO AGRÍCOLA NO CENTRO-OESTE DO BRASIL.....	14
2.2 AS ãNAMASö PROMETIDAS PELO BRASIL E O PLANO ABC .....	16
2.3 SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA.....	17
2.3.1 Sistema de integração lavoura-pecuária.....	18
2.3.2 Sistema de integração lavoura-pecuária-floresta.....	20
2.4 MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO.....	21
2.4.1 Uso da técnica do <sup>13</sup> C aplicada a estudos da dinâmica de matéria orgânica do solo.....	22
2.4.2 Uso de modelos matemáticos para estudos da dinâmica do carbono orgânico do solo.....	24
2.5 REFERÊNCIAS .....	29
<b>3 ASSINATURA ISOTÓPICA E ESTOQUES DE CARBONO EM UM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO EM SISTEMAS DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA NA ZONA DE TRANSIÇÃO CERRADO-AMAZÔNIA .....</b>	<b>37</b>
3.1 INTRODUÇÃO.....	38
3.2 MATERIAL E MÉTODOS .....	41
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	49
3.4 CONCLUSÕES .....	61
3.5 REFERÊNCIAS .....	62
<b>4 MODELAGEM DA DINÂMICA DO CARBONO ORGÂNICO DO SOLO EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA NO CERRADO BRASILEIRO COM O MODELO CQESTR.....</b>	<b>67</b>
4.1 INTRODUÇÃO.....	68
4.2 MATERIAL E MÉTODOS .....	70
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	77
4.4 CONCLUSÕES .....	85
4.5 REFERÊNCIAS .....	85
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>90</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 3.1.</b> Fertilidade do solo, média e erro padrão (EP), para as camadas de Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, Fazenda Gamada, Nova Canaã do Norte, MT.....	46
<b>Tabela 3.2.</b> Teor médio de argila nas camadas 0,0-0,3 e 0,0-1,0 m do Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta e pastagem contínua degradada em Nova Canaã do Norte, MT.....	49
<b>Tabela 3.3.</b> Densidade média das camadas do Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta e pastagem contínua degradada em Nova Canaã do Norte, MT.....	50
<b>Tabela 3.4.</b> Razão isotópica ( $^{13}\text{C}$ (‰) ) de tecidos vegetais com indicação do provável ciclo fotossintético e relação C:N dos tecidos vegetais em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta e pastagem degradada em Nova Canaã do Norte, MT .....	51
<b>Tabela 3.5.</b> Razão isotópica ( $^{13}\text{C}$ ) por camada do Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta e pastagem contínua degradada em Nova Canaã do Norte, MT .....	55
<b>Tabela 3.6.</b> Estoque de carbono corrigido para massa equivalente de solo para as camadas 0,0-0,3 e 0,0-1,0 m em Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta e pastagem contínua degradada em Nova Canaã do Norte, MT.....	59
<b>Tabela 4.1.</b> Sequência dos ciclos de culturas e pastejo do Piquete 4 (P4) e Piquete 5 (P5), sob sistema integração lavoura-pecuária em Santo Antônio de Goiás, Goiás, Brasil (1990-2015).....	73
<b>Tabela 4.2.</b> Principais características químicas do Latossolo Vermelho acriférico típico, carbono orgânico do solo (COS) e textura do solo na camada superficial (0,0-0,1 m), amostras para os dois piquetes sob sistema de integração lavoura-pecuária sob manejo diferenciado e vegetação nativa adjacente em Santo Antônio de Goiás, Goiás, Brasil .....	74
<b>Tabela 4.3.</b> Estoques de carbono orgânico do solo, variação e taxa observada para as áreas integração lavoura-pecuária no Piquete 4 (P4) e Piquete 5 e para os cenários de manejo, P4 sob plantio convencional (P4 (PC)); soja seguida por milho ôsafrinhaõ sob plantio direto (Soja-MS (PD)); soja e milho semeados como cultura de verão sob plantio direto (Soja/Milho (PD)); e soja e milho semeados como cultura de verão sob plantio convencional (Soja/Milho (PC)), para a camada de 0,0-0,1 m num Latossolo Vermelho acriférico típico de textura argila (Santo Antônio de Goiás, GO, Brasil).....	84

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 3.1.** Esquema dos módulos de amostragem nas áreas de integração lavoura-pecuária-floresta (iLPF) com renques de uma e de três linhas de árvores (a); esquema da amostragem na área de referência pastagem convencional contínua (b)..... 43
- Figura 3.2.** Esquema das trincheiras de amostragem dentro de cada módulo amostral para iLPF com renques de uma linha de árvores (a); e para iLPF com renques de três linhas de árvores (b)..... 44
- Figura 3.3.** Razão isotópica  $^{13}\text{C}$  de uma pastagem degradada e áreas sob manejo de integração lavoura-pecuária-floresta (iLPF) com 1 linha de árvores de eucalipto por renque (a), amostrados na linha das árvores (iLPF1-L), a 2,5; 5 e 10 m de distância do renque e iLPF com 3 linhas de árvores de eucalipto por renque (b), amostrados na linha central de árvores (iLPF3-LC), na linha externa (iLPF3-LE), a 3, 6 e 9 m de distância da linha externa das árvores do renque, em Nova Canaã do Norte, MT. As barras de erro indicam o erro padrão. .... 53
- Figura 3.4.** Estoque de C corrigido para massa equivalente de solo para as camadas de 0,0-0,3 e 0,0-1,0 m, em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta com 1 linha de árvores de eucalipto por renque (iLPF1), amostrados na linha de árvores (iLPF1-L), a 2,5 (iLPF1-2,5); 5 (iLPF1-5) e 10 (iLPF1-10) metros de distância do renque e com 3 linhas de árvores de eucalipto por renque (iLPF3), amostrados na linha central de árvores (iLPF3-LC), na linha externa (iLPF3-LE) a 3 (iLPF3-3), 6 (iLPF3-6) e 9 (iLPF3-9) metros de distância do renque, em Nova Canaã do Norte, MT. Os valores são médias (n=5). As médias do iLPF foram comparadas, pelo teste T, correção de Bonferroni, à Pastagem. \*p = 0,05, \*\*p = 0,01, \*\*\*p = 0,0001, NS = diferença não significativa. .... 57
- Figura 3.5.** Estoque de N corrigido para massa equivalente de solo para as camadas de 0,0-0,3 e 0,0-1,0 m, em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta com 1 linha de árvores de eucalipto por renque (iLPF1), amostrados na linha de árvores (iLPF1-L), a 2,5 (iLPF1-2,5); 5 (iLPF1-5) e 10 (iLPF1-10) metros de distância do renque e com 3 linhas de árvores de eucalipto por renque (iLPF3), amostrados na linha central de árvores (iLPF3-LC), na linha externa (iLPF3-LE) a 3 (iLPF3-3), 6 (iLPF3-6) e 9 (iLPF3-9) metros de distância do renque, em Nova Canaã do Norte, MT. Os valores são médias (n=5). As médias do iLPF foram comparadas, pelo teste T, correção de Bonferroni, à Pastagem. \*p = 0,05, \*\*p = 0,01, \*\*\*p = 0,0001, NS = diferença não significativa. .... 59
- Figura 3.6.** Relação entre os teores de carbono (C) e nitrogênio (N) nas camadas 0,0-0,3 e 0,0-1,0 m do Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, nas áreas sob sistema de integração lavoura-pecuária-floresta com 1 linha de árvores de eucalipto por renque (iLPF1), sob sistema de integração lavoura-pecuária-floresta com 3 linhas de árvores de eucalipto por renque (iLPF3) e pastagem..... 60
- Figura 4.1.** Localização da floresta decídua (área sob vegetação nativa de referência) e

- do Piquete 4 (P4) e Piquete 5 (P5) sob sistema de integração lavoura-pecuária em Santo Antônio de Goiás, Goiás, Brasil..... 72
- Figura 4.2.** Estoque de carbono orgânico do solo (COS) simulado e observado para as camadas 0,0-0,1 e 0,1-0,3 m para o Piquete 5 num Latossolo Vermelho acriférico típico de textura argila, em sistema de integração lavoura-pecuária em Santo Antônio de Goiás, GO, Brasil. As setas representam o COS da floresta (inicial). ..... 79
- Figura 4.3.** Estoque de carbono orgânico do solo (COS) simulado e observado para as camadas 0,0-0,1 e 0,1-0,3 m para o Piquete 4 num Latossolo Vermelho acriférico típico de textura argila, em sistema de integração lavoura-pecuária em Santo Antônio de Goiás, GO, Brasil. As setas representam o COS da floresta (inicial). ..... 80
- Figura 4.4.** Regressão linear de dados observados e simulados de carbono orgânico do solo nas camadas 0,0-0,1 e 0,1-0,3 m para o Piquete 4 e o Piquete 5 num Latossolo Vermelho acriférico típico de textura argila, em sistema de integração lavoura-pecuária em Santo Antônio de Goiás, GO, Brasil. MSD: *Mean Square Deviation* ou quadrado médio dos desvios; SB: *Squared bias* ou viés quadrado; NU: *Non-unity slope* ou inclinação não unitária; e LC: *Lack of correlation* ou falta de correlação..... 82
- Figura 4.5.** Estoque de carbono orgânico simulado para sistemas de integração lavoura-pecuária Piquete 4 (P4) e Piquete 5 (P5) e quatro cenários de manejo, P4 sob plantio convencional (P4 (PC)); soja seguida por milho *safrinha* sob plantio direto (Soja-MS (PD)); soja e milho semeados como cultura de verão sob plantio direto (Soja/Milho (PD)); e soja e milho semeados como cultura de verão sob plantio convencional (Soja/Milho (PC)), para a camada de 0,0-0,1 m em Latossolo Vermelho acriférico típico de textura argila (Santo Antônio de Goiás, GO, Brasil)..... 83

## RESUMO GERAL

OLIVEIRA, J. M. **Carbono no solo em sistemas integrados de produção agropecuária no Cerrado e na transição Cerrado - Amazônia**. 2015. 90 f. Tese (Doutorado em Agronomia: Solo e Água) ó Escola de Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.<sup>1</sup>

Os sistemas de integração lavoura-pecuária (iLP) e integração lavoura-pecuária-floresta (iLPF) são apontados como potenciais acumuladores de carbono no solo. Entretanto, ainda há poucos estudos científicos que avaliaram a real contribuição desses sistemas de produção. O presente trabalho incluiu dois estudos para avaliação desses sistemas. O primeiro teve por objetivo avaliar a acumulação e a origem do carbono do solo em iLPF na região de transição dos biomas Cerrado-Amazônia; e o segundo estudo teve por objetivo calibrar e validar o modelo CQESTR para o ecossistema Cerrado bem como avaliar o efeito de práticas de manejo do solo, incluindo iLP e vários cenários no carbono orgânico do solo (COS) ao longo do tempo. Para o primeiro estudo foram selecionadas duas áreas sob iLPF (iLPF1 e iLPF3, sistemas com uma linha e três linhas de *Eucalyptus urograndis* por renque, respectivamente) cultivadas nesse sistema desde 2009 e uma pastagem no município de Nova Canaã do Norte, MT. Amostras de oito camadas (0,0-1,0 m) foram tomadas para avaliação da densidade, textura, teor de C e N total e <sup>13</sup>C. O segundo estudo foi conduzido no bioma Cerrado, em área que vem sendo manejada em iLP desde 2000. Foram avaliadas duas áreas, os Piquete 4 (P4) e Piquete 5 (P5). A densidade do solo e o teor de matéria orgânica foram determinados para as camadas 0,0-0,1 e 0,1-0,3 m. O CQESTR é um modelo de simulação de C baseado em processos que simula o efeito do clima, rotações de cultura e práticas de manejo no COS. O modelo foi calibrado com dados do P5 e validado com P4. Seu desempenho foi avaliado usando análise estatística de regressão e o desvio médio quadrático (MSD). No primeiro estudo, a composição isotópica do solo e os estoques de C foram afetados pela implantação do sistema iLPF. O componente florestal foi importante fator na acumulação de C em ambas as áreas sob iLPF. O N pode ser um fator limitante para a acumulação de C. Conclui-se que o iLPF afeta os estoques de C e N do solo no curto prazo, entretanto, novas avaliações com maior tempo de implantação do iLPF poderiam auxiliar na elucidação do comportamento desses elementos no sistema em longo prazo. No segundo estudo, a calibração do modelo foi realizada pelo ajuste do coeficiente da taxa de decomposição básica. Os valores simulados e medidos foram significativamente correlacionados com um MSD de 2,11, indicando que o modelo capturou satisfatoriamente a dinâmica temporal do COS na camada superficial. Entretanto, o CQESTR subestimou o COS para a camada subsequente 0,1-0,3 m, provavelmente devido às diferenças na biomassa e distribuição de raízes de gramíneas de clima tropical e temperado. Calibração adicional é requerida para melhorar a predição do COS e processos de estabilização nas camadas subsuperficiais de solos tropicais. Para a camada 0,0-0,1 m, em longo prazo (20 anos), o modelo simulou acumulação de C em iLP e decréscimo de C em sistema de produção com sucessão soja/milho, tanto sob plantio direto quanto preparo convencional em condições do Cerrado.

*Palavras-chave:* sistema de integração lavoura-pecuária, sistema de integração lavoura-pecuária-floresta, estoque de carbono, modelo de dinâmica de carbono CQESTR, calibração, validação.

---

<sup>1</sup> Orientadora: Dr<sup>a</sup>. Beáta Emöke Madari. Embrapa Arroz e Feijão.

## GENERAL ABSTRACT

OLIVEIRA, J. M. **Soil carbon under integrated agricultural production systems in the Brazilian savannah (Cerrado) and in the Cerrado-Amazon transition zone.** 2015. 90 f. Thesis (Doctor in Agronomy: Soil and Water) ó Escola de Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.<sup>1</sup>

Integrated crop-livestock (iCL) and integrated crop-livestock-forest (iCLF) systems are pointed out as potential soil carbon sinks. However, there are few scientific studies that evaluated the real contribution of these production systems. This work included two studies. The first was to evaluate soil carbon accumulation and its origin in iCLF in the transition zone of the Cerrado-Amazon biomes; the second aimed to calibrate and validate the CQESTR model for the Cerrado ecosystem and to evaluate the effect of soil management practices, including iCL and various scenarios on soil organic carbon (SOC) over time. For the first study two areas under iCLF (iCLF1 and iCLF3, with one and three rows of *Eucalyptus urograndis* by hedgerow, respectively) were selected. They were cultivated in this system since 2009 in Nova Canaã do Norte, MT. A continuous pasture was used as reference. Soil samples were taken from eight layers (0.0 to 1.0 m) for the evaluation of the bulk density, texture, total C and N and <sup>13</sup>C. The second study was conducted in the Cerrado biome. The evaluated areas (Paddock 4 - P4 and Paddock 5 - P5 has been being managed in iCL since 2000. Bulk density and the organic matter content were determined for the 0.0-0.1 and 0.1-0.3 m layers. The CQESTR is a process based model which simulates the effect of climate, crop rotation and tillage management practices on SOC. The model was calibrated with P5 data and validated with P4 data. Its performance was evaluated using statistical regression analysis and the root mean square deviation (MSD). For the first study, the soil C stocks and isotopic composition were affected by the implementation of the iCLF system. The forest component was an important factor for soil C accumulation for both areas under iCLF. The N can be a limiting factor for C accumulation. We concluded that iCLF affected soil C and N stocks in the short term, however, longer iCLF deployment time would be necessary to elucidate the impact of iCLF in the long-term. In the second study model calibration was performed by adjusting the basic decomposition rate coefficient. The measured and simulated values were significantly correlated with an MSD of 2.11, indicating that the model captured spatial-temporal dynamics of SOC in the topsoil. However, CQESTR underestimated SOC for the 0,1-0,3 m layer, probably due to lack of site specific grass or crop root biomass and distribution data under tropical conditions. Additional calibration is required to improve prediction of SOC stabilization process in the subsoil layers of tropical soils. In the long term (20 years), for the superficial (0,0-0,1 m) soil layer, the model simulated C accumulation in iCL and C loss in soybean/corn grain production system independently of the use of zero-tillage or conventional tillage in either of these systems under Cerrado conditions.

*Key words:* integrated crop-livestock system, integrated crop-livestock-forest system, soil carbon stock, soil carbon model CQESTR, calibration, validation.

---

<sup>1</sup> Adviser: Dr<sup>a</sup>. Beáta Emöke Madari. Embrapa Rice and Beans.

# 1 INTRODUÇÃO GERAL

O ciclo global do carbono (C) tem sido alterado pelas atividades antrópicas, entre essas se destaca a conversão de florestas em pastagens ou áreas de cultivo, levando à emissão de C atmosférico (Lal, 2008). Muitas dessas áreas convertidas para uso em agropecuária recebem manejo inapropriado, levando a perdas significativas da capacidade produtiva, o que acarreta em redução da renda obtida na atividade e leva à emissão de gases de efeito estufa.

Visando melhorar a capacidade produtiva dos solos degradados devido ao manejo inadequado, foram desenvolvidos e vem sendo aprimorados alguns sistemas produtivos, entre eles a integração lavoura-pecuária (iLP) e a integração lavoura-pecuária-floresta (iLPF). A iLP consiste na diversificação da produção agropecuária pela rotação, consorciação ou sucessão das atividades agrícolas e pecuárias na propriedade. Já a iLPF baseia-se no cultivo de espécies arbóreas intercaladas com áreas destinadas ao cultivo de grãos e, posteriormente, à criação de gado. Em ambos os sistemas, a alternância de ciclos pode ser realizada em períodos determinados pelos objetivos do produtor. Tais sistemas, por serem diversificados, conferem maior segurança econômica ao produtor, e ainda resultam em benefícios aos diferentes componentes do sistema, pelo possível sinergismo entre eles, culminando em melhor aproveitamento dos recursos empregados na atividade.

Na iLP e iLPF o aporte de C ao solo pelos resíduos vegetais, tanto acima como abaixo do solo, ocorre de maneira distinta daquela observada nos demais sistemas agrícolas, em que não há o componente animal (Souza et al., 2009; Bayer et al., 2011). A iLP e a iLPF têm sido apontadas como sistemas promissores para conservação do solo e mitigação do efeito estufa no Brasil (Andrade et al., 2010; Urquiaga et al., 2010a; Silva et al., 2011). Entretanto, uma vez que esses sistemas podem ser instalados em diversas ecorregiões, com diferentes arranjos e espécies florestais e incluir os mais variados esquemas de rotação e manejo, quando de seu uso e aplicação é necessário cautela, pois esses fatores são de grande influência no conteúdo de C e na taxa anual de sequestro desse elemento (Leite et al., 2010). Assim, tais sistemas devem ser mais bem estudados quanto aos benefícios na acumulação de C no solo.

Uma das formas de se avaliar o sequestro de C por dado sistema é pela avaliação da origem dos resíduos depositados no solo em longo prazo, principalmente em áreas onde a vegetação natural foi substituída por outra de diferente ciclo fotossintético, plantas de ciclo C3 por C4, por exemplo, com a utilização da técnica dos isótopos estáveis. Neste caso, sabendo-se a composição isotópica inicial do solo sob a vegetação nativa e na área cultivada, é possível calcular a quantidade de C derivado de plantas C3 e C4, o que é interessante em estudos de ciclagem do C no solo e de decomposição da matéria orgânica (Alves et al., 2006). Inferências sobre a vegetação predominante na área também são possíveis com o emprego da assinatura isotópica do solo.

Já a eficiência do sistema em acumular C ao longo do tempo pode ser medida por seu estoque no solo. Contudo, em função de variações na densidade, muitas vezes ocorrem superestimações em cálculos dos estoques de C que acabam por mascarar resultados de acumulação desse elemento em solos. Assim, para que diferentes sistemas de cultivo possam ser comparados eliminando o efeito da compactação do solo, é necessária a correção da massa de solo pela densidade. Frequentemente a avaliação do efeito de sistemas de manejo em atributos do solo, entre elas os estoques de C, é realizada por experimentos de longa duração. Contudo, essas avaliações fornecem uma visão pretérita que auxilia a tomada de decisão para o futuro.

Neste contexto, os modelos de C mostram-se úteis para a complementação desses experimentos na avaliação de cenários de manejo. Eles são ferramentas ágeis para testar o efeito de diferentes cenários de manejo no estoque de C do solo, auxiliando na compreensão da dinâmica do mesmo. Há vários modelos disponíveis e a escolha pelo modelo a ser utilizado em determinado estudo deverá considerar a complexidade, a quantidade de variáveis de entrada para alimentação do modelo e a acurácia almejada.

Portanto, o presente estudo objetivou avaliar modificações nos teores e estoques de C do solo promovidas pela implantação de sistema de integração lavoura-pecuária-floresta na transição dos biomas Cerrado e Amazônia, avaliando se há influência da linha de árvores na estimativa de acumulação de C no solo em perfil. E calibrar e validar o modelo CQESTR para simular o efeito de diferentes sistemas de produção, incluindo iLP, na dinâmica do carbono orgânico do solo (COS) e nos estoques de C para as condições de Cerrado. O modelo CQESTR (Rickman et al., 2001; Liang et al., 2009) foi escolhido devido à sua relativa simplicidade e à disponibilidade das variáveis de entrada.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 A EXPANSÃO AGRÍCOLA NO CENTRO-OESTE DO BRASIL**

O Centro-Oeste do Brasil ocupa parte dos biomas Cerrado e Amazônia. O bioma Cerrado é a segunda maior formação vegetal do país, ocupando aproximadamente 24% do território brasileiro (IBGE, 2004). O Cerrado faz limite com outros quatro biomas (Amazônia, Caatinga, Mata Atlântica e Pantanal) e possui alta diversidade de ambientes, o que reflete em elevada biodiversidade, com muitas espécies endêmicas. Entretanto, apesar de ser considerado um dos biomas mais ricos do mundo, é um dos mais ameaçados (Mma, 2011) principalmente pela pressão exercida pelo setor agrícola em demanda por novas áreas.

O bioma Cerrado apresenta variadas classes de solos, entre elas os Neossolos Litólicos (7,3%), Plintossolos (9%), Neossolos Quartzarênicos (15%), Argissolos (15%) e Latossolos (46%) (Oliveira, 2009). Essa última classe é caracterizada por solos altamente intemperizados, de baixa fertilidade química, porém, de boa qualidade física com forte microestruturação e rápida infiltração de água. Devido a essas características, os solos do bioma Cerrado representaram, por muito tempo, um entrave à expansão agrícola. Em meados de 1970, entretanto, devido ao desenvolvimento de tecnologias para a correção da fertilidade do solo (uso de fertilizantes sintéticos e calagem), o aumento do uso da mecanização, o aprimoramento de técnicas de cultivo e também por meio de vários programas estatais de incentivo à expansão agrícola, o Cerrado alcançou posição de destaque no cenário agrícola nacional e internacional, principalmente pela representatividade dos estados da região Centro-Oeste na produção agrícola do bioma. Essa região responde por aproximadamente 40% da produção de grãos, 34% do efetivo de bovinos e 19% da produção de energia (cana-de-açúcar) do país. (IBGE, 2013; Conab, 2015; IBGE, 2015).

O bioma Amazônia ocupa em torno de 49% do território brasileiro (IBGE, 2004), sendo a maior floresta tropical do mundo. Apresenta importante papel na regulação

térmica do planeta, além de ser importante para o regime de chuvas do Brasil e América Latina. Esse bioma possui enorme diversidade de fauna e flora, sendo muitas espécies endêmicas. A imponência e exuberância que a floresta Amazônica apresenta leva a crer que os solos da região sejam de alta fertilidade, entretanto, o equilíbrio do ecossistema, com elevada ciclagem de nutrientes, é que levou à formação e manutenção da mata. Os solos predominantes na região Norte do país, em que há predominância do bioma Amazônia, são os Latossolos, cobrindo em torno de 34% da região, Argissolos, representando 24% e Neossolos com 8% de ocorrência (Geobrasil, 2002). Historicamente a ocupação do bioma Amazônia tem sido baseada na derrubada da mata para extração de madeira, seguida pelo plantio de pastagens para criação extensiva de gado e pela agricultura (Rivero et al., 2009), sendo as pastagens, em geral, estabelecidas sem uso de adubação (Bernardi et al., 2002; Geobrasil, 2002). Tal modelo de uso e ocupação do solo na região amazônica conduziu ao rápido esgotamento dos recursos naturais (Nobre et al., 2013).

A região Centro-Oeste teve suas áreas historicamente utilizadas para a pecuária extensiva, entretanto, sofreu um processo de concentração fundiária com a incorporação de novas áreas em direção à fronteira agrícola ao norte de Mato Grosso (MT) (IBGE, 2012). Dados do Censo Agropecuário de 2006 demonstram que a expansão agrícola brasileira seguia o rumo da região Norte do país, com novas áreas sendo abertas no estado de MT. De acordo com IBGE (2012), ocorreu um deslocamento das áreas de pastagem plantada para a região Norte do país e houve aumento das áreas de lavoura em todo o país, aproximadamente 21% em relação ao Censo Agropecuário 1995-1996. A região Centro-Oeste apresentou a maior expansão de área agrícola (68,4%), tendo havido tanto transformação de áreas de pastagens para lavouras como de áreas de matas para áreas de pastagem ou de lavouras, com destaque para o estado do MT, cujo aumento foi de 2,98 milhões de hectares.

Esse estado apresenta a maior taxa anual de desmatamento acumulada, 13,83 milhões de ha, no período de 1988 a 2014. Considerando somente o período de 2002 a 2008, o MT teve um desmatamento de 4,75 milhões de ha do bioma Amazônia, que corresponde a aproximadamente 10% da área originalmente coberta pelo bioma (Prodes, 2014). Para o bioma Cerrado no estado o desmatamento foi de 1,76 milhões de ha, que corresponde a aproximadamente 5% da área originalmente coberta pelo bioma, para o mesmo período (MMA, 2011).

Segundo Coutinho (2009), a ocupação do território no estado de MT segue o mesmo padrão de expansão de fronteira agrícola do bioma Amazônia como um todo, culminando com o uso do solo para agricultura mecanizada e tecnificada. Esse processo é evidenciado pela escalada da produtividade ao longo dos anos para as principais culturas plantadas tradicionalmente no estado. De acordo com dados da Conab (2014), para as culturas de arroz, feijão de primeira, segunda e terceira safras, milho de verão, milho safrinha e soja houve aumento de produtividade variando de 100% a 846% no período de observação, que iniciou na safra de 1976/77 até os dias atuais.

## 2.2 AS ÕNAMASö PROMETIDAS PELO BRASIL E O PLANO ABC

As NAMAs (*õNationally Appropriate Mitigation Actionsö*, ou Ações de Mitigação Nacionalmente Apropriadas) representam o conjunto de ações voluntárias assumidas pelo Brasil durante a 15ª Conferência das Partes (COP 15). Tal conjunto de ações foi ratificado no artigo 12º da Lei 12.187/2009 e visa a redução do total das emissões de gases de efeito estufa (GEE) do país projetadas para o ano de 2020 em entre 36,1% e 38,9%. Isso significa uma redução das emissões nacionais com 1.168 a 1.259 milhões de Mg CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2</sub> eq). Na projeção inicial para 2020, 22,5% das emissões originam-se no setor agropecuário (Mapa & MDA, 2012), entretanto, em 2010 esse setor respondeu por 35% das emissões de CO<sub>2</sub> eq, ocupando a posição de maior fonte de emissões daquele ano (MCTI, 2013). Porém, no ano de 2012 o setor passou a responder por 37% das emissões e dividir a primeira posição no ranking com o setor de energia (MCTI, 2014).

Para atingir as metas de redução foram criados planos estratégicos para cada setor da economia considerado grande emissor de CO<sub>2</sub> eq. Para o caso da agropecuária, foi estabelecido o Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura, ou simplesmente ÕPlano ABCö (Mapa & MDA, 2012).

Entre as metas e planos de ação do Brasil estão: reduzir em 80% a taxa de desmatamento na Amazônia e em 40% no Cerrado; adotar intensivamente a recuperação de pastagens atualmente degradadas, cuja meta é recuperar uma área de 15 milhões de hectares por meio do manejo adequado e adubação; promover a integração lavoura-pecuária (iLP), Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF) e os Sistemas Agroflorestais

(SAFs), aumentando a sua área em 4 milhões de ha; ampliar o uso do Sistema Plantio Direto (SPD) em 8 milhões de hectares e da Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN) em 5,5 milhões de hectares; ampliar a eficiência energética, o uso de bicompostíveis, a oferta de hidrelétricas e de fontes alternativas de biomassa, de energia eólica e de pequenas centrais hidrelétricas, assim como ampliar o uso de carvão de florestas plantadas na siderurgia por meio da expansão da área com Florestas Plantadas em 3,0 milhões de hectares; e ampliar o uso de tecnologias para tratamento de 4,4 milhões de m<sup>3</sup> de dejetos de animais para geração de energia e produção de composto orgânico; além de mecanismos para adaptação do setor agropecuário à mudança climática. Esse conjunto de medidas tem potencial para mitigação de 133,9 a 162,9 milhões Mg CO<sub>2</sub> eq.

## 2.3 SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA

A evolução dos sistemas produtivos ao redor do mundo primou pela especialização cada vez maior na busca pela eficiência produtiva. Como salientado por Vezzani & Mielniczuk (2011), sistemas com alto nível de especialização têm propriedades emergentes mais simples e em menor número, o que reduz sua capacidade de manter a integridade diante de perturbações. A vulnerabilidade dos sistemas especializados altamente produtivos, tanto no caso de culturas comerciais como de pastagens plantadas, em nível mundial, foi apontada por Lemaire et al. (2014). Essa vulnerabilidade mostra-se como reflexo da baixa resiliência ou inabilidade de adaptação a eventuais circunstâncias extremas, tanto ambientais como econômicas, dos sistemas muito especializados.

O fenômeno da especialização dos sistemas produtivos ocorreu não somente na produção de culturas comerciais como também na criação de animais. De acordo com Lemaire et al. (2014), o Brasil possui em torno de 117 milhões de ha de pastagens plantadas, das quais 70% pertencem ao gênero *Urochloa* spp. Estima-se que 50% a 70% das pastagens brasileiras apresentem sinais de degradação (Dias-Filho, 2014) e mais de 80% das áreas de pastagens degradadas estejam no Brasil Central (Balbino et al., 2012). Do mesmo modo, há várias áreas agrícolas com problemas relacionados à redução da produtividade ou aumento nos custos de produção, sejam eles devido aos problemas na qualidade química, física ou biológica do solo, ou atribuídos às mais variadas causas de manejo inadequado. Nestas condições, o COS é rapidamente perdido, levando a emissões de CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O e NO<sub>x</sub>.

A menor emissão de gases causadores de efeito estufa e o sequestro de C atmosférico estão entre os serviços ambientais que podem ser prestados pela atividade agropecuária (Urquiaga et al., 2010a; Loss et al., 2011; Salton et al., 2011). Além dos serviços ambientais, que são metas do pilar eficiência ambiental, a agropecuária moderna tem outros dois pilares, a eficiência econômica e produtiva. Essas poderão ser atingidas pela redução de custos em função do menor uso de insumos e diversificação das atividades agrícola e pecuária. Neste sentido, passa a ser bastante utilizado um novo conceito, a verticalização da produção agropecuária. A agropecuária experimentou a horizontalização da produção, em que a abertura de novas áreas viria a trazer incrementos na produção, entretanto, atualmente busca-se a verticalização. Nesse conceito, busca-se atingir os objetivos da agropecuária moderna, de ampliação da produção com reduzidos impactos ao ambiente.

Os sistemas integrados de produção como a iLP e iLPF são, usualmente, vistos como boas alternativas de sistemas de manejo agropecuário por intensificar ou verticalizar a produção e, ao mesmo tempo, diversificar, promovendo melhorias no ambiente em que são inseridos. Lemaire et al. (2014) ressaltam que os sistemas integrados de produção oportunizariam a captura de interações ecológicas entre os diferentes sistemas de uso da terra, oportunizando ecossistemas agrícolas mais eficientes na ciclagem de nutrientes, preservando os recursos naturais e do meio ambiente, melhorando a qualidade do solo e aumentando a biodiversidade.

### **2.3.1 Sistema de integração lavoura-pecuária**

Cultivos integrados, para produção de carne ou leite e grãos, existem desde o princípio da agricultura (Balbino et al., 2012; Kichel et al., 2012). Entretanto, com a especialização dos sistemas produtivos, essa técnica de cultivo perdeu espaço por longo período, retornando ao cenário agropecuário em função do crescente aumento das áreas degradadas, principalmente pastagens, que perderam sua capacidade de suporte. Os estudos e a transferência da tecnologia de recuperação de pastagens por meio do sistema iLP foram intensificados a partir da década de 1980 por instituições de ensino e pesquisa, entre elas a Embrapa.

De acordo com Vilela et al. (2011), a adoção do sistema iLP é realizada, basicamente, sob três circunstâncias: a) em áreas de pastagens degradadas, com o objetivo

de recuperar a produtividade dos pastos, por meio da introdução de lavouras; b) em lavouras de grãos, visando melhorar a cobertura de solo para o sistema plantio direto, com a possibilidade, ainda, de na entressafra utilizar a forragem na alimentação de bovinos; c) em fazendas que buscam intensificar o uso da terra, se beneficiando do sinergismo entre as atividades de pasto e lavoura.

A opção pela mudança de um sistema especializado (mais simples) para um sistema integrado (mais complexo) causa mudanças no ambiente, que resultarão em impactos no solo e, sobretudo, no manejo da propriedade (Vilela et al., 2011). Entretanto, ainda que haja um relativo consenso na literatura dos benefícios da iLP sobre a qualidade do solo (Santos et al., 2011), há que se ter cautela, pois os impactos causados podem ser positivos ou negativos, dependendo do manejo adotado (Vilela et al., 2011).

A iLP pode propiciar a melhoria do aproveitamento de água e, por consequência, nutrientes, resultando em estabilidade da produção de culturas anuais (Loss et al., 2011), menor lixiviação de nutrientes (Oliveira et al., 2011), níveis mais elevados de COT e qualidade biológica do ambiente solo (Muniz et al., 2011), maiores teores de COT e N nos agregados e melhores propriedades físicas (Loss et al., 2011). Entretanto, Santos et al. (2011) observaram que, mesmo após quatro anos na fase de pastejo, o sistema de iLP provocou impactos negativos na qualidade física do solo e que a pastagem contínua, ainda que degradada, apresentou melhor qualidade.

Segundo Vilela et al. (2011), a iLP proporciona melhorias na capacidade de suporte das pastagens na fase subsequente à lavoura o que pode conduzir a redução na pressão pela abertura de novas áreas para criação de animais. De acordo com Macedo et al. (2000), a recuperação de pastagens é capaz de elevar a produção animal em até seis vezes, além de ocorrer maior eficiência na produção, resultando em menor emissão de GEE por unidade de área ou por quilo de carne produzido, o que representa ganho ambiental pela eficiência produtiva. A eficiência no uso da terra, que é o principal recurso natural aplicado na pecuária, é um dos indicadores de sustentabilidade dos sistemas (Bungenstab, 2012), assim, na iLP ocorre melhor utilização dos recursos naturais pela complementaridade e sinergia entre os componentes vegetais e animais.

Nos sistemas integrados, por sua complexidade, há interações benéficas (Tsukamoto Filho et al., 2004) entre os diferentes componentes do sistema que conferem aporte diferenciado de resíduos ao solo (Souza et al., 2009; Bayer et al., 2011), sendo esses últimos em quantidade e qualidade distinta daquela observada nos monocultivos ou

cultivos rotacionados em que não haja gramíneas ou o componente animal incluídos no sistema. O componente animal no sistema é importante por atuar na ciclagem de C e N, que é favorecida pela deposição de fezes e de urina dos animais sobre o solo. A contribuição diferenciada para o aporte de C ao solo tem origem na composição desse material, que é proveniente da celulose e de materiais lignificados da parte aérea vegetal, cuja decomposição é iniciada pela digestão dos ruminantes (Bayer et al., 2011).

### **2.3.2 Sistema de integração lavoura-pecuária-floresta**

Quando da introdução do componente florestal na iLP, foi gerado um conceito mais amplo de sistemas integrados, com variadas possibilidades de integração dos componentes do sistema no tempo e no espaço (Balbino et al., 2012). O modelo, pela possibilidade maior de diversificação, permite aumento e estabilização da renda obtida na propriedade (Paciullo et al., 2011); propicia a redução do custo na recuperação/renovação de áreas degradadas, além de melhor aproveitamento de insumos, podendo ser implantado em propriedades de dimensões variadas (Balbino et al., 2011a; Balbino et al., 2011b). Pela presença do componente arbóreo, o sistema iLPF atua melhorando as condições microclimáticas, contribuindo para reduzir a amplitude térmica e aumentar a umidade relativa do ar, influenciando positivamente no desempenho animal por proporcionar conforto térmico (Balbino et al., 2012). Assim, o ciclo de criação dos animais pode terminar mais cedo, reduzindo a emissão de GEE por quilograma de carne produzido.

Como efeitos positivos do sistema iLPF são apontados ainda melhoria da resistência das culturas à ocorrência de veranicos; redução da incidência de plantas daninhas, pragas e doenças pela quebra de ciclos de recriação. Com relação ao solo, a iLPF pode promover a melhoria nas suas características físicas, químicas e biológicas e, também, aumento da matéria orgânica do solo com possível sequestro de C e mitigação dos GEE (Balbino et al., 2012; Vilela et al., 2012).

A iLPF, além de poder proporcionar a redução de desmatamentos para abertura de novas áreas em função da recuperação de áreas degradadas, também pode contribuir à elevação da oferta de bioenergia sem promover novos desmatamentos (Vilela et al., 2011). A necessidade energética suprida pela madeira de origem das iLPFs representa uma fonte de energia *õverdeõ* para abastecimento industrial, reduzindo o uso de madeira originada da abertura de novas áreas.

## 2.4 MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO

Sendo o solo um recurso natural indispensável para a produção agropecuária, ele deve ser manejado de acordo com as boas práticas de manejo sustentável para que possa cumprir sua função, não somente como o meio mais importante para a produção agropecuária e, portanto, a principal fonte para alimentação humana, mas também como um filtro natural, que mantém os estoques subterrâneos de água doce limpos. Ademais, o solo serve como habitat para uma complexa biodiversidade e também como um armazém natural de C e água, elementos fundamentais para o equilíbrio e adaptabilidade de ecossistemas terrestres à eventos climáticos extremos.

A matéria orgânica do solo (MOS) é um componente que representa aproximadamente 1 a 10% da sua matriz sólida dos horizontes superficiais de solos minerais. Apesar da sua relativamente pequena quantidade comparada à matriz mineral, a MOS exerce papel importante em todas as funções do solo. Por exemplo, em regiões tropicais geralmente a MOS representa boa parte da capacidade de troca catiônica total do solo (Novais & Mello, 2007), nas camadas superficiais dos solos minerais a MOS contribui com 20 a 90% das cargas dependentes de pH (Silva & Mendonça, 2007) e em solos altamente intemperizados, como os latossolos, as cargas negativas da matéria orgânica podem representar em torno de 80% da capacidade de troca catiônica em horizontes superficiais (Oades et al., 1989 citado por Alleoni et al., 2009).

A matéria orgânica do solo é medida por meio da quantificação do C, com base no pressuposto de que toda matéria orgânica possui 58% de C na composição da sua massa (Resende et al., 2007). Grande parte do C entra no solo por meio da fotossíntese para a produção de matéria vegetal que é processada pela biota edáfica e, finalmente, adquire características que a tornam estável, seja pela interação com colóides minerais ou pela formação de moléculas orgânicas recalcitrantes (Urquiaga et al., 2010a). O estoque de MOS é função do ambiente; do manejo, que deve preconizar sistemas de alta produção (Nunes et al., 2011); da composição química do material de origem (Ryals et al., 2014); do balanço positivo de N (Lovato et al., 2004; Sisti et al., 2004; Urquiaga et al., 2010a; Urquiaga et al., 2010b) e outros nutrientes (Kirkby et al., 2013; Richardson et al., 2014) no sistema, estando estes últimos entre os principais mecanismos de sequestrar C no solo.

Como uma média global, o COT do solo é três vezes superior ao C da biomassa da vegetação e o dobro do encontrado na atmosfera (Lal, 2008). Pela sua

magnitude e por sua relação com os demais reservatórios globais de C, principalmente o C atmosférico, o solo é relevante no ciclo global de carbono e, como salientado por Zhang et al. (2014), pequenas alterações no manejo do solo podem resultar em mudanças consideráveis na concentração do CO<sub>2</sub> atmosférico. Assim, dependendo do uso e manejo, o solo pode atuar como fonte ou dreno do CO<sub>2</sub>.

Segundo Pegoraro et al. (2014), quando há fabáceas como adubo verde no esquema de rotação de culturas, pode ser adicionado ao solo N suficiente para atender à demanda dos micro-organismos decompositores. Então ocorre a degradação da MOS e a posterior estabilização do C, ficando esse armazenado no solo, seja pela estabilização química via ligações químicas e físico-químicas estáveis e complexação de grupos funcionais (Briedis, 2010), física via agregados estáveis do solo (Madari et al., 2005; Vezzani & Mielniczuk, 2011) ou bioquímica conferida pela resistência estrutural ao ataque enzimático (Silva & Mendonça, 2007). Normalmente a estabilização da MOS se dá pela combinação dos três processos.

A quantidade e qualidade dos argilominerais também exercem influência na acumulação e posterior fixação do C. Solos tropicais argilosos, altamente intemperizados, como os latossolos, predominantemente cauliniticos, de carga superficial negativa, contendo também quantidade variável de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio de carga variável, apresentam menores taxas de decomposição da fração da MOS quimicamente protegida em ligação às argilas, se comparados aos solos arenosos (Bayer et al., 2011). Os óxidos de Fe e Al, abundantes nos latossolos, são altamente eficientes como agentes ligantes das moléculas orgânicas à superfície de minerais (Vezzani & Mielniczuk, 2011). Assim, nesses solos a MOS que se liga predominantemente à superfície desses minerais, tornando-a pouco suscetível ao preparo do solo em função da forte estabilidade química da ligação organo-mineral (Bayer et al., 2011).

#### **2.4.1 Uso da técnica do <sup>13</sup>C aplicada a estudos da dinâmica de matéria orgânica do solo**

Espécies atômicas de um determinado elemento químico que possuem massas atômicas diferentes são denominadas isótopos. Os isótopos estáveis, cuja massa não varia ao longo de sua existência, mais utilizados em estudos ambientais são: carbono, nitrogênio, enxofre, oxigênio e hidrogênio (Martinelli et al., 2009). A escolha do isótopo a ser

utilizado num estudo deve considerar os objetivos do trabalho, ou seja, à quais perguntas ele deverá responder, levando-se em consideração processos naturais ou antropogênicos que possam ter influência na sua abundância natural (Pereira & Benedito, 2007). A técnica para uso de isótopos estáveis é baseada na premissa de que a composição isotópica de determinado elemento em determinado processo varia de forma previsível à medida que o elemento passa de um compartimento ambiental ao outro (Zagatto, 2000; Martinelli et al., 2009).

Dado que o C e o N são elementos essenciais ao crescimento vegetal e possuem ciclos complexos nos sistemas agrícolas, seus isótopos são amplamente utilizados na pesquisa científica (Alves et al., 2006). O C possui três isótopos,  $^{12}\text{C}$  (98,89%),  $^{13}\text{C}$  (1,11%) e  $^{14}\text{C}$  ( $10^{-10}\%$ ). Pela baixíssima participação no ambiente, o último não possui relevância fisiológica (Torres, 2011). O isótopo  $^{13}\text{C}$  é bastante utilizado para avaliações da estrutura de ecossistemas e também para estudos dos efeitos de mudanças no uso do solo (Trivelin & Bendassolli, 2013). Em agroecossistemas, principalmente naqueles em que houve a substituição de florestas ou savanas por culturas C4, como por exemplo, as braquiárias (*Urochloa* spp) ou o milho (*Zea mays* L.), a investigação da dinâmica do C do solo na MOS e em suas frações é comumente realizada pela avaliação da abundância do isótopo  $^{13}\text{C}$ .

A composição isotópica absoluta (R) de uma amostra é difícil de ser obtida (Martinelli et al., 2009), assim, normalmente, para amostras ela é expressa em termos de  $^{13}\text{C}$ , que representa a diferença na relação de  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  das amostras em relação a um padrão, expressa em partes por mil (‰) (Alves et al., 2006; Pereira & Benedito, 2007). No caso do C, o padrão internacional é a rocha calcária Belemnite americana, da formação geológica denominada Pee Dee da Carolina do Norte, EUA, também denominada Pee Dee Belemnite (PDB), cuja composição isotópica absoluta (R) é 0,0112372, sendo  $^{13}\text{C} = 1,11$  e  $^{12}\text{C} = 98,98$  (Alves et al., 2006; Pereira & Benedito, 2007). O  $^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  das plantas é sempre um valor negativo porque a relação molar  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  das plantas é inferior à da PDB (Alves et al., 2006).

Na natureza ocorrem diferenças na composição isotópica dos compostos que participam dos processos em estudo, sendo essas diferenças fruto de reações físico-químicas ou biológicas. Por exemplo, durante a fotossíntese, ocorre discriminação isotópica do C de maneira distinta entre as plantas de ciclo C3 e C4. O  $\delta^{13}\text{C}$  das diferentes vias fotossintéticas são, normalmente, devidos às propriedades bioquímicas da fixação

primária de CO<sub>2</sub> por enzimas (Zagatto, 2000). As plantas C3 fixam C através da enzima ribulose 1,5-bifosfato carboxilase/oxigenase (Rubisco), pertencente ao ciclo de Calvin, e discriminam mais intensamente o <sup>13</sup>C, por isso apresentam valores de <sup>13</sup>C mais baixos, com variações de -20‰ a -34‰ (em média -27‰). As plantas de ciclo C4 possuem duas reações de carboxilação, a Rubisco e outra promovida pela enzima fosfoenolpiruvato carboxilase, denominado de PEPcase (ciclo Hatch-Slack). Plantas com esse ciclo fotossintético discriminam menos o <sup>13</sup>C e apresentam, portanto, valores de <sup>13</sup>C mais altos variando de -7‰ a -17‰ (em média -13‰) (Zagatto, 2000; Pereira & Benedito, 2007; Trivelin & Bendassolli, 2013). Por causa da diferença entre os valores δ<sup>13</sup>C e da não sobreposição das faixas, é possível que os ciclos fotossintéticos sejam identificados com base na análise da variação da abundância isotópica de <sup>13</sup>C (Alves et al., 2006).

O estudo da dinâmica do C na MOS assume que a composição isotópica do solo (produto) refletirá a composição isotópica do material vegetal de sua cobertura (fonte), enriquecido de 1 a 2‰, em função da respiração do solo e decomposição da matéria orgânica (Zagatto, 2000). Modificações da cobertura vegetal, por plantas com via fotossintética diferente das originais, também podem ser estudadas em longo prazo. Neste caso, se a composição isotópica do solo sob a vegetação nativa (composição isotópica inicial) e na área cultivada (atual) forem conhecidas, é possível calcular, por meio de uma equação simples, a proporção da matéria orgânica de origem, por exemplo, C3 nativa, que é substituída pela matéria orgânica derivada de espécies C4, ou vice-versa. Esse tipo de informação pode ser utilizada em estudos de ciclagem do C no solo e de decomposição da MOS (Alves et al., 2006).

Atualmente, como a maioria dos sistemas de cultivo é consorciada, a vegetação original, com predominância de plantas C3 é substituída por matéria orgânica de plantas C3 e C4. Neste caso, considera-se que a assinatura isotópica do solo cultivado seja reflexo da interação entre a marcação natural das plantas de diferentes ciclos fotossintéticos, apresentando valores intermediários de <sup>13</sup>C.

#### **2.4.2 Uso de modelos matemáticos para estudos da dinâmica do carbono orgânico do solo**

O COS desempenha um papel importante no ciclo global do C, sendo um dos compartimentos que respondem a alterações, podendo seu estoque, dependendo do manejo,

aumentar ou diminuir. Deste modo, em estudos relacionados à mudança global do clima, a quantificação dos estoques de COS ganhou foco, tornando-se essenciais estudos de modelagem do ciclo do C. Os impactos de práticas de manejo na dinâmica de COS podem ser estudados com experimentos de longa duração. Esses experimentos são de inestimável valor científico porque fornecem dados indispensáveis para o desenvolvimento e adequação de modelos matemáticos. Os modelos de simulação do C baseados em processos, por sua vez, são importantes por complementar os estudos baseados em experimentos de campo (Al-Adamat et al., 2007; Gollany et al., 2012), provendo um olhar para o futuro daquele cenário de manejo.

A modelagem, ainda que não retorne uma previsão precisa, tem a vantagem de estimar mudanças espaço-temporais no COS causadas por diferentes práticas de manejo e em variadas condições ambientais (Wang et al., 2014), sendo ferramenta útil, ágil e de baixo custo para esse tipo de análise. De acordo com Zhang et al. (2014), o uso de modelos baseados em processos, principalmente se integrados a bases de dados de Sistemas de Informações Geográficas, podem desempenhar um papel importante na descrição dos ciclos biogeoquímicos do C, assim como direcionar os esforços de mitigação.

Se o uso de modelos de simulação da dinâmica do C ainda requer ajustes para melhorar a acurácia, sua aplicação em agroecossistemas mostra-se ainda mais desafiadora (Tornquist et al., 2009). Em sistemas integrados de produção, como iLP e iLPF, devido às complexas interações resultantes dos seus componentes, é difícil proceder uma simulação, mesmo que o objetivo seja simplesmente determinar se o sistema está atuando como fonte ou dreno de C. Uma adicional limitação para a aplicação de modelos em iLP ou iLPF é o ainda relativamente reduzido tempo de duração dos experimentos sob esses sistemas. Detectar pequenas mudanças no COS induzidas pelo manejo em períodos de tempo reduzidos é difícil devido às grandes diferenças espaço-temporais dos estoques de COS (Kravchenko & Robertson, 2011).

Em ecossistemas e solos de regiões temperadas, os modelos de dinâmica de C têm sido amplamente aplicados, ao passo que em condições tropicais sua avaliação é mais restrita (Kamoni et al., 2007; Tornquist et al., 2009). Em regiões sob clima tropical a dinâmica do COS é diferente daquela observada nas regiões de clima temperado, devido à predominância de solos altamente intemperizados com elevada acidez e baixa capacidade de troca catiônica; elevadas temperaturas e precipitações anuais, onde os processos de ciclagem podem ser até dez vezes mais rápidos (Moreira & Siqueira, 2006). Em virtude da

importância do Brasil para a agricultura global e dos limitados dados de pesquisa com a utilização de modelos de C em sistemas integrados, torna-se necessário a calibração e validação de modelos para essas condições.

### *O modelo CQESTR*

O presente tópico foi escrito com base em Rickman et al. (2001), Liang et al. (2009), desenvolvedores do modelo, e Leite et al. (2009), que utilizou o modelo para as condições brasileiras, não sendo, portanto, citados no texto que segue.

O modelo CQESTR simula o efeito do clima, rotações de cultura e práticas de manejo no COS. O modelo realiza simulações em longo prazo (100 anos) e trabalha em escala de tempo. No modelo é simulado o equilíbrio do efeito entre entradas de C ao solo, via adição de resíduos e adubos orgânicos, e perdas por oxidação microbiana da MOS. O CQESTR pode controlar com até cinco camadas de solo (horizontes) de qualquer profundidade. Assim, cada adição de resíduos (resíduos de cultura e adubos orgânicos) é controlada separadamente, de acordo com sua localização nas camadas de solo, até a completa decomposição. Enquanto resíduos orgânicos (parte aérea, raízes e resíduos orgânicos) são decompostos sua identidade é mantida através das fases de decomposição em cada camada de solo. A MOS existente também é controlada como um compartimento separado para cada camada de solo considerada.

No CQESTR, a decomposição da matéria orgânica inicialmente era tratada em termos de tempo cronológico (~ 4 anos), após ajustes no modelo passou a ser controlada em termos de tempo termal (ou graus dias cumulativos) antes de os resíduos adicionados serem considerados suficientemente decompostos para passar ao compartimento da MOS estável. No modelo a decomposição é dividida em 3 fases: rápida, nos primeiros 1000 graus dias, aproximadamente a oxidação do substrato prontamente metabolizável; fase lenta, até 15000 graus dias, a oxidação de materiais mais recalcitrantes; e finalmente, após a fase 2, em um passo, o material metabolizado é transferido para o compartimento estável. A taxa de decomposição biológica dos resíduos de cultura e materiais orgânicos adicionados é função das condições ambientais incluindo efeitos da temperatura, capturada pelo tempo termal; tipos de resíduos (fB), que trata de maneira diferenciada os resíduos de raízes, parte aérea, material orgânico pré-decomposto (por exemplo, esterco) e MOS estável; disponibilidade de água (fW), determinado pela localização de resíduos, enterrados

ou depositados sobre a superfície do solo, e a presença ou ausência de uma cultura em crescimento; conteúdo de N dos resíduos ( $fN$ ), que, na Fase I da decomposição, depende do conteúdo inicial de N dos resíduos e após essa fase recebe um valor único e baixo para todos os resíduos remanescentes, assim como para o compartimento da MOS estável; e propriedades do solo textura ( $fX$ ) e drenagem (Liang et al 2009). Os coeficientes  $fB$ ,  $fW$ ,  $fN$ ,  $fX$  e  $k$  (constante universal da taxa de decomposição) foram determinados usando uma equação exponencial de melhor ajuste de decomposição de resíduos proveniente de bancos de dados de variadas culturas de mais de dez localidades de diferentes regiões climáticas dos Estados Unidos.

As equações abaixo descrevem o cômputo dos resíduos remanescentes para cada intervalo de tempo e resíduo ou material orgânico ( $j$ ) em cada camada de solo:

$$R_{r,j} = R_{p,j} \times \exp(k \times fN_j \times fW_j \times fB_j \times fX \times fD \times CDD_j); \quad CDD_j < 15,000$$

$$R_{r,j} = 0; \quad CDD_j \geq 15,000$$

Em que:

$R_{r,j}$ : resíduo ou material orgânico  $j$  remanescente ao final de cada intervalo de tempo de decomposição (peso/área)

$R_{p,j}$ : resíduo ou material orgânico  $j$  antes da decomposição (peso/área)

$k$ : constante universal da taxa de decomposição ( $C^{-1} d^{-1}$ )

$fN_j$ : fator de conteúdo de nitrogênio para o resíduo  $j$ , com diferentes valores atribuídos dentro de 1000 CDD ou após 1000 CDD

$fW_j$ : fator disponibilidade de água para os resíduos  $j$

$fB_j$ : fator biomassa ou tipo de resíduo para o resíduo  $j$

$fX$ : fator textura do solo

$fD$ : fator drenagem do solo

$CDD$ : graus dias cumulativos do resíduo  $j$  para este intervalo de tempo ( $^{\circ}C d$ )

$R_{15.000,j}$ : resíduo  $j$  remanescente depois de 15.000 CDD de decomposição (peso/área)

As equações abaixo descrevem o cômputo da MOS remanescente estável para cada intervalo de tempo termal em cada camada de solo:

$$R_{SOM,r} = R_{SOM,p} \times \exp(k \times fN_0 \times fB_{OM} \times fX \times fD \times CDD); \quad CDD_j < 15,000$$

$$R_{SOM,r} = R_{SOM,p} \times \exp(k \times fN_0 \times fB_{OM} \times fX \times fD \times CDD) + R_{15.000,j}; \quad CDD_j = 15,000$$

Em que:

$R_{SOM,r}$ : MOS remanescente ao final da decomposição em cada intervalo de tempo (peso/área)

$R_{SOM,p}$ : MOS antes da decomposição (peso/área)

$fN_0$ : fator de conteúdo de nitrogênio para a Fase III de decomposição

$fB_{OM}$ : fator tipo de biomassa para a MOS

CDD: graus dias cumulativos da MOS para este intervalo de tempo ( C d)

$R_{15.000,j}$ : resíduo j remanescente depois de 15.000 CDD de decomposição (peso/área)

Códigos numéricos foram atribuídos para as classes de textura dos solos do sistema americano de classificação (classes de textura de solos do USDA) e utilizados para calcular os coeficientes de textura, baseado em uma relação linear, e calibrados com extensos bancos de dados de uma ampla gama de texturas de solo. No modelo o efeito da textura varia de -2 a 1 para solos argilosos até arenosos, respectivamente. O fator de drenagem foi definido como uma função do número médio de dias em que o solo permanece saturado durante o ano. As classes de drenagem existentes no CQESTR são: excessivamente drenados, pouco excessivamente drenados, bem drenados, moderadamente drenados, pouco mal drenados, mal drenados e muito mal drenados com 2, 4, 5, 20, 90, 180 e 350 dias de saturação por ano.

As características do sistema radicular de diferentes espécies são bastante variáveis, dependendo da espécie ou variedade, solo e condições ambientais. Os coeficientes de distribuição de raízes, para o modelo CQESTR, foram determinados com base em experimentos de distribuição de raízes apresentados na literatura, resultando em coeficientes de distribuição de raízes menores para culturas com raízes profundas e coeficientes maiores para culturas com raízes superficiais.

No modelo, os resíduos em superfície são separados em dois diferentes compartimentos, que possuem diferentes coeficientes de água atribuídos para cada um. Em plantio direto é assumido que os resíduos são depositados sobre a superfície do solo e depois, novos resíduos são adicionados em sobreposição aos primeiros. As camadas de resíduos que foram utilizados no somatório de atingir a meta de cobertura são atribuídas ao compartimento "seco", enquanto que as camadas de resíduo de superfície que não foram utilizados no somatório são atribuídas ao compartimento "húmido". Para as camadas do

compartimento seco, cujos resíduos sofrem decomposição mais lenta do que aqueles do compartimento húmido, foi atribuído um valor baixo fW (fWA,s ou fWH,s,) enquanto a camada (s) no compartimento húmido, os quais sofrem relativamente rápida decomposição, foram atribuídos valores mais elevados fW. Em plantio convencional a maioria dos resíduos é incorporada ao solo conseqüentemente, todos os resíduos de superfície em um sistema PC decompõem de um modo lento, o que corresponde a uma condição seca.

## 2.5 REFERÊNCIAS

AL-ADAMAT, R.; RAWAJFIH, Z.; EASTER, M.; PAUSTIAN, K.; COLEMAN, K.; MILNE, E.; FALLOON, P.; POWLSON, D. S.; BATJES, N. H. Predicted soil organic carbon stocks and changes in Jordan between 2000 and 2030 made using the GEFSOC Modelling System. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 122, n. 1, p. 35-45, 2007.

ALLEONI, L. R. F.; CAMARGO, O. A.; CASAGRANDE, J. C.; SOARES, M. R. Química dos solos altamente intemperizados. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. (Ed.). **Química e mineralogia do solo: Parte II - Aplicações**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. p. 381-448. XVIII cap.

ALVES, B. J. R.; ZOTARELLI, L.; JANTALIA, C. P.; BODDEY, R. M.; URQUIAGA, S. **Capítulo 13: Emprego de Isótopos Estáveis para o Estudo do Carbono e do Nitrogênio no Sistema Solo-Planta**. 2006. Disponível em: <<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/recursos/biotacap13ID-ClaXOEabVo.pdf>>. Acesso em: 08 Fev. 2014.

ANDRADE, A. G.; FREITAS, P. L.; LANDERS, J. Aspectos gerais do manejo e conservação do solo e da água e as mudanças ambientais. In: PRADO, R. B.; TURETTA, A. P. D.; ANDRADE, A. G. (Ed.). **Manejo e conservação do solo e da água no contexto das mudanças ambientais**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2010. p. 25-40. 1 cap.

BALBINO, L. C.; CORDEIRO, L. A. M.; MARTÍNEZ, G. B. Contribuições dos Sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF) para uma Agricultura de Baixa Emissão de Carbono. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 4, n. 6, p. 1163-1175, 2011a.

BALBINO, L. C.; CORDEIRO, L. A. M.; OLIVEIRA, P.; KLUTHCOUSKI, J.; GALERANI, P. R.; VILELA, L. Agricultura sustentável por meio da integração lavoura-pecuária-floresta (iLPF). **Informações Agronômicas**, Brasil, v. 2, n. 138, p. 1-18, 2012. Disponível em: <[http://www.ipni.net/publication/ia-brasil.nsf/0/37D541B90CDB2E1685257A84005C6490/\\$FILE/Jornal1-18-138.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-brasil.nsf/0/37D541B90CDB2E1685257A84005C6490/$FILE/Jornal1-18-138.pdf)>. Acesso em: 14 Jan. 2014.

BALBINO, L. C.; CORDEIRO, L. A. M.; PORFÍRIO-DA-SILVA, V.; MORAES, A.; MARTÍNEZ, G. B.; ALVARENGA, R. C.; KICHEL, A. N.; FONTANELI, R. S.;

SANTOS, H. P.; FRANCHINI, J. C.; GALERANI, P. R. Evolução tecnológica e arranjos produtivos de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 10, p. i-xii, 2011b.

BAYER, C.; AMADO, T. J. C.; TORNQUIST, C. G.; CERRI, C. E. C.; DIECKOW, J.; ZANATTA, J. A.; NICOLOSO, R. D. S. Estabilização do carbono no solo e mitigação das emissões de gases de efeito estufa na agricultura conservacionista. In: KLAUBERG FILHO, O.; MAFRA, A. L.; GATIBONI, L. C. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2011. p. 55-117. 7 cap.

BERNARDI, A. C. C.; MACHADO, P. L. O. A.; SILVA, C. A. Fertilidade do solo e demanda por nutrientes no Brasil. In: MANZATTO, C. V.; FREITAS JUNIOR, E.; PERES, J. R. R. (Ed.). **Uso Agrícola dos Solos Brasileiros**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos/Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2002. p. 61-77. 6 cap.

BRIEDIS, C. **Compartimentos da matéria orgânica do solo, agregação, mecanismos de proteção e sequestro de carbono influenciados pela calagem superficial em Sistema Plantio Direto**. 2010. 86 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia: Agricultura - Uso e Manejo do Solo)óSetor de Ciências Agrárias e Tecnologia, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2010.

BUNGENSTAB, D. J. A posição estratégica dos sistemas de integração no contexto da agropecuária e do meio ambiente. In: BUNGENSTAB, D. J. (Ed.). **Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta: a produção sustentável**. Brasília: Embrapa, 2012. p. 217-224. 16 cap.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Séries históricas**. 2014. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&t=2>>. Acesso em: 31 Jul 2014.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos: safra 2014/15**. Brasília: CONAB/ Ministério do Palnejamento, Orçamento e Gestão, 2015. 119 p. Oitavo levantamento.

COUTINHO, A. C. Condicionantes da expansão da fronteira agrícola em Mato Grosso. **Revista de Política Agrícola**, v. sv., n. 1, p. 80-97, 2009. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/politica-agricola/publicacoes/revista-de-politica-agricola>>. Acesso em: 18 Mar. 2015.

DIAS-FILHO, M. B. **Diagnóstico das Pastagens no Brasil**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2014. (Documentos 402).

GEOBRASIL. **O estado dos solos**. 2002. Disponível em: <<http://www.uff.br/cienciaambiental/biblioteca/geobrasil/solos.pdf>>. Acesso em: 20 Mai 2015.

GOLLANY, H. T.; FORTUNA, A. M.; SAMUEL, M. K.; YOUNG, F. L.; PAN, W. L.; PECHARCO, M. Soil Organic Carbon accretion vs. Sequestration using physicochemical fractionation and CQESTR simulation. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 77, n. 2, p. 618-629, 2012.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapa de Biomas do Brasil: Primeira**

Aproximação. Rio de Janeiro: Ministério do Meio Ambiente / Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão / Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Esc. 1:5.000.000. 2004. Disponível em: <[ftp://geofpt.ibge.gov.br/mapas\\_tematicos/mapas\\_murais/biomas.pdf](ftp://geofpt.ibge.gov.br/mapas_tematicos/mapas_murais/biomas.pdf)>. Acesso em: 7 Out. 2014.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo agropecuário 2006**: Brasil, grandes regiões e unidades da Federação - Segunda apuração. Rio de Janeiro: Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão / Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2012. Disponível em: <[ftp://ftp.ibge.gov.br/Censos/Censo\\_Agropecuario\\_2006/Segunda\\_Apuracao/censoagro2006\\_2aapuracao.pdf](ftp://ftp.ibge.gov.br/Censos/Censo_Agropecuario_2006/Segunda_Apuracao/censoagro2006_2aapuracao.pdf)>.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pecuária 2013**. 2013. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/estadosat/index.php>>. Acesso em: 21 mai. 2015.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**. Rio de Janeiro: Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão, 2015. 85 p. Pesquisa mensal de previsão e acompanhamento de safras agrícolas.

KAMONI, P. T.; GICHERU, P. T.; WOKABI, S. M.; EASTER, M.; MILNE, E.; COLEMAN, K.; FALLOON, P.; PAUSTIAN, K.; KILLIAN, K.; KIHANDA, F. M. Evaluation of two soil carbon models using two Kenyan long term experimental datasets. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 122, n. 1, p. 95-104, 2007.

KICHEL, A. N.; BUNGENSTAB, D. J.; ZIMMER, A. H.; SOARES, C. O.; ALMEIDA, R. G. Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta e o progresso do setor agropecuário brasileiro. In: BUNGENSTAB, D. J. (Ed.). **Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta: a produção sustentável**. Brasília: Embrapa, 2012. p. 1-10. 1 cap.

KIRKBY, C. A.; RICHARDSON, A. E.; WADE, L. J.; D., B. G.; BLANCHARD, C.; KIRKEGAARD, J. A. Carbon nutrient stoichiometry to increase soil carbon sequestration. **Soil Biology & Biochemistry**, Elmsford, v. 60, n. s/n, p. 77686, 2013.

KRAVCHENKO, A. N.; ROBERTSON, G. P. Whole-profile soil carbon stocks: The danger of assuming too much from analyses of too little. **Soil Science Society of American Journal**, v. 75, n. 1, p. 235-240, 2011.

LAL, R. Carbon sequestration. **Philosophical Transactions of the Royal Society B**, Londres, v. 363, n. 1492, p. 815-830, 2008.

LEITE, L. F. C.; DORAISWAMY, P. C.; CAUSARANO, H. J.; GOLLANY, H. T.; MILAK, S.; MENDONÇA, E. S. Modeling organic carbon dynamics under no-tillage and plowed systems in tropical soils of Brazil using CQESTR. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 102, n. 1, p. 118-125, 2009.

LEITE, L. F. C.; PORFÍRIO-DA-SILVA, V.; MADARI, B. E.; MACHADO, P. L. O. A.; BARCELLOS, A. O.; BALBINO, L. C. O potencial de sequestro de carbono em sistemas de produção integrados: integração lavoura-pecuária-floresta (iLPF). In: Encontro Nacional de Plantio Direto na Palha: a tecnologia que mudou a visão do produtor, 12, 2010, Foz do Iguaçu, PR. **Anais eletrônicos...** Foz do Iguaçu, PR: Federação Brasileira de

Plantio Direto na Palha. p. 69-76. Disponível em: <[https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=7&cad=rja&ved=0CGQQFjAG&url=http%3A%2F%2Fwww.researchgate.net%2Fpublication%2F235633031\\_O\\_POTENCIAL\\_DE\\_SEQUESTRO\\_DE\\_CARBONO\\_EM\\_SISTEMAS\\_DE\\_PRODUTO\\_INTEGRADOS\\_INTEGRAO\\_LAVOURA-PECURIA-FLORESTA\\_\(iLPF\)%2Ffile%2F9fcd5121367032421.pdf&ei=0JTVUpb\\_Ko6-sQSFvYDYCw&usg=AFQjCNGc8NSEF2h5ocuiTEDz7c1-cJg8Ww&sig2=WPKKPGgf6i8Wi91SwPz9SQ&bvm=bv.59378465,d.eW0](https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=7&cad=rja&ved=0CGQQFjAG&url=http%3A%2F%2Fwww.researchgate.net%2Fpublication%2F235633031_O_POTENCIAL_DE_SEQUESTRO_DE_CARBONO_EM_SISTEMAS_DE_PRODUTO_INTEGRADOS_INTEGRAO_LAVOURA-PECURIA-FLORESTA_(iLPF)%2Ffile%2F9fcd5121367032421.pdf&ei=0JTVUpb_Ko6-sQSFvYDYCw&usg=AFQjCNGc8NSEF2h5ocuiTEDz7c1-cJg8Ww&sig2=WPKKPGgf6i8Wi91SwPz9SQ&bvm=bv.59378465,d.eW0)>. Acesso em: 21 Nov. 2013

LEMAIRE, G.; FRANZLUEBBERS, A.; CARVALHO, P. C. D. F.; DEDIEU, B. Integrated crop-livestock systems: Strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 190, n. s/n, p. 4-8, 2014.

LIANG, Y.; GOLLANY, H. T.; RICKMAN, R. W.; ALBRECHT, S. L.; FOLLETT, R. F.; WILHELM, W. W.; NOVAK, J. M.; DOUGLAS, C. L. Simulating soil organic matter with CQESTR (v. 2.0): Model description and validation against long-term experiments across North America. **Ecological Modelling**, v. 220, n. 4, p. 568-581, 2009.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; GIÁCOMO, S. G.; PERIN, A.; ANJOS, L. H. C. Agregação, carbono e nitrogênio em agregados do solo sob plantio direto com integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 10, p. 1269-1276, 2011.

LOVATO, T.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; VEZZANI, F. M. Adição de carbono e nitrogênio e sua relação com os estoques no solo e com o rendimento do milho em sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 1, p. 175-187, 2004.

MACEDO, M. C. M.; KICHEL, A. N.; ZIMMER, A. H. **Degradação e alternativas de recuperação e renovação de pastagens**. Campo Grande: Embrapa Gado de Corte, Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento, 2000. 4 p. Comunicado Técnico 62.

MADARI, B. E.; MACHADO, P. L. O. A.; TORRES, E.; ANDRADE, A. G.; VALENCIA, L. I. O. No tillage and rotation effects on soil aggregation and organic carbon in a Rhodic Ferralsol from southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 80, n. 1-2, p. 185-200, 2005.

MAPA; MDA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento; Ministério do Desenvolvimento Agrário. **Plano setorial de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas para a consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono na agricultura. Plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono)**. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento / Ministério do Desenvolvimento Agrário, 2012.

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, 2009. 144 p.

MCTI. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação,

2013. 80 p.

MCTI. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2014. 167 p.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. **Plano de Ação para prevenção e controle do desmatamento e das queimadas: cerrado**. Brasília: MMA, 2011.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2 ed. Lavras: UFLA, 2006. 729 p.

MUNIZ, L. C.; MADARI, B. E.; TROVO, J. B. F.; CANTANHÊDE, I. S. D. L.; MACHADO, P. L. O. A.; COBUCCI, T.; FRANÇA, A. F. S. Soil biological attributes in pastures of different ages in a crop-livestock integrated system. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 10, p. 1262-1268, 2011.

NOBRE, N. A. O.; ROQUE, C. G.; BAMPI, A. C. Efeitos antrópicos e suas implicações na bacia hidrográfica do rio Carapá, Colíder ó Mato Grosso/Brasil. **Revista Geográfica Acadêmica**, Boa Vista, v. 7, n. 1, p. 70-80, 2013.

NOVAIS, R. F.; MELLO, J. W. V. Relação solo-planta. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 133-204. IV cap.

NUNES, R. S.; LOPES, A. A. C.; SOUSA, D. M. G.; MENDES, I. C. Sistemas de manejo e os estoques de carbono e nitrogênio em Latossolo de Cerrado com a sucessão soja-milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 4, p. 1407-1419, 2011.

OLIVEIRA, G. C. Curso de qualificação profissional a distância. **Solos da região dos cerrados: reconhecimento na paisagem, potencialidades e limitações para uso agrícola**. 2 revisada ed. Lavras: Universidade Federal de Lavras / Fundação de Apoio ao Ensino, Pesquisa e Extensão (FAEPE), 2009. 69 p.

OLIVEIRA, M. I. L.; BECQUER, T.; GOEDERT, W. J.; VILELA, L.; DELEPORTE, P. Concentração de íons na solução de um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 10, p. 1291-1300, 2011.

PACIULLO, D. S. C.; GOMIDE, C. A. M.; CASTRO, C. R. T.; FERNANDES, P. B.; MÜLLER, M. D.; PIRES, M. F. Á.; FERNANDES, E. N.; XAVIER, D. F. Características produtivas e nutricionais do pasto em sistema agrossilvipastoril, conforme a distância das árvores. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 10, p. 1176-1183, 2011.

PEGORARO, R. F.; SILVA, I. R.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; CANTARUTTI, R. B.; FONSECA, S. Estoques de carbono e nitrogênio em argissolo submetido ao monocultivo de *Eucalyptus urograndis* e em rotação com *Acacia mangium*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 24, n. 4, p. 935-946, 2014.

PEREIRA, A. L.; BENEDITO, E. Isótopos estáveis em estudos ecológicos: métodos, aplicações e perspectivas. **Revista Biociências**, Taubaté, v. 13, n. 1-2, p. 16-27, 2007.

PRODES. **Taxas anuais do desmatamento - 1988 até 2014**. 2014. Disponível em: <[http://www.obt.inpe.br/prodes/prodes\\_1988\\_2014.htm](http://www.obt.inpe.br/prodes/prodes_1988_2014.htm)>. Acesso em: 17 Jan. 2015.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B.; CORRÊA, G. F. **Pedologia**: base para distinção de ambientes. Lavras: Editora UFLA, 2007.

RICHARDSON, A. E.; KIRKBY, C. A.; BANERJEE, S.; KIRKEGAARD, J. A. The inorganic nutrient cost of building soil carbon. **Carbon Management**, Elmsford, v. 5, n. 3, p. 265-268, 2014.

RICKMAN, R. W.; DOUGLAS JR., C. L.; ALBRECHT, S. L.; BUNDY, L. G.; BERG, J. L. CQESTR: A model to estimate carbon sequestration in agricultural soils. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 56, n. 3, p. 237-242, 2001.

RIVERO, S.; ALMEIDA, O.; ÁVILA, S.; OLIVEIRA, W. Pecuária e desmatamento: uma análise das principais causas diretas do desmatamento na Amazônia **Nova Economia**, v. 19, n. 1, p. 41-66, 2009. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/neco/v19n1/03.pdf>>. Acesso em: 18 Mar. 2015.

RYALS, R.; KAISER, M.; TORN, M. S.; BERHE, A. A.; SILVER, W. L. Impacts of organic matter amendments on carbon and nitrogen dynamics in grassland soils. **Soil Biology & Biochemistry**, Elmsford, v. 68, n. 1, p. 52-61, 2014.

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; FABRÍCIO, A. C.; MACEDO, M. C. M.; BROCH, D. L. Teor e dinâmica do carbono no solo em sistemas de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 10, p. 1349-1356, 2011.

SANTOS, G. G.; MARCHÃO, R. L.; SILVA, E. M.; SILVEIRA, P. M.; BECQUER, T. Qualidade física do solo sob sistemas de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 10, p. 1339-1348, 2011.

SILVA, E. F.; LOURENTE, E. P. R.; MARCHETTI, M. E.; MERCANTE, F. M.; FERREIRA, A. K. T.; FUJII, G. C. Frações lábeis e recalcitrantes da matéria orgânica em solos sob integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 10, p. 1321-1331, 2011.

SILVA, I. R.; MENDONÇA, E. S. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 275-374.

SISTI, C. P. J.; SANTOS, H. P.; KOHHANN, R.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 76, n. 1, p. 39-58, 2004.

SOUZA, E. D.; COSTA, S. E. V. G. A.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. F.; ANDRIGUETI, M.; CAO, E. Estoques de carbono orgânico e de nitrogênio no solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto, submetido a intensidades de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 6, p. 1829-1836, 2009.

TORNQUIST, C. G.; MIELNICZUK, J.; CERRI, C. E. P. Modeling soil organic carbon dynamics in Oxisols of Ibirubá (Brazil) with the Century Model. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 105, n. 1, p. 33-43, 2009.

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

TRIVELIN, P. C. O.; BENDASSOLLI, J. A. **Isótopos Estáveis. Espectrometria de Massas para Determinação de Razão Isotópica de Elementos de Baixo Número Atômico (IRMS). A Técnica de Traçador e a Diluição Isotópica**. 2013. Disponível em: <[http://apostilas.cena.usp.br/Bertinho/MIECen5706/Trabalhos%20adicionais/DiluicaoIsotopica\\_Completo2013.pdf](http://apostilas.cena.usp.br/Bertinho/MIECen5706/Trabalhos%20adicionais/DiluicaoIsotopica_Completo2013.pdf)>. Acesso em: 09 Fev. 2014

TSUKAMOTO FILHO, A. A.; COUTO, L.; NEVES, J. C. L.; PASSOS, C. A. M.; SILVA, M. L. Fixação de Carbono em um sistema agrossilvipastoril com eucalipto na região do cerrado de Minas Gerais. **Agrossilvicultura**, Viçosa, v. 1, n. 1, p. 29-41, 2004. Disponível em: <<http://www.sbag.org.br/03-SBAG-v1-n1-2004-29-41.pdf>>. Acesso em: 28 Jan. 2014.

URQUIAGA, S.; ALVES, B. J. R.; JANTALIA, C. P.; BODDEY, R. M. Variações nos estoques de carbono e emissões de gases de efeito estufa em solos das regiões tropicais e subtropicais do Brasil: uma análise crítica. **Informações Agronômicas**, Brasil, v. 2, n. 130, p. 12-21, 2010a. Disponível em: <[http://www.ipni.net/publication/ia-brasil.nsf/0/41898835F91B508383257A90000C1DBB/\\$FILE/Page12-21-130.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-brasil.nsf/0/41898835F91B508383257A90000C1DBB/$FILE/Page12-21-130.pdf)>. Acesso em: 14 Jan. 2014.

URQUIAGA, S.; ALVES, B. J. R.; JANTALIA, C. P.; SOARES, L. H. D. B.; BODDEY, R. M. Mudanças ambientais: sequestro de carbono e emissão de gases de efeito estufa pelo solo. In: PRADO, R. B.; TURETTA, A. P. D.; ANDRADE, A. G. (Ed.). **Manejo e conservação do solo e da água no contexto das mudanças ambientais**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2010b. p. 377-388. 7 cap.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. **O solo como sistema**. Curitiba: Edição dos autores, 2011. 104 p.

VILELA, L.; MARTHA JUNIOR, G. B.; MACEDO, M. C. M.; MARCHÃO, R. L.; GUIMARÃES JÚNIOR, R.; PULROLNIK, K.; MACIEL, G. A. Sistemas de integração lavoura-pecuária na região do Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 10, p. 1127-1138, 2011.

VILELA, L.; MARTHA JUNIOR, G. B.; MARCHÃO, R. L. Integração lavoura-pecuária-floresta: a alternativa para intensificação do uso da terra. **Revista UFG**, Goiânia, v. 13, n. 13, p. 92-99, 2012. Revista UFG / Dezembro 2012 / Ano XIII nº 13

WANG, G.; LI, T.; ZHANG, W.; YU, Y. Impacts of agricultural management and climate change on future soil organic carbon dynamics in North China Plain. **Plos One**, San Francisco, v. 9, n. 4, p. 1-11, 2014.

ZAGATTO, E. **Isótopos de Carbono em Estudos Ambientais**. 2000. Disponível em: <[https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&ved=0CD8QFjAC&url=http%3A%2F%2Fapostilas.cena.usp.br%2FZagatto%2FFAN2-CarbonoAmbiente.doc&ei=Wof3UubhA4eSkQfL-IHQcw&usg=AFQjCNFXoC8M9a\\_QNndW8xApOImidPxA2w&sig2=jOL4F3Ja66tULSeJoutkYQ&bvm=bv.60983673,d.eW0](https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&ved=0CD8QFjAC&url=http%3A%2F%2Fapostilas.cena.usp.br%2FZagatto%2FFAN2-CarbonoAmbiente.doc&ei=Wof3UubhA4eSkQfL-IHQcw&usg=AFQjCNFXoC8M9a_QNndW8xApOImidPxA2w&sig2=jOL4F3Ja66tULSeJoutkYQ&bvm=bv.60983673,d.eW0)>. Acesso em: 09 Fev. 2014.

ZHANG, L.; YU, D.; SHI, X.; XU, S.; XING, S.; ZHAO, Y. Effects of soil data and simulation unit resolution on quantifying changes of soil organic carbon at regional scale with a biogeochemical process model. **Plos One**, San Francisco, v. 9, n. 2, p. 1-13, 2014.

### 3 ASSINATURA ISOTÓPICA E ESTOQUES DE CARBONO EM UM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO EM SISTEMAS DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA NA ZONA DE TRANSIÇÃO CERRADO-AMAZÔNIA

#### RESUMO

A emissão de gases de efeito estufa (GEE) na agropecuária é motivo frequente de estudos, assim, sistemas como a integração lavoura-pecuária-floresta (iLPF) vêm sendo avaliados por serem considerados promissores mitigadores de emissão de GEE e acumuladores de carbono. O objetivo do presente estudo foi avaliar a origem e a acumulação de C no solo após 3,5 anos de implantação de sistema iLPF na região da transição dos biomas Cerrado e Amazônia. Foram selecionadas duas áreas sob iLPF (iLPF1 e iLPF3, sistemas com uma linha e três linhas de *Eucalyptus urograndis* por renque, respectivamente) e uma pastagem no município de Nova Canaã do Norte, MT (latitude 10°38'13" sul; longitude 55°42'32" oeste). O solo foi um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, textura argila. A região possui clima do tipo Aw, clima tropical com estação seca definida. A área, cultivada desde 1998, foi convertida para sistema iLPF em 2009. Foram tomadas amostras de oito camadas (0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40; 0,40-0,60; 0,60-0,80 e 0,80-1,00 m) para avaliação da densidade, fertilidade, textura, teor de C e razão isotópica ( $^{13}\text{C}$ ) do solo. As amostragens nas áreas sob iLPF foram feitas respeitando a heterogeneidade intrínseca do sistema. Assim, dentro do iLPF, amostras foram coletadas da área de influência das árvores, da pastagem e da zona de transição. A análise dos estoques de C no solo foi realizada para as camadas de 0,0-0,3 e 0,0-1,0 m. A composição isotópica do solo foi afetada pela implantação do sistema iLPF. Em comparação à pastagem, o iLPF3 promoveu acumulação de C no solo em todas as posições de amostragem, enquanto no iLPF1 houve acumulação somente na linha de árvores e comportamento variável em relação às outras posições de amostragem. O componente florestal foi um fator importante na acumulação de C no solo. Conclui-se que o iLPF, no curto prazo, afetou os teores de C e N do solo e que o N foi limitante para a acumulação de carbono. Entretanto, novas avaliações com maior tempo de implantação do iLPF poderiam auxiliar na elucidação do comportamento do carbono no longo prazo nesse sistema.

*Palavras-chave:*  $^{13}\text{C}$ , delta  $^{13}\text{C}$ , pastagem degradada, carbono total do solo, nitrogênio total do solo.

# ISOTOPIC SIGNATURE AND CARBON STOCKS IN AN OXISOL IN INTEGRATED CROP-LIVESTOCK-FOREST SYSTEMS IN THE CERRADO-AMAZON TRANSITION ZONE

## ABSTRACT

Greenhouse gas (GHG) emissions in agriculture are commonly the objective of studies. Integrated crop-livestock-forest systems are gaining importance as they are considered promising for the mitigation of GHG emissions as well as are considered carbon sinks. The aim of this study was to evaluate the origin and accumulation of soil C after 3.5 years under iCLF deployment in the Cerrado - Amazon transition zone. Two areas under iCLF were selected (iLPF1 and iLPF3, systems with one and three rows of *Eucalyptus urograndis* by hedgerow, respectively) and a pasture in Nova Canaã do Norte, MT (latitude 10°38'13 "south, longitude 55°42 ' 32 'West). The soil was a clayey Red-Yellow Latosol (Oxisol). The climate of the region was Aw, tropical climate with well defined dry season. The areas were cultivated since 1998, and has been converted into iCLF in 2009. Soil samples were collected from 0.00 to 0.05; 0.05-0.10; 0.10-0.20, 0.20-0.30; 0.30-0.40; 0.40-0.60; 0.60-0.80 and 0.80-1.00 m layers to evaluate the bulk density, fertility, texture, C content and isotope ratio ( $^{13}\text{C}$ ) of the soil. In areas under iCLF, sampling was made respecting the intrinsic heterogeneity of the system. Thus, within the iCLF, samples were taken from the influence zone of trees, pasture and transition. Carbon stocks were analyzed for the 0.0 to 0.3 and from 0.0 to 1.0 m layers. The isotopic composition of the soil was affected by the implementation of iCLF system, and the forestry component was a major important factor in the accumulation of C in the soil. Compared to pasture, the iCLF3 promoted C accumulation in the soil at all sampling positions while in the iCLF1 there was accumulation only under the influence of trees. We concluded that iCLF affected soil C and N stocks in the short term, however, longer iCLF deployment time would be necessary to elucidate the impact of iCLF in the long-term.

*Key words:*  $^{13}\text{C}$ , delta 13C, pastagem degradada, total soil carbon, total soil nitrogen

### 3.1 INTRODUÇÃO

Quando da revolução verde, o uso de pacotes tecnológicos foi amplamente difundido, culminando em sistemas de uso do solo cada vez mais especializados para promover o aumento da produção agropecuária. Esse modelo de agricultura predatória, que considerava o solo como recurso inesgotável, conduziu ao depauperamento desse recurso com elevadas perdas de matéria orgânica. Neste cenário, a agricultura brasileira passou a enfrentar a redução da produtividade e o crescente uso de insumos agrícolas.

A verticalização da produção, no sentido de promover incrementos na

produção de alimentos, fibras e energia sem, contudo, promover abertura de novas áreas torna-se primordial para a agropecuária moderna. Essa também objetiva a eficiência econômica e produtiva, que poderão ser atingidas pela redução de custos em função do uso racional de insumos e diversificação das atividades agrícola e pecuária, o que confere ao produtor maior versatilidade na propriedade, com maior diversificação da produção e, assim, menor vulnerabilidade às oscilações do mercado. Outro objetivo é a eficiência ambiental, no sentido de que a atividade deve proporcionar ganhos ambientais como, por exemplo, menor emissão de gases causadores de efeito estufa e sequestro de C atmosférico (Urquiaga et al., 2010a; Loss et al., 2011; Salton et al., 2011; Bungenstab, 2012; Lemaire et al., 2014). O sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (iLPF) mostra-se, então, promissor em atender a essas demandas.

O Brasil assumiu, durante a 15<sup>a</sup> Conferência das Partes, um compromisso voluntário de redução das próprias emissões de gases de efeito estufa. Para o setor agropecuário, somente com a recuperação de pastagens degradadas e adoção de sistemas iLPF, é estimado um potencial de mitigação de 101 a 126 milhões Mg CO<sub>2</sub> equivalente (Mapa & MDA, 2012). Demonstrando o claro interesse público pela recuperação de pastagens, uma vez que somente o Brasil Central apresenta em torno de 80% dessas áreas em algum estágio de degradação (Balbino et al., 2012), utilizando sistemas integrados para este fim. Entretanto, devido às complexas interações entre os seus componentes, estudar a dinâmica do C do solo em agroecossistemas torna-se um desafio (Tornquist et al., 2009).

Em avaliações na estrutura de ecossistemas e em estudos dos efeitos de mudanças no uso do solo o isótopo <sup>13</sup>C é amplamente utilizado (Trivelin & Bendassolli, 2013). Por meio do enriquecimento ou do empobrecimento do isótopo leve (<sup>12</sup>C), que é o mais abundante, em relação ao mais pesado (<sup>13</sup>C), que é o mais raro, comparados à uma amostra padrão é possível realizar-se inferências sobre processos no ambiente (Silva et al., 2013). Em agroecossistemas, principalmente naqueles em que houve a substituição de florestas ou savanas por culturas C<sub>4</sub>, como por exemplo, as braquiárias ou milho, a investigação da dinâmica do C do solo na matéria orgânica do solo (MOS) e em suas frações também pode ser realizada com a utilização do isótopo <sup>13</sup>C, o que permite estudar a contribuição dos sistemas de culturas para a adição ou perda do C do solo.

Sistemas conservacionistas de produção, entre eles os sistemas integrados, como a iLPF, são comumente reportados como acumuladores de C no solo e, possivelmente, mitigadores das emissões de gases de efeito estufa. Em cultivos

consoiciados, principalmente com forrageiras no esquema de rotação, há maior estoque de C acumulado do que em sistemas contínuos ou em monocultivos de soja, mesmo em plantio direto (Salton et al., 2011). Entretanto, Baker et al. (2007) salientam que a crença de que sistemas conservacionistas favoreçam o sequestro de carbono pode ser apenas função da metodologia adotada no estudo. Ainda que os sistemas integrados de produção, como a iLPF, sejam apontados como sequestradores de C, a profundidade avaliada e o método utilizado para o cálculo dos estoques devem, então, ser cuidadosamente selecionados, uma vez que muitos estudos ignoram a possível redistribuição do C em diferentes camadas de solo induzida pelo preparo (Luo et al., 2010). Neste sentido, possíveis ganhos de C no solo podem desaparecer se a amostragem incluir as camadas mais profundas (Baker et al., 2007), ou se a correção para massa equivalente de solo por camada, para eliminar o efeito dos diferentes sistemas de produção ou de manejo do solo para o seu adensamento, for aplicada (Sisti et al., 2004; Urquiaga et al., 2010a). Por sua vez, Boddey et al. (2010) encontraram estoques de C em plantio direto significativamente superiores do que em plantio convencional, principalmente quando considerada a camada até 1,0 m.

A dinâmica do C em sistemas iLPF pode ser bastante diferente daquela dos sistemas integrados sem a presença do componente arbóreo, principalmente, pela estratificação conferida  área, que apresenta linhas de árvores intercaladas com áreas de cultivo de gros ou pastagem. A presença das árvores no sistema, por exemplo, exerce influência no comportamento animal e, portanto, na deposição de excretas, resultando em aporte diferenciado de material orgânico na rea. Ademais, o componente arbóreo por si só pode resultar em diferenças na acumulação de C no solo, seja pelo diferente ciclo de cultivo adotado, seja pelos diferentes arranjos e espécies arbóreas que podem ser utilizados ou mesmo pelo sombreamento exercido na área de cultivo intercalar. Poucos estudos abordam a dinâmica do C em sistemas iLPF, principalmente em função da sua relativamente recente adoção em larga escala. Ademais, a ampla gama de arranjos, espécies e ciclos de cultivo *vs.* pastejo que podem ser adotados no sistema, conferem versatilidade ao sistema e um vasto campo de estudos ainda não explorado.

Neste sentido, o objetivo do presente estudo foi avaliar a origem do C do solo e o estoque de C e N do solo em função da posição de amostragem e em diferentes profundidades em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta no norte de Mato Grosso.

## 3.2 MATERIAL E MÉTODOS

### *Área de estudo*

A área de estudo, localizada no município de Nova Canaã do Norte, MT, situa-se na Fazenda Gamada (latitude 10°38'13" sul; longitude 55°42'32" oeste), é parte de uma das Unidades de Referência Tecnológica da rede de URTs para sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (iLPF)<sup>1</sup> da Embrapa, iLPF Nova Canaã do Norte/MT. A fazenda encontra-se na região de transição dos biomas Cerrado-Amazônia (IBGE, 2004), tendo sido coberta por vegetação nativa classificada como Floresta Ombrófila. O solo, do tipo Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, com textura argila e conteúdo médio de 592 g kg<sup>-1</sup> de argila e 349 g kg<sup>-1</sup> de areia, e caulinita como argilomineral predominante, em relevo suave ondulado. O clima, de acordo com a classificação de Köppen, é do tipo Aw, ou seja, clima tropical com estação seca definida. A precipitação média anual dos últimos trinta anos (1983 ó 2013) foi 1505,1 mm (Agritempo, 2014), das quais aproximadamente 90% são concentradas entre outubro e abril. A temperatura média do ar é aproximadamente 23°C.

Para avaliação foram selecionadas na propriedade duas áreas com sistema de iLPF, sendo uma com renques de uma linha de árvores de eucalipto (*Eucalyptus urograndis*) (iLPF1) e a outra com renques de três linhas de árvores de eucalipto (iLPF3). O espaçamento entre plantas na linha foi de 2 m e, para o caso da iLPF3, 3 m entre linhas de árvores. Em ambas as áreas os renques foram espaçados de 20 m. Como referência para os iLPFs foi selecionada uma pastagem degradada, sendo ela parte remanescente da pastagem sobre a qual os iLPFs foram instalados. Na região não houve área sob vegetação nativa comparável com a pastagem e os iLPFs para estudos de acumulação de carbono no solo. Entretanto, dado o comportamento previsível dos isótopos estáveis nos compartimentos ambientais, foi utilizada uma área de vegetação nativa próxima somente para a comparação da assinatura isotópica do solo.

### *Histórico da área e manejo da integração lavoura-pecuária-floresta*

A floresta nativa foi removida da área por volta do ano de 1998 para dar início

---

<sup>1</sup> Disponível no endereço eletrônico: <http://www.cnpgl.embrapa.br/nova/silpf/index.php>

ao uso agrícola. Inicialmente a área foi manejada com pastagem (*Urochloa spp.*) por dois anos. Após foi introduzida a agricultura, sendo cultivado arroz de sequeiro (*Oryza sativa* L.) por dois anos (safras 2000/01 e 2001/02) e soja (*Glycine max* L.) seguida de milho (*Zea mays* L.) em segunda safra pelos próximos quatro anos agrícolas. Na sequência foi introduzida pastagem novamente, permanecendo na área até o final do ano de 2008. Finalmente, no ano agrícola 2008/09, no mês de janeiro, em parte da área (40 ha) foi instalada a iLPF. Essa área foi dividida em oito piquetes com diferentes arranjos de sistema iLPF e com diferentes espécies arbóreas.

Para o plantio das espécies arbóreas do sistema, foi realizada subsolagem (somente nas linhas de plantio das mudas de eucalipto) com uso de subsolador de três hastes a 0,5 m de profundidade, as mudas foram plantadas com uso de 210 kg ha<sup>-1</sup> da fórmula 01-18-18, e a cultura intercalar cultivada foi o arroz de sequeiro variedade BRS Monarca em sistema de plantio direto, com aplicação de 370 kg ha<sup>-1</sup> da mesma fórmula e 130 kg ha<sup>-1</sup> de ureia em cobertura. A colheita do arroz foi realizada após 115 dias do plantio e a produtividade foi de 3,60 Mg ha<sup>-1</sup>. Depois da colheita do arroz a área foi deixada em pousio, havendo rebrota da pastagem.

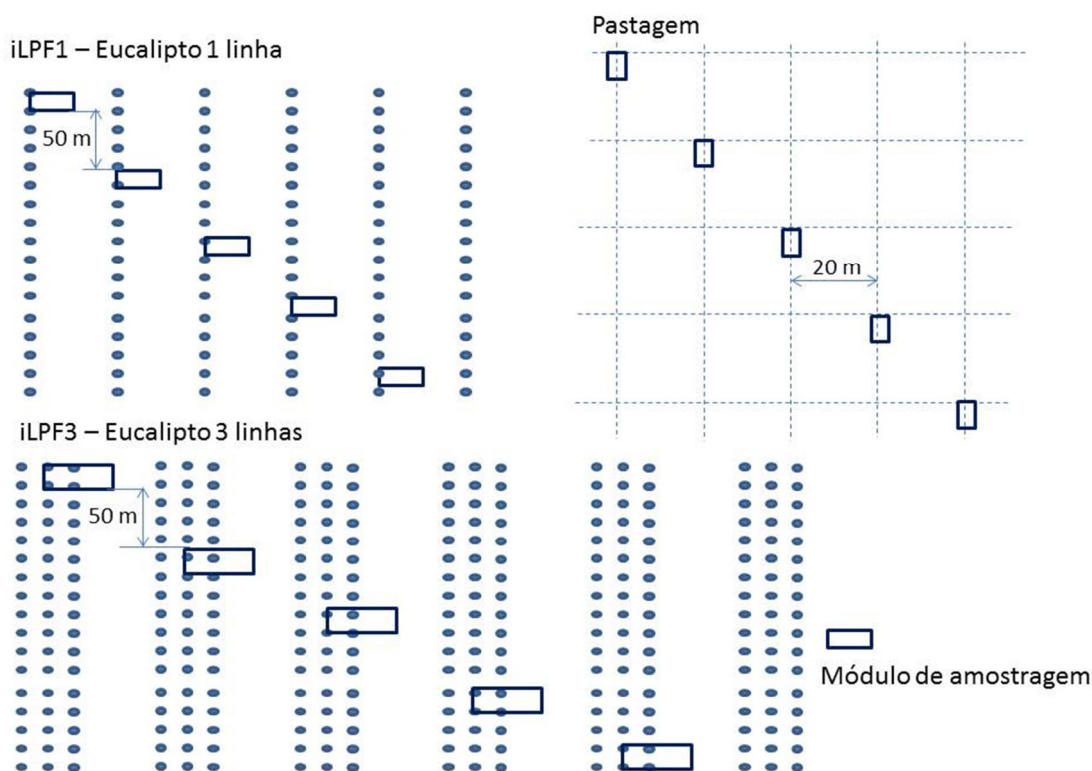
No segundo ano agrícola da iLPF a cultura intercalar foi a soja variedade BRS Flora, com aplicação de 318 kg ha<sup>-1</sup> de superfosfato simples no plantio e 105 kg ha<sup>-1</sup> de cloreto de potássio em cobertura. A soja foi colhida 106 dias após a semeadura, com produtividade média de 3,55 Mg ha<sup>-1</sup>. Foi realizado o plantio de arroz precoce como segunda safra, com adubação de plantio de 324 kg ha<sup>-1</sup> de 05-22-10 e 86 kg ha<sup>-1</sup> de ureia e 10 kg ha<sup>-1</sup> de cloreto de potássio em cobertura, entretanto, em função da falta de chuvas a colheita foi inviabilizada.

Na safra 2010/11 novamente foi cultivada soja precoce, variedade BRS Flora, semeada com adubação de 400 kg ha<sup>-1</sup> de superfosfato simples e aplicação de 69 kg ha<sup>-1</sup> de cloreto de potássio em cobertura. A colheita da soja foi realizada 112 dias após o plantio, em fevereiro de 2011, com produtividade de 2,90 Mg ha<sup>-1</sup>. Em seguida à colheita, visando a introdução de animais na área para iniciar a fase pecuária do sistema, foi semeada pastagem de *U. ruziziensis*, utilizando sementes misturadas ao adubo, semeadas à lanço por um distribuidor de calcário, seguida da passagem de uma grade niveladora com discos fechados para cobertura das sementes, atingindo, no máximo 3 cm de profundidade. Devido ao baixo pegamento da forrageira na área da iLPF1, em outubro do mesmo ano houve ressemeadura da forrageira. Na propriedade foram criados bovinos de corte obtidos

pelo cruzamento industrial da raça nelore com rúbia galega, em pastejo rotacionado entre os piquetes com iLPF.

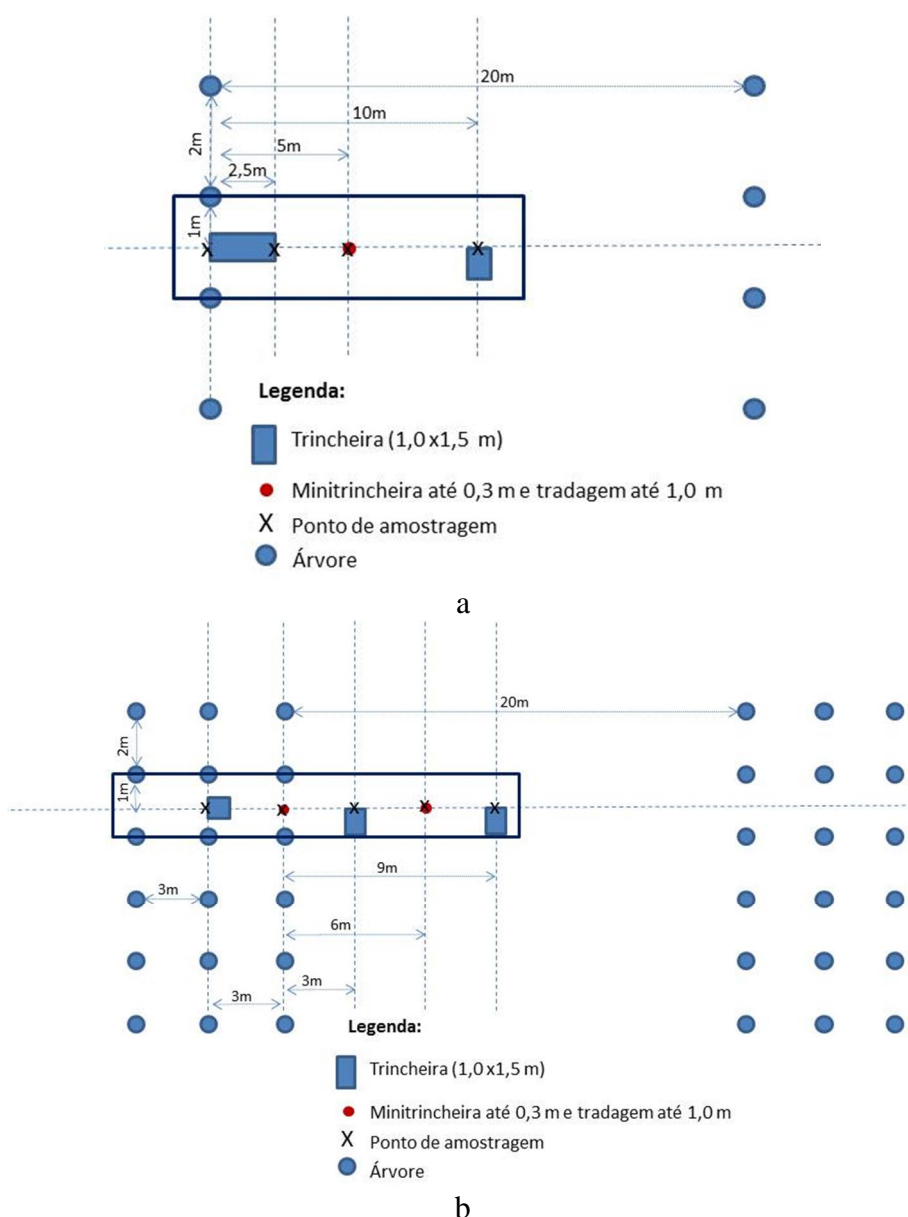
#### *Amostragem e análises de solo*

As amostragens foram realizadas em conjuntos de trincheiras, ora denominados módulos de amostragem, dispostos transversalmente nas áreas investigadas (iLPF1 e iLPF3). Tais módulos amostrais (n=5) distavam 50 m, sempre à direita ou à esquerda, do módulo imediatamente anterior e no renque subsequente ao último amostrado (abaixo ou acima). Na área de referência (pastagem), devido à não estratificação da área, os módulos amostrais (n=5) continham apenas uma trincheira, sendo dispostos, do mesmo modo, transversalmente à área amostrada, distantes 20 m à direita ou à esquerda e 20 m acima ou abaixo do anterior (Figura 3.1).



**Figura 3.1.** Esquema dos módulos de amostragem nas áreas de integração lavoura-pecuária-floresta (iLPF) com renques de uma e de três linhas de árvores (a); esquema da amostragem na área de referência pastagem convencional contínua (b).

Na iLPF1 cada módulo amostral continha quatro pontos de amostragem, sendo o primeiro ponto na linha de árvores (iLPF1-L), e os demais distantes 2,5 (iLPF1-2,5); 5,0 (iLPF1-5) e 10 (iLPF1-10) metros de distância da linha de árvores (Figura 3.2 a). Na iLPF3 cada módulo amostral continha cinco pontos de amostragem, sendo eles a linha central (iLPF3-LC), a linha externa (iLPF3-LE) dos renques de árvores e os demais distantes 3,0 (iLPF3-3), 6,0 (iLPF3-6) e 9,0 (iLPF3-9) metros de distância da linha externa de árvores (Figura 3.2 b). As amostras de solo foram coletadas em trincheiras nas camadas 0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40; 0,40-0,60; 0,60-0,80 e 0,80-1,00 m.



**Figura 3.2.** Esquema das trincheiras de amostragem dentro de cada módulo amostral para iLPF com renques de uma linha de árvores (a); e para iLPF com renques de três linhas de árvores (b).

Para a determinação da densidade do solo, foram coletadas amostras indeformadas, em triplicata, em cada camada no meio do intervalo de cada profundidade, exceto para as camadas 0-0,05 e 0,05-0,1 m, que foram coletadas em todo o intervalo, utilizando anéis volumétricos. Amostras deformadas foram coletadas para determinação da textura, fertilidade, C e N totais (Tabela 3.1) e razão isotópica ( $^{13}\text{C}$ ) do solo. Para garantir maior representatividade da amostragem, foram retiradas, lateralmente a cada trincheira, nove amostras, coletadas por camada até 0,20 m (intervalo que corresponde às três primeiras camadas), utilizando trado calador, para ser adicionadas a cada amostra coletada. Também foram coletadas amostras de tecido vegetal, nos mesmos pontos de amostragem para solos, sendo material vegetal morto (depositado sobre o solo) e material fresco para realização da análise elementar (C e N totais) e determinação do  $^{13}\text{C}$  desse material.

As amostras de solo secas ao ar foram peneiradas a 2 mm antes das análises químicas, para remoção de tecidos de plantas, raízes e outros materiais orgânicos maiores que 2 mm. Para a análise de C e N total e de razão isotópica foi tomada uma alíquota de 10 ml de cada amostra para moagem em moinho de bolas, utilizando frascos e esferas de porcelana, por 24 h. Estas foram retiradas e passadas em peneira NBR 125  $\mu\text{m}$  (115 Tyler), a parte que ficou retida na peneira foi moída manualmente em graal de porcelana até que todo o conteúdo da alíquota passasse pela referida peneira.

As amostras de tecido vegetal coletadas foram armazenadas em sacos de papel Kraft e secas em estufa de circulação de ar forçado a  $60^\circ\text{C}$  até atingir massa constante. Após secas as amostras foram moídas em moinho tipo Wiley e depois em moinho de bolas, utilizando cápsula e esfera de óxido de zircônia, com frequência de 3000 rpm por dois minutos, até o material resultante da moagem passar em peneira NBR 125  $\mu\text{m}$ .

As frações argila, areia e silte do solo foram determinadas utilizando o método do densímetro e a densidade do solo pelo método dos anéis volumétricos (Embrapa, 2011). O pH do solo foi determinado em água e solução de 1M KCl (1:25 solo/solução); o cálcio e magnésio trocável foi extraído com  $1 \text{ mol L}^{-1}$  KCl e o potássio e fósforo extraível com solução Mehlich 1. Os íons cálcio e magnésio foram determinados com fotometria de chama e a concentração dos íons potássio e fósforo com colorimetria usando espectrofotômetro. A acidez total (H+Al) foi medida com titulação após extração com acetato de cálcio a pH 7. A soma de bases e a capacidade de troca catiônica foram calculadas segundo Embrapa (2011).

**Tabela 3.1.** Fertilidade do solo, média e erro padrão (EP), para as camadas de Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, Fazenda Gamada, Nova Canaã do Norte, MT

Atributo	Camada, m															
	0,0-0,05	EP	0,05-0,1	EP	0,1-0,2	EP	0,2-0,3	EP	0,3-0,4	EP	0,4-0,6	EP	0,6-0,8	EP	0,8-1,0	EP
pH (água)	5,49	0,07	5,16	0,06	5,09	0,05	5,01	0,06	5,07	0,07	5,14	0,07	5,28	0,08	5,22	0,07
pH (KCl)	4,87	0,08	4,48	0,04	4,39	0,03	4,39	0,03	4,48	0,05	4,61	0,06	4,98	0,08	5,21	0,09
Ca (mmolc dm <sup>-3</sup> )	21,46	1,48	9,38	0,77	7,28	0,81	4,78	0,61	4,41	0,56	3,81	0,43	3,66	0,36	3,47	0,52
Mg (mmolc dm <sup>-3</sup> )	13,24	0,95	5,66	0,38	3,70	0,25	2,68	0,15	2,22	0,12	2,25	0,12	2,16	0,13	2,28	0,27
Al (mmolc dm <sup>-3</sup> )	2,58	0,29	4,84	0,39	5,74	0,41	5,84	0,38	4,91	0,51	3,72	0,38	2,16	0,23	1,53	0,15
H+Al (mmolc dm <sup>-3</sup> )	52,42	2,20	55,42	1,60	50,84	1,36	43,72	1,31	37,84	1,55	31,72	1,29	24,22	1,28	19,22	1,16
P (mg dm <sup>-3</sup> )	6,42	0,49	5,50	0,53	3,62	0,52	1,72	0,12	1,37	0,05	1,24	0,03	1,18	0,02	1,14	0,02
K (mg dm <sup>-3</sup> )	75,74	5,58	47,80	3,87	34,82	2,66	22,44	1,84	19,53	2,29	19,56	2,60	18,34	2,44	17,25	2,79
Cu (mg dm <sup>-3</sup> )	2,27	0,20	1,81	0,09	1,34	0,05	1,11	0,01	1,10	0,01	1,08	0,01	1,07	0,01	1,06	0,01
Zn (mg dm <sup>-3</sup> )	4,38	0,48	2,82	0,20	1,84	0,13	1,26	0,04	1,15	0,03	1,12	0,01	1,10	0,01	1,08	0,01
Fe (mg dm <sup>-3</sup> )	87,36	6,28	72,88	3,32	72,54	3,26	56,78	3,19	49,31	5,71	26,69	3,01	13,66	1,76	9,50	1,06
Mn (mg dm <sup>-3</sup> )	15,74	1,28	7,48	0,76	4,98	0,51	3,24	0,26	3,06	0,30	2,63	0,25	1,97	0,15	1,56	0,12
MOS (g kg <sup>-1</sup> )	35,16	0,81	24,49	0,43	20,51	0,44	16,82	0,31	15,17	0,34	13,47	0,26	11,86	0,28	10,90	0,25
D (g cm <sup>-3</sup> )	1,20	0,01	1,23	0,01	1,27	0,01	1,24	0,01	1,20	0,01	1,12	0,01	1,07	0,01	1,00	0,01
Areia (g kg <sup>-1</sup> )	408,42	8,52	382,96	8,53	355,36	8,97	318,56	9,99	290,06	11,79	276,53	8,42	284,65	11,35	277,55	12,96
Argila (g kg <sup>-1</sup> )	510,91	10,33	549,97	10,93	582,37	11,38	620,77	12,54	645,24	15,68	669,10	10,88	660,35	14,30	663,08	15,64
Silte (g kg <sup>-1</sup> )	80,67	6,05	67,07	5,75	62,27	4,56	60,67	4,21	64,70	7,93	54,38	4,53	55,00	6,71	59,38	5,93
C (g kg <sup>-1</sup> )	24,63	0,53	17,20	0,36	14,23	0,43	11,46	0,27	10,19	0,31	8,78	0,23	7,34	0,25	6,65	0,23
N (g kg <sup>-1</sup> )	2,09	0,04	1,48	0,03	1,21	0,03	0,98	0,03	0,88	0,03	0,74	0,03	0,59	0,03	0,54	0,03
C:N	11,81	0,13	11,65	0,17	11,78	0,22	11,86	0,22	11,77	0,27	12,16	0,39	13,08	0,61	12,91	0,63

Alíquotas de 10 a 60 mg de solo e de 3 mg de tecido vegetal foram pesadas, em duplicata, para análise de C e N total, pelo método de combustão seca à alta temperatura, em um analisador elementar (Elemental Vario Isotope Cube, Elemental Inc. Hanau, Germany), no modo CN à temperatura de 950°C na coluna de combustão e a 660°C na coluna de redução e a composição isotópica das amostras de solo foi analisada em espectrômetro de massas (Isoprime, Elemental Inc. Hanau, Germany) acoplado em série ao analisador elementar. Os resultados para razão isotópica foram expressos  $\delta$  (delta por mil) representando a razão  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  das amostras em relação ao padrão internacional PDB (rocha calcária Belemnite americana, da formação geológica denominada Pee Dee da Carolina do Norte, EUA, também denominada Pee Dee Belemnite) padronizadas na notação da convenção internacional ( $\delta$ ).

Para poder avaliar a capacidade do sistema para acumular carbono no solo, eliminando o efeito de compactação do mesmo, a massa de solo por unidade de área e camada (volume equivalente) foi corrigida para massa equivalente de solo como descrito por Ellert & Bettany (1995), utilizando a área de Pastagem como referência, esse cálculo foi realizado por camada para cada ponto amostrado de cada área de iLPF. Após o cálculo do estoque de C corrigido para cada ponto foi calculado o estoque de C para a área total de iLPF pela média ponderada de cada ponto amostrado, colocando como peso a área de abrangência de cada ponto. A área de abrangência considerada foi a metade da distância entre os pontos amostrados. As Equações 1 e 2 foram utilizadas para o cálculo do estoque médio de C para as áreas iLPF1 e iLPF3, respectivamente.

$$C_{iLPF1} = \frac{[(C_{iLPF1-L} \times 1,25) + (C_{iLPF1-2,5} \times 2,5) + (C_{iLPF1-5} \times 2,75) + (C_{iLPF1-10} \times 2,5)]}{10} \quad (1)$$

Em que:

$C_{iLPF1}$  = estoque médio de carbono corrigido para a massa de solo para a área total da iLPF1;

$C_{iLPF1-L}$  = estoque médio de C corrigido para a massa equivalente para o ponto iLPF1 na linha de árvores;

$C_{iLPF1-2,5}$  = estoque médio de C corrigido para a massa equivalente para o ponto iLPF1 a 2,5 m de distância da linha de árvores;

$C_{iLPF1-5}$  = estoque médio de C corrigido para a massa equivalente para o ponto iLPF1 a 5 m de distância da linha de árvores;

$C_{iLPF1-10}$  = estoque médio de C corrigido para a massa equivalente para o ponto iLPF1 a 10 m de distância da linha de árvores;

$$C_{iLPF3} = \frac{[(C_{iLPF3-LC} \times 1,5) + (C_{iLPF3-LE} \times 3) + (C_{iLPF3-3} \times 3) + (C_{iLPF3-6} \times 3) + (C_{iLPF3-9} \times 2,5)]}{13} \quad (2)$$

Em que:

$C_{iLPF3}$  = estoque médio de carbono corrigido para a massa de solo para a área total da iLPF3

$C_{iLPF3-LC}$  = estoque médio de C corrigido para a massa equivalente para o ponto iLPF3 na linha central do renque de árvores;

$C_{iLPF3-LE}$  = estoque médio de C corrigido para a massa equivalente para o ponto iLPF3 na linha externa do renque de árvores;

$C_{iLPF3-3}$  = estoque médio de C corrigido para a massa equivalente para o ponto iLPF3 a 3 m de distância da linha externa do renque de árvores;

$C_{iLPF3-6}$  = estoque médio de C corrigido para a massa equivalente para o ponto iLPF3 a 6 m de distância da linha externa do renque de árvores;

$C_{iLPF3-9}$  = estoque médio de C corrigido para a massa equivalente para o ponto iLPF3 a 9 m de distância da linha externa do renque de árvores.

### *Análise estatística*

Devido à intrínseca heterogeneidade das áreas sob iLPF, causada pelo manejo, as posições de amostragem dentro de cada iLPF foram consideradas como tratamentos individuais, totalizando em nove, conforme descrito anteriormente, além da pastagem contínua (referência). A normalidade dos dados foi avaliada pelo teste de Shapiro-Wilk. Os dados descritivos do solo como teor de argila, areia, densidade e razão isotópica foram avaliados, para as oito camadas de solo individualmente, pela análise de variância e comparados pelo teste Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). Para isso foi suposto um delineamento inteiramente casualizado, com cinco pseudorrepetições, por ser o delineamento que agrega menor erro à análise. As análises foram feitas com auxílio do Programa R (R Development Core Team, 2011). Os estoques de C e N foram avaliados para as camadas de 0,0-0,3 e 0,0-1,00 m. Neste caso, cada um dos tratamentos foi comparado com o tratamento referência (pastagem contínua) usando o teste T pareado com correção de Bonferroni, para as nove

comparações realizadas ( $\alpha = 0,05$ ).

### 3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### *Validação da área para estudo de acumulação de Carbono*

Uma vez que o principal objetivo do estudo foi avaliar o efeito de sistemas iLPF na acumulação de C no solo, há necessidade de que as áreas estudadas exibam semelhanças pedogenéticas para que sejam comparáveis do ponto de vista da dinâmica do C, a fim de que possíveis diferenças causadas pelo manejo aplicado possam ser avaliadas. Neste estudo três critérios foram utilizados para avaliar a comparabilidade das áreas sob investigação com a pastagem. O primeiro foi o teor de argila (Tabela 3.2), o segundo, a densidade do solo (Tabela 3.3) e, como terceiro, a razão isotópica do carbono ( $\delta^{13}\text{C}$ ) ao longo do perfil.

**Tabela 3.2.** Teor médio de argila nas camadas 0,0-0,3 e 0,0-1,0 m do Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta e pastagem contínua degradada em Nova Canaã do Norte, MT.

Tratamento	Argila, g kg <sup>-1</sup>	
	0,0-0,3	0,0-1,0
	----- m -----	
Pastagem	48,72 b	55,85 a
iLPF1-L	53,72 ab	57,67 a
iLPF1-2,5	58,92 ab	62,11 a
iLPF1-5	57,98 ab	58,42 a
iLPF1-10	55,58 ab	60,13 a
iLPF3-LC	60,16 ab	61,42 a
iLPF3-LE	59,35 ab	65,02 a
iLPF3-3	56,79 ab	59,39 a
iLPF3-6	56,92 ab	60,43 a
iLPF3-9	61,63 a	64,43 a

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo Teste de Tukey ( $\alpha = 5\%$ )

iLPF1: sistema com 1 linha de árvores de eucalipto por renque, iLPF1-L: amostragem na linha de árvores no sistema iLPF1, iLPF1-2,5, iLPF1-5 e iLPF1-10: amostragem em 2,5, 5 e 10 m de distância do renque de árvores no sistema iLPF1; iLPF3: sistema com 3 linhas de árvores de eucalipto por renque, iLPF3-LC: amostragem na linha central de árvores no sistema iLPF3, iLPF3-LE: amostragem na linha externa de árvores no sistema iLPF3, iLPF3-3, iLPF3-6 e iLPF3-9: amostragem em 3, 6 e 9 m de distância da linha externa de árvores no sistema iLPF3.

**Tabela 3.3.** Densidade média das camadas do Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta e pastagem contínua degradada em Nova Canaã do Norte, MT

Tratamento	Camada, m							
	0,0-0,05	0,05-0,1	0,1-0,2	0,2-0,3	0,3-0,4	0,4-0,6	0,6-0,8	0,8-1,0
	----- g cm <sup>-3</sup> -----							
Pastagem	1,32 a	1,40 a	1,41 a	1,31 a	1,24 a	1,20 a	1,11 a	1,06 a
iLPF1-L	1,22 ab	1,19 bc	1,22 cde	1,27 ab	1,24 a	1,13 ab	1,11 a	1,02 a
iLPF1-2,5	1,13 b	1,23 bc	1,36 ab	1,26 ab	1,19 ab	1,14 ab	1,09 a	1,00 a
iLPF1-5	1,13 b	1,24 bc	1,29 bcd	1,28 ab	1,22 a	1,13 ab	1,10 a	1,02 a
iLPF1-10	1,11 b	1,29 ab	1,31 abc	1,27 ab	1,17 ab	1,10 b	1,09 a	1,03 a
iLPF3-LC	1,17 ab	1,16 bc	1,13 e	1,20 bc	1,20 ab	1,07 b	1,06 a	0,99 a
iLPF3-LE	1,17 ab	1,13 c	1,18 de	1,17 c	1,16 ab	1,09 b	1,03 a	0,98 a
iLPF3-3	1,22 ab	1,23 bc	1,23 cde	1,23 abc	1,12 b	1,08 b	1,02 a	0,98 a
iLPF3-6	1,22 ab	1,20 bc	1,22 cde	1,21 bc	1,16 ab	1,09 b	1,03 a	0,98 a
iLPF3-9	1,31 a	1,27 ab	1,26 bcd	1,23 bc	1,16 ab	1,07 b	1,01 a	0,96 a

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo Teste de Tukey ( $\alpha = 5\%$ )

iLPF1: sistema com 1 linha de árvores de eucalipto por renque, iLPF1-L: amostragem na linha de árvores no sistema iLPF1, iLPF1-2,5, iLPF1-5 e iLPF1-10: amostragem em 2,5, 5 e 10 m de distância do renque de árvores no sistema iLPF1; iLPF3: sistema com 3 linhas de árvores de eucalipto por renque, iLPF3-LC: amostragem na linha central de árvores no sistema iLPF3, iLPF3-LE: amostragem na linha externa de árvores no sistema iLPF3, iLPF3-3, iLPF3-6 e iLPF3-9: amostragem em 3, 6 e 9 m de distância da linha externa de árvores no sistema iLPF3.

Em uma avaliação geral dos perfis amostrados, as áreas estudadas apresentaram textura argila tanto na camada 0,0-0,3, quanto na camada 0,0-1,0 m. Em ambas as camadas os teores de argila foram comparáveis, exceto na posição iLPF3-9, que apresentou textura comparável às outras posições das iLPFs, porém, diferiu da textura da pastagem de referência na camada 0,0-0,3 m. A textura do solo, principalmente os teores de partículas finas (argila+silte), influencia profundamente a acumulação do C no solo devido à maior retenção das substâncias orgânicas coloidais na superfície dos argilominerais (Silva & Mendonça, 2007; Bayer et al., 2011; Coser et al., 2012; Sato, 2013), combinada com a maior superfície exibida por solos mais argilosos, em comparação com solos arenosos. Desse modo, esse único tratamento (posição iLPF3-9) não poderá ser comparado com a pastagem.

Com relação à densidade do solo, é possível observar na Tabela 3.3 que o uso e manejo do solo afetou sua densidade até 0,6 m de profundidade. Entretanto, o fato de que a densidade nas camadas mais profundas do solo é estatisticamente igual em todas as áreas estudadas reforça o argumento da sua origem similar e, conseqüentemente, comparabilidade entre elas. A pastagem foi a área que, de modo geral, apresentou as maiores médias de densidade até a camada de 0,6 m de profundidade, demonstrando sinais de degradação física do solo, todavia, não houve maior efeito da posição da amostragem

dentro dos iLPFs. A pressão de pastejo exercida na pastagem contínua associada à baixa produção da gramínea pode ser uma explicação para a maior densidade apresentada.

No estudo da dinâmica do C no solo, admite-se que a composição isotópica ( $\delta^{13}\text{C}$ ) do C do solo (produto) refletirá a composição isotópica do material vegetal de sua cobertura (fonte), enriquecido de 1 a 2‰, devido à respiração do solo e decomposição da matéria orgânica (Zagatto, 2000). Na Tabela 3.4 é apresentada a assinatura isotópica do material vegetal nas áreas estudadas.

**Tabela 3.4.** Razão isotópica ( $^{13}\text{C}$  (‰)) de tecidos vegetais com indicação do provável ciclo fotossintético e relação C:N dos tecidos vegetais em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta e pastagem degradada em Nova Canaã do Norte, MT

Tratamento	$^{13}\text{C}$ (‰)	Ciclo fotossintético	$^{13}\text{C}$ (‰)	Ciclo fotossintético	Relação C:N	Relação C:N
	Tecido vegetal Morto		Tecido vegetal Vivo		Tecido vegetal Morto	Tecido vegetal Vivo
Pastagem	-12,74 <sup>1</sup>	C4	-	-	27,99	-
iLPF1-L	-27,76	C3	-23,29	C3	54,95	19,56
iLPF1-2,5	-28,87	C3	-13,49	C4	36,08	21,25
iLPF1-5	-26,07	C3	-12,65	C4	31,79	20,98
iLPF1-10	-25,24	C3	-13,42	C4	28,87	21,38
iLPF3-LC	-23,48	C3	-20,23	C3	42,73	31,86
iLPF3-LE	-26,71	C3	-19,77	C3/C4	62,41	30,72
iLPF3-3	-19,18	C3/C4	-13,10	C4	27,97	28,50
iLPF3-6	-14,08	C4	-12,01	C4	32,16	33,24
iLPF3-9	-15,53	C4	-12,38	C4	22,62	30,55

<sup>1</sup> Tecido vegetal coletado vivo e morto coletado conjuntamente.

iLPF1: sistema com 1 linha de árvores de eucalipto por renque, iLPF1-L: amostragem na linha de árvores no sistema iLPF1, iLPF1-2,5, iLPF1-5 e iLPF1-10: amostragem em 2,5, 5 e 10 m de distância do renque de árvores no sistema iLPF1; iLPF3: sistema com 3 linhas de árvores de eucalipto por renque, iLPF3-LC: amostragem na linha central de árvores no sistema iLPF3, iLPF3-LE: amostragem na linha externa de árvores no sistema iLPF3, iLPF3-3, iLPF3-6 e iLPF3-9: amostragem em 3, 6 e 9 m de distância da linha externa de árvores no sistema iLPF3.

A abundância natural de  $^{13}\text{C}$  nos resíduos de plantas coletados nas áreas sob investigação, de modo geral, apresentou um maior empobrecimento em  $^{13}\text{C}$  para tecido vegetal morto em todos os pontos observados na iLPF1, iLPF3-LC e iLPF3-LE, indicando que nessas posições há maior presença de plantas de ciclo fotossintético C3 (Tabela 3.4). As plantas que fotossintetizam o C somente pelo ciclo de Calvin, por meio da enzima ribulose 1,5 bifosfato carboxilase/oxigenase (Rubisco), discriminam mais intensamente o  $^{13}\text{C}$  e por isso apresentam valores de  $^{13}\text{C}$  mais baixos, em torno de -27‰, variando entre -20‰ a -34‰. Já as plantas de ciclo C4 fixam o C tanto pela Rubisco como pela enzima fosfoenolpiruvato carboxilase (PEPcase), que tem maior afinidade pelo  $^{13}\text{C}$  e, portanto, apresentam valores de  $^{13}\text{C}$  mais altos, em torno de -13‰, com variação de -7‰ a -17‰

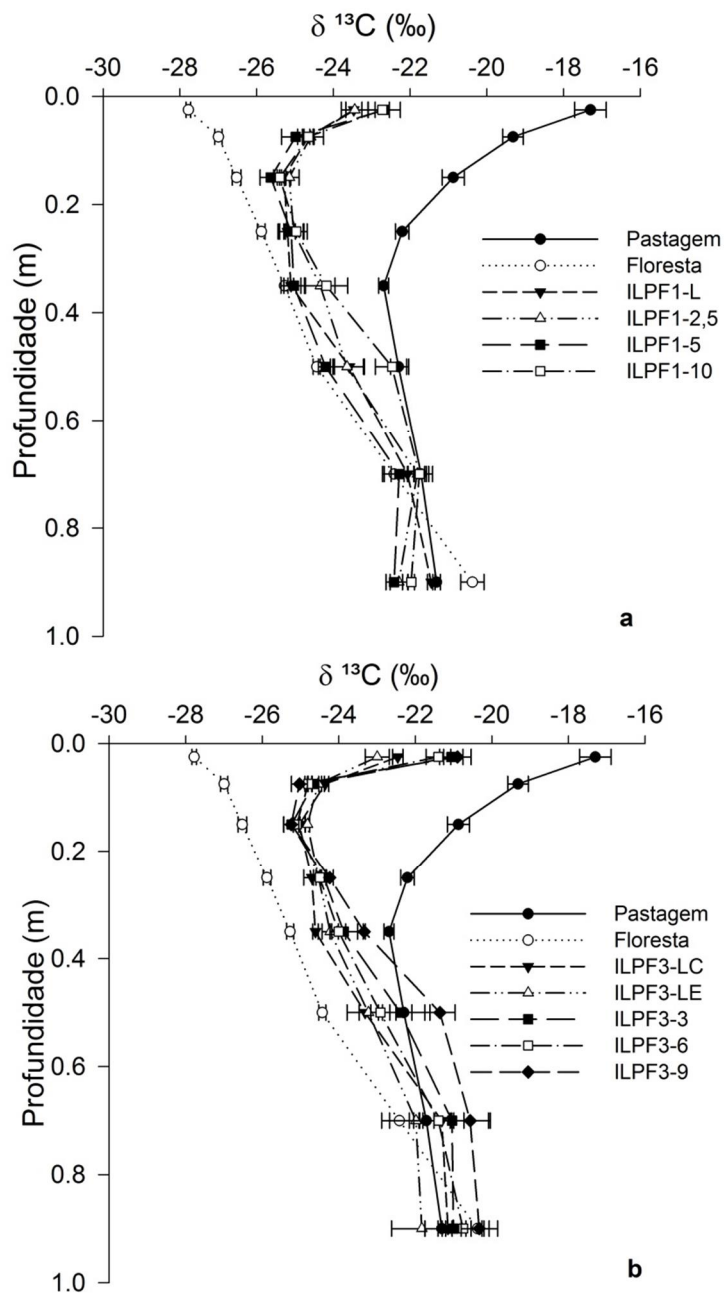
(Zagatto, 2000; Pereira & Benedito, 2007; Trivelin & Bendassolli, 2013).

Nas posições amostradas iLPF1-2,5, iLPF1-5 e iLPF1-10, ao contrário do esperado, principalmente para as duas últimas posições, a serapilheira coletada apresentou um elevado empobrecimento em  $^{13}\text{C}$ , caracterizando presença elevada de plantas C3. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de esta área ter apresentado baixo estabelecimento inicial da pastagem quando de sua implantação e ter sido requerida ressemeadura. Como relatado no histórico desse piquete, a sementeira da pastagem ocorreu em fevereiro do ano de 2011, após a colheita da soja semeada como cultura intercalar, e em outubro do mesmo ano foi realizada nova sementeira. Dado que a coleta de amostras para o presente estudo foi realizada em fevereiro de 2012, a pastagem ainda estava em formação nessa área. Outra característica constatada *in loco* foi a elevada presença de espécies daninhas na área, o que também pode reduzir a presença relativa do  $^{13}\text{C}$ .

A posição iLPF3-3 apresenta sinal intermediário, demonstrando claramente que esse ponto está na transição entre a linha de árvores (C3) e a área de pastagem (C4). Já nas posições iLPF3-6 e iLPF3-9, a serapilheira apresentou sinal enriquecido em  $^{13}\text{C}$ , justificado pelo bom pegamento da pastagem e baixa infestação de invasoras.

Quando da análise do tecido vegetal coletado vivo, somente na área sob as árvores nos sistemas de integração é que o sinal isotópico foi mais característico de plantas C3, entretanto, na linha externa de árvores da iLPF3 (iLPF3-LE) observou-se diluição maior das fontes  $^{12}\text{C}$  com  $^{13}\text{C}$ , demonstrando influência tanto de plantas de ciclo C3 como de ciclo C4. Já na área entre os renques, maior característica de plantas C4 foi detectada. Tal comportamento era esperado, uma vez que as áreas encontram-se na fase pastagem.

A razão isotópica do C do solo nas áreas estudadas (Pastagem e iLPFs) e de uma área ainda com vegetação nativa está apresentada na Figura 3.3. Nessa figura apresenta-se a assinatura isotópica do C do solo sob vegetação nativa somente como informação complementar. Essa área não foi utilizada como referência para acumulação de C neste estudo, por possuir teores de argila no solo inferiores aos das áreas sob investigação, não atingindo, assim, os critérios mínimos para comparação, entretanto, julga-se que seja válido apresentar os dados de razão isotópica, pois isso depende mais da biomassa vegetal precursora da MOS do que das propriedades do solo.



**Figura 3.3.** Razão isotópica  $^{13}\text{C}$  de uma pastagem degradada e áreas sob manejo de integração lavoura-pecuária-floresta (iLPF) com 1 linha de árvores de eucalipto por renque (a), amostrados na linha das árvores (iLPF1-L), a 2,5; 5 e 10 m de distância do renque e iLPF com 3 linhas de árvores de eucalipto por renque (b), amostrados na linha central de árvores (iLPF3-LC), na linha externa (iLPF3-LE), a 3, 6 e 9 m de distância da linha externa das árvores do renque, em Nova Canaã do Norte, MT. As barras de erro indicam o erro padrão.

A assinatura isotópica do solo sob a vegetação nativa claramente indicou uma vegetação C3 que, com o aumento da profundidade do solo, gradualmente ficou diluída com sinais de vegetação C4. Pequenas modificações nos valores de  $^{13}\text{C}$  podem ocorrer nos resíduos de plantas após entrarem no solo, seja pelo fracionamento isotópico associado

com processos de decomposição microbiana ou pela decomposição diferencial de compostos bioquímicos isotopicamente únicos que compõem a MOS. Isso demonstra que variações nos valores de  $^{13}\text{C}$  do solo e sua evolução com o tempo são controlados primeiramente pelas entradas de C da vegetação e secundariamente por processos de decomposição biológica (Bai et al., 2012).

Com o aumento da profundidade do solo é natural um aumento na abundância de  $^{13}\text{C}$  da ordem de 1 a 2 deltas (‰) entre a superfície e 1,0 m. De acordo com Scheer et al. (2013) variações de até 4‰ são associadas com o fracionamento isotópico durante a decomposição e diferenças na composição isotópica do  $\text{CO}_2$  atmosférico. Tais variações ocorrem porque durante o processo de humificação o  $^{12}\text{C}$  é preferencialmente perdido, sobrando mais  $^{13}\text{C}$  na matéria orgânica do solo, tornando o sinal isotópico menos negativo (O'Brien (O'brien & Stout, 1978; Vitorello et al., 1989; Martin et al., 1990; Sisti et al., 2004). Em maiores profundidades do solo a matéria orgânica encontra-se num estado mais avançado da humificação.

Neste caso, entretanto, uma diferença na razão isotópica de quase 8 deltas (‰) entre a superfície e 1,0 m na área sob floresta indica a presença de outro tipo de vegetação em tempos geológicos anteriores. Em florestas primárias da Amazônia onde a vegetação é basicamente composta por plantas C3, os perfis de solo apresentam valores de  $^{13}\text{C}$  entre -27 a -28‰ em superfície, tendo um aumento de aproximadamente 2‰ a um metro de profundidade (Moraes et al., 1996; Tarré et al., 2001; Pinheiro et al., 2010). Outros estudos, usando a técnica de datação com o radioisótopo  $^{14}\text{C}$  em solos da Amazônia indicaram que a matéria orgânica, em torno de um metro de profundidade tem idade aproximadamente de 3000 a 4000 anos antes do presente (Pessenda et al., 1998; Gouveia et al., 2002). Assim, a assinatura isotópica ( $^{13}\text{C}$ ) na área deste estudo mostrou que, em uma escala de tempo geológico, a vegetação (paleovegetação) no mesmo local foi composta de uma mistura de plantas de ciclo fotossintético C3 e C4. Alguns estudos afirmam que a mudança na vegetação ocorreu devido a mudanças paleoclimáticas ocorridas em meados do Holoceno (Salgado-Labouriau, 2000).

No solo da pastagem, até 0,4 m de profundidade, pode ser observada a influência marcante de plantas de ciclo fotossintético C4. Nessa mesma camada, no solo das áreas sob iLPF, há uma mistura das fontes em plantas de ciclo C3 e C4.

A análise estatística, apresentada na Tabela 3.5, apontou diferença, até 0,4 m de profundidade, entre a pastagem, com maior abundância de  $^{13}\text{C}$ , e as áreas sob iLPF. O

forte sinal C3 na camada 0,0-0,4 m provavelmente pode ser atribuído às plantas de ciclo fotossintético C3, que dominaram os primeiros três anos do iLPF, sendo arroz, soja e o eucalipto. Nota-se que na camada 0,0-0,05 m a assinatura isotópica das áreas sob iLPF, por influência da pastagem atualmente implantada, já apresenta sinais de enriquecimento em  $^{13}\text{C}$  da ordem de 0,74 a 4,13 ‰ em relação à camada 0,05-0,1 m, sendo ele mais pronunciado na iLPF3 nas posições fora das linhas das árvores. Silva et al. (2013) também atribuíram o enriquecimento em  $^{13}\text{C}$  em solos do Cerrado às gramíneas, salientando que elas, mesmo possuindo pouca biomassa de parte aérea, contribuem com 50% do C aportado ao solo anualmente. A partir de 0,6 m de profundidade não houve diferença entre os tratamentos avaliados, demonstrando que as áreas apresentam a mesma origem e que, antes da derrubada da floresta nativa, todas as áreas eram cobertas pelo mesmo tipo de vegetação.

**Tabela 3.5.** Razão isotópica ( $^{13}\text{C}$ ) por camada do Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta e pastagem contínua degradada em Nova Canaã do Norte, MT

Tratamento	Camada, m							
	0,0-0,05	0,5-0,1	0,1-0,2	0,2-0,3	0,3-0,4	0,4-0,6	0,6-0,8	0,8-1,0
	----- $^{13}\text{C}$ ‰ -----							
Pastagem	-17,30a	-19,32a	-20,87a	-22,21a	-22,69a	-22,30ab	-21,71a	-21,31a
iLPF1-L	-23,47c	-24,65b	-25,29b	-25,19b	-25,10b	-23,58ab	-22,06a	-21,45a
iLPF1-2,5	-23,44c	-24,19b	-25,15b	-25,04b	-24,34ab	-23,65ab	-21,81a	-22,29a
iLPF1-5	-22,67bc	-25,50b	-25,63b	-25,10b	-25,02b	-24,20ab	-22,28a	-22,41a
iLPF1-10	-22,73bc	-24,65b	-25,40b	-24,96b	-25,02b	-22,47ab	-21,76a	-21,97a
iLPF3-LC	-22,46bc	-24,35b	-25,03b	-24,70b	-24,61b	-23,31ab	-21,31a	-21,14a
iLPF3-LE	-23,00bc	-24,53b	-24,82b	-24,52b	-24,23ab	-23,23ab	-20,60a	-20,63a
iLPF3-3	-21,06b	-24,66b	-25,23b	-24,38b	-23,87ab	-21,22a	-19,49a	-19,83a
iLPF3-6	-21,40bc	-24,80b	-25,10b	-24,50b	-24,00ab	-22,91ab	-21,40a	-20,76a
iLPF3-9	-20,90b	-25,03b	-25,24b	-24,24b	-23,34ab	-21,36a	-20,57a	-20,32a

Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo Teste de Tukey ( $\alpha = 5\%$ )

iLPF1: sistema com 1 linha de árvores de eucalipto por renque, iLPF1-L: amostragem na linha de árvores no sistema iLPF1, iLPF1-2,5, iLPF1-5 e iLPF1-10: amostragem em 2,5, 5 e 10 m de distância do renque de árvores no sistema iLPF1; iLPF3: sistema com 3 linhas de árvores de eucalipto por renque, iLPF1-LC: amostragem na linha central de árvores no sistema iLPF3, iLPF3-LE: amostragem na linha externa de árvores no sistema iLPF3, iLPF3-3, iLPF3-6 e iLPF3-9: amostragem em 3, 6 e 9 m de distância da linha externa de árvores no sistema iLPF3.

O manejo aplicado às áreas iLPF, com alternância, em períodos curtos de tempo, entre gramíneas, C4, e culturas anuais, C3 (arroz e soja) e C4 (milho), ocasionou um empobrecimento do solo em  $^{13}\text{C}$ , comparado à pastagem, sobretudo na camada 0,0-0,4 m. Mesmo o solo sob pastagem apresentou razão isotópica ( $\delta^{13}\text{C}$ ) mais baixa do que seria característica em baixo de uma vegetação puramente C4, possivelmente pelo histórico da

área, que permaneceu sob pastagem por longo tempo, mas que ainda guarda sinais oriundos da vegetação da floresta nativa que originalmente a recobria.

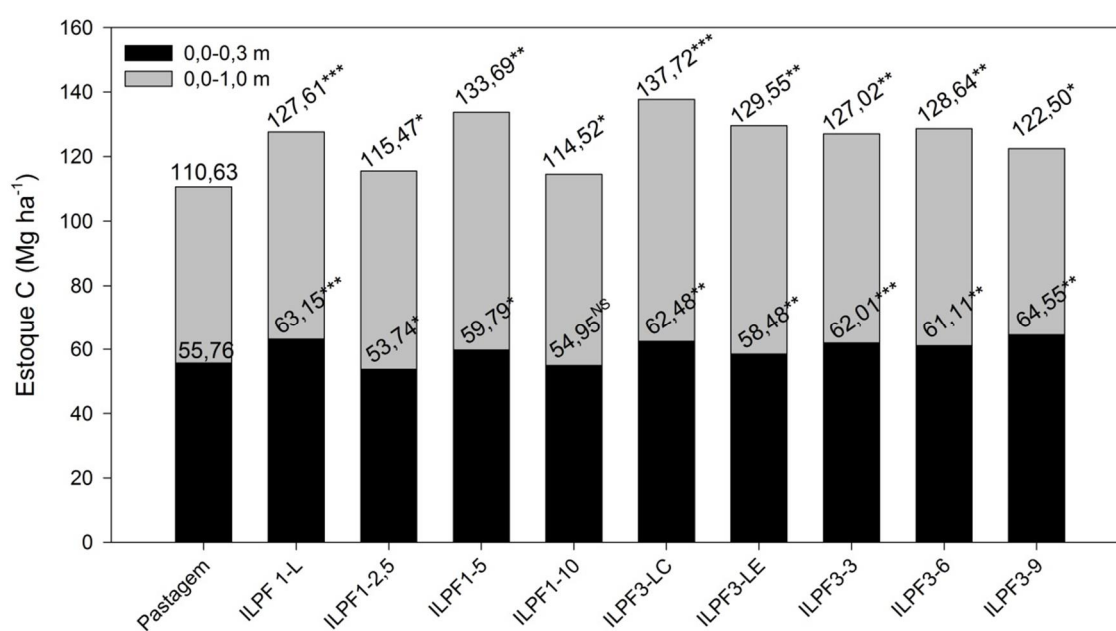
Na profundidade de 0,0-0,05 m, nas áreas sob iLPF, os dados indicaram uma separação entre a razão isotópica do solo nas posições de amostragem sob as linhas de árvores e sob a pastagem do iLPF. Embora estatisticamente não significativo a  $\alpha = 5\%$ , nas posições sob árvore o  $\delta^{13}\text{C}$  tende a ser mais negativo. Isso pode ser o resultado da incorporação da biomassa da liteira das árvores que, com tempo, espera-se causar uma diferença mais nítida com relação à faixa da pastagem do iLPF, supondo que a pastagem na rotação do iLPF não seja interrompida com culturas C3 por pelo menos mais três anos.

### *Estoques de Carbono e Nitrogênio no Solo*

Os estoques de C, corrigidos para massa equivalente de solo nas áreas e posições (afastamento dos renques) avaliadas não apresentaram comportamento padrão, na camada 0,0-0,3m na iLPF1 (Figura 3.4). Como uma observação geral, podemos apontar que a camada de 0,0-0,3 m foi responsável por armazenar em média 47% do C do solo, enquanto o estoque na camada de 0,3-1,0 m foi de aproximadamente 53%. Os resultados do presente estudo concordam com Soussana & Lemaire (2014), que salientaram que, mesmo apresentando baixa concentração de C, as camadas de solo abaixo de 0,3 m podem responder por mais de 50% do carbono total armazenado. Por isso, apesar de o próprio IPCC exigir, para projetos de crédito de carbono pelo protocolo de Kyoto, a avaliação dos estoques de C do solo até 0,3 m de profundidade, considerar uma camada de pelo menos 1,0 m mostra-se importante quando da avaliação dos estoques de C no solo, especialmente em áreas onde espécies arbóreas e gramíneas com sistema radicular profundo estão presentes.

A iLPF1, na linha de árvores, apresentou maior estoque de C que a Pastagem tanto na camada 0,0-0,3, quanto na 0,0-1,0 m. Entretanto, na zona de pastagem dentro do iLPF1, na camada 0,0-0,3 m aumento do estoque de C foi observado somente em uma posição de amostragem (iLPF1-5). Na posição iLPF1-2,5 houve diminuição de C, e na posição iLPF1-10 não houve diferença entre o sistema integrado e a pastagem contínua. Carvalho et al. (2010), que avaliaram a conversão de sistemas de culturas anuais para iLP em três diferentes propriedades, uma no bioma Amazônia e duas no bioma Cerrado, observaram tendência de redução do estoque de C na pastagem e de aumento no sistema

iLP nas camadas superficiais, embora diferenças significativas não tenham sido observadas mesmo oito anos após a implementação da iLP. Por outro lado, Salton et al. (2011) avaliaram o impacto de diferentes manejos, utilizados por sete a nove anos, no conteúdo de C do solo e encontraram que os estoques e taxas de acumulação de C foram baixos em sistemas de produção de culturas anuais, intermediários em iLP e os mais elevados foram observados na pastagem. Entretanto, o autor não empregou a correção para massa equivalente de solo no estudo, o que pode ter mascarado possíveis resultados positivos dos sistemas integrados.



**Figura 3.4.** Estoque de C corrigido para massa equivalente de solo para as camadas de 0,0-0,3 e 0,0-1,0 m, em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta com 1 linha de árvores de eucalipto por renque (iLPF1), amostrados na linha de árvores (iLPF1-L), a 2,5 (iLPF1-2,5); 5 (iLPF1-5) e 10 (iLPF1-10) metros de distância do renque e com 3 linhas de árvores de eucalipto por renque (iLPF3), amostrados na linha central de árvores (iLPF3-LC), na linha externa (iLPF3-LE) a 3 (iLPF3-3), 6 (iLPF3-6) e 9 (iLPF3-9) metros de distância do renque, em Nova Canaã do Norte, MT. Os valores são médias (n=5). As médias do iLPF foram comparadas, pelo teste T, correção de Bonferroni, à Pastagem. \*p = 0,05, \*\*p = 0,01, \*\*\*p = 0,0001, NS = diferença não significativa.

Dado que a pastagem havia sido semeada há um ano nas iLPFs quando da coleta de amostras e que era bastante recente a ressemeadura na iLPF1, sua contribuição ao C do solo na camada superficial poderia ser, ainda, pequena, frente ao potencial em maior prazo. Entre as razões para esse potencial está o fato de que o pastejo exerce influência sobre a proporção parte aérea:raízes (Bayer et al., 2011; Silva et al., 2014) e induz a

mudanças na alocação de C abaixo do solo exercendo, portanto, efeito positivo na acumulação do COS (Mcsherry & Ritchie, 2013). Ainda, gramíneas tropicais podem produzir em torno de  $10 \text{ Mg ha}^{-1}$  de biomassa seca de raízes, contribuindo expressivamente à acumulação de C no solo (Balbino et al., 2012), porque as raízes apresentam maior conversão do C adicionado em C da MOS em comparação à parte aérea. De acordo com Bolinder et al. (1999) citado por Bayer et al. (2011), em torno de 21% e 12% do carbono de biomassa adicionado ao solo do sistema radicular e parte aérea, respectivamente, são convertidos em MOS. Outro fator importante a ser observado é que, por causa do replantio da pastagem na iLPF1, o manejo das duas áreas de iLPF foi diferente, tendo essa área recebido a aplicação de uma gradagem adicional à aproximadamente 0,03 m de profundidade. A movimentação do solo, mesmo superficialmente, pode ser suficiente para afetar a acumulação de carbono (Soussana & Lemaire, 2014), uma vez que a matéria orgânica fica exposta aos micro-organismos e, em condições favoráveis, pode ser rapidamente decomposta. Por outro lado, na camada de 0,0-1,0 m no iLPF1 foi observado aumento no estoque de C em todas as posições avaliadas.

A iLPF1 apresentou o mesmo estoque de C que a pastagem para a camada 0,0-0,3 m e conteúdo superior de C para a camada até 1,0 m de profundidade (Tabela 3.6). A iLPF3, no entanto, apresentou estoques de C maiores que a pastagem contínua em ambas as camadas, principalmente se considerada a camada de 1,0 m. Por causa do melhor estabelecimento da pastagem na ocasião da sua primeira implantação, essa área não recebeu gradagem extra e, como constatado *in loco*, a área apresentava o pasto mais bem formado com menor infestação de plantas daninhas, representando maior biomassa passível de ser adicionada ao solo. Outra possível explicação para esse maior estoque de C pode estar relacionada à disponibilidade de nitrogênio no solo. Dado que o balanço positivo de N e outros nutrientes é essencial para que ocorra o sequestro de C em solos agrícolas tropicais e subtropicais (Lovato et al., 2004; Urquiaga et al., 2010a; Urquiaga et al., 2010b; Kirkby et al., 2014), e que o iLPF3 apresentou estoque elevado de N (Figura 3.5), pode-se inferir que ele tenha exercido influência positiva na maior acumulação de C nesta área.

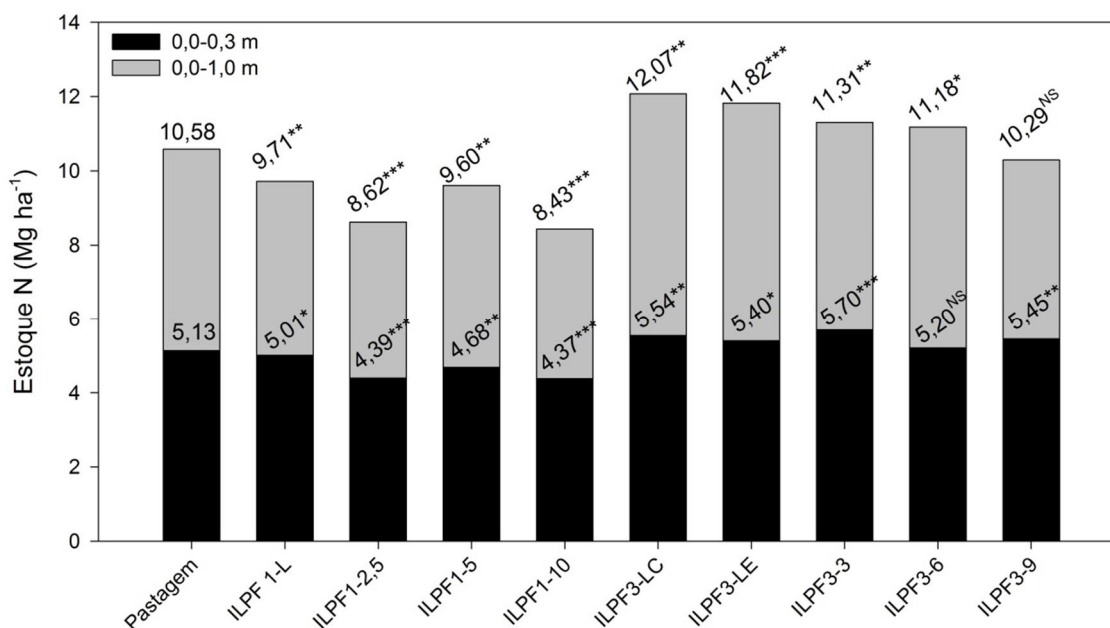
A iLPF1 apresentou estoques de N significativamente menores em relação à pastagem, tanto na camada 0,0-0,3 como na 0,0-1,0 m, em todos os pontos avaliados. Já na iLPF3 os estoques de N foram significativamente superiores aos da pastagem para ambas as camadas nos pontos iLPF3-LC, iLPF3-LE e iLPF3-3. Para o ponto iLPF3-6 não houve

diferença na camada 0,0-0,3 m e houve aumento do estoque de N na camada 0,0-1,0 m. Conforme apresentado na Figura 3.6 os teores de C e N no solo, tanto na camada 0,0-0,3 quanto na 0,0-1,0 m, são altamente relacionados entre si, dando suporte à hipótese de que quando o solo apresenta-se deficiente em N, essa situação pode ser limitante para a acumulação de C.

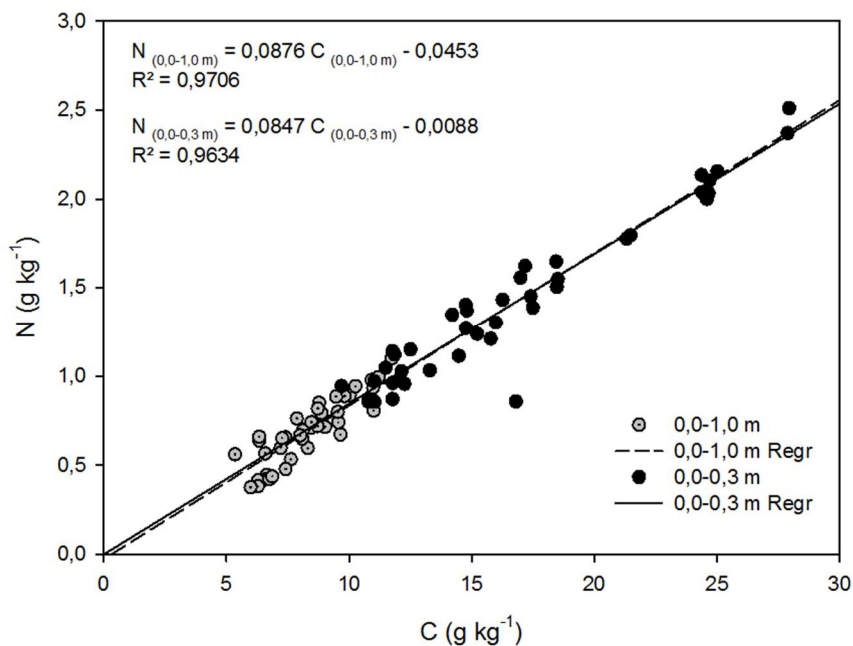
**Tabela 3.6.** Estoque de carbono corrigido para massa equivalente de solo para as camadas 0,0-0,3 e 0,0-1,0 m em Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta e pastagem contínua degradada em Nova Canaã do Norte, MT

Área	0,0-0,3	0,0-1,0
Pastagem	55,76	110,63
iLPF1 <sup>1</sup>	57,49 NS	123,58 **
iLPF3 <sup>2</sup>	61,53 **	128,34 *

<sup>1</sup> iLPF1 sistema de integração lavoura-pecuária-floresta com uma linha de árvores de eucalipto por renque; <sup>2</sup> iLPF3 sistema de integração lavoura-pecuária-floresta com três linhas de árvores de eucalipto por renque. Os valores são médias ponderadas da amostragem estratificada realizada na área. Médias comparadas à Pastagem pelo teste T. \*p = 0,05, \*\*p = 0,01, \*\*\*p = 0,0001, NS = diferença não significativa.



**Figura 3.5.** Estoque de N corrigido para massa equivalente de solo para as camadas de 0,0-0,3 e 0,0-1,0 m, em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta com 1 linha de árvores de eucalipto por renque (iLPF1), amostrados na linha de árvores (iLPF1-L), a 2,5 (iLPF1-2,5); 5 (iLPF1-5) e 10 (iLPF1-10) metros de distância do renque e com 3 linhas de árvores de eucalipto por renque (iLPF3), amostrados na linha central de árvores (iLPF3-LC), na linha externa (iLPF3-LE) a 3 (iLPF3-3), 6 (iLPF3-6) e 9 (iLPF3-9) metros de distância do renque, em Nova Canaã do Norte, MT. Os valores são médias (n=5). As médias do iLPF foram comparadas, pelo teste T, correção de Bonferroni, à Pastagem. \*p = 0,05, \*\*p = 0,01, \*\*\*p = 0,0001, NS = diferença não significativa.



**Figura 3.6.** Relação entre os teores de carbono (C) e nitrogênio (N) nas camadas 0,0-0,3 e 0,0-1,0 m do Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, nas áreas sob sistema de integração lavoura-pecuária-floresta com 1 linha de árvores de eucalipto por renque (iLPF1), sob sistema de integração lavoura-pecuária-floresta com 3 linhas de árvores de eucalipto por renque (iLPF3) e pastagem.

De acordo com Soussana & Lemaire (2014), gramíneas do gênero *Urochloa* spp. são tolerantes a solos ácidos e de baixa fertilidade, porém, o nível de produtividade é altamente dependente da disponibilidade de N no solo. Como o incremento de C é também dependente da produção de biomassa acima e abaixo do solo, os baixos estoques de N observados para a iLPF1 podem ser uma explicação para o menor estoque de C pela menor produção de resíduos. Além disso, há menor disponibilidade de N aos micro-organismos para a decomposição da MOS (Urquiaga et al., 2010b).

A razão para os menores estoques no iLPF1 não ficaram claros em base do histórico da área. A única diferença entre o manejo das duas áreas sob iLPF, além do número de linhas de árvores por renque, como foi mencionado anteriormente, foi o replantio da forrageira (braquiária) com a utilização de grade leve. O mau estabelecimento da braquiária nessa área provavelmente resultou em taxa de lotação animal superior à capacidade de suporte da pastagem, ainda em formação, o que, por sua vez, resultou em maior remoção da parte aérea da gramínea, e o tempo de descanso do piquete pode não ter sido suficiente para rebrota, resultando em desequilíbrio nutricional e maior extração de N pela pastagem. A remoção da parte aérea além da capacidade de rebrota em pastagens com menor capacidade de rebrota resulta em maior concentração de N nos tecidos vegetais

(Santos et al., 2007) revelando maior remoção do nutriente do solo pela cultura. Marota (2014) observou, em Latossolo Vermelho de textura argila no Cerrado, que na fase pastagem em iLP a presença de N no solo foi relacionada à MOS. Ademais, observou que a variação microbiana, que afeta as transformações e decomposição da MOS, tanto na estação chuvosa quanto na seca, pode ser explicada pelos dados de fertilidade do solo. Portanto, a observação de que a quantidade de N pode afetar a acumulação de C no solo alerta para a necessidade da avaliação do estado nutricional do solo antes de concluir sobre o efeito de sistemas de produção ou manejo do solo sobre a acumulação de C. Diante disso, a avaliação de sistemas de produção na acumulação de C no solo fica ainda mais complexa, especialmente se considerar que o manejo do solo e uso da terra pode influenciar diretamente no seu estado nutricional.

### 3.4 CONCLUSÕES

A composição isotópica ( $\delta^{13}\text{C}$ ) do solo foi afetada, até 0,4 m de profundidade, pela mudança de uso da terra, evidenciando o efeito do sistema integração lavoura-pecuária-floresta na matéria orgânica do solo após três anos da implantação.

O componente florestal foi importante para o acúmulo de carbono (C) no solo, pois nas linhas das árvores o estoque de C aumentou, relativamente à pastagem, tanto para a camada de 0,0-0,3 quanto para a de 0,0-1,0 m, sob ambas as variações investigadas de integração lavoura-pecuária-floresta (iLPF) - com uma (iLPF1) e três (iLPF3) linhas de árvores por renque.

O iLPF3 promoveu acumulação de carbono relativamente à pastagem, em todas as posições avaliadas, tanto na camada 0,0-0,3 como na camada 0,0-1,0 m. Entretanto, na iLPF1 o estoque de C na camada 0,0-0,3 foi variável, havendo acumulação de C na camada 0,0-1,0 m. Considerando-se a área como um todo, a iLPF1 apresentou estoques de C superiores aos da pastagem somente na camada até 1,0 m e a iLPF3 apresentou estoques superiores em ambas as camadas avaliadas.

Em comparação à pastagem, houve diminuição no estoque de N na iLPF1 e aumento na iLPF3 tanto na camada de 0,0-0,3 quanto na de 0,0-1,0 m.

Uma vez que a quantidade de N e, em geral, o estado nutricional do solo, depende diretamente do uso da terra e manejo do sistema de produção, o manejo adequado da fertilidade solo na iLPF é importante para o acúmulo de C no solo.

Avaliações futuras podem auxiliar numa melhor elucidação do impacto da iLPF na dinâmica de C e N no solo, uma vez que a instalação do sistema investigado neste estudo era recente quando dessas avaliações.

### 3.5 REFERÊNCIAS

AGRITEMPO. **Sistema de Monitoramento Agrometeorológico**. Embrapa Informática Agropecuária / CEPAGRI-Meteorologia Unicamp. 2014. Disponível em: <<http://www.agritempo.gov.br/agritempo/produtos.jsp?siglaUF=GO>>. Acesso em: 08 Fev. 2014.

BAI, E.; BOUTTON, T. W.; LIU, F.; WU, X. B.; HALLMARK, C. T.; ARCHER, S. R. Spatial variation of soil  $\delta^{13}\text{C}$  and its relation to carbon input and soil texture in a subtropical lowland woodland. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 44, n. 1, p. 102-112, 2012.

BAKER, J. M.; OCHSNER, T. E.; VENTEREA, R. T.; GRIFFIS, T. J. Tillage and soil carbon sequestration: What do we really know? **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 118, n. 1-4, p. 1-5, 2007.

BALBINO, L. C.; CORDEIRO, L. A. M.; OLIVEIRA, P.; KLUTHCOUSKI, J.; GALERANI, P. R.; VILELA, L. Agricultura sustentável por meio da integração lavoura-pecuária-floresta (iLPF). **Informações Agrônomicas**, Brasil, v. 2, n. 138, p. 1-18, 2012. Disponível em: <[http://www.ipni.net/publication/ia-brasil.nsf/0/37D541B90CDB2E1685257A84005C6490/\\$FILE/Jornal1-18-138.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-brasil.nsf/0/37D541B90CDB2E1685257A84005C6490/$FILE/Jornal1-18-138.pdf)>. Acesso em: 14 Jan. 2014.

BAYER, C.; AMADO, T. J. C.; TORNQUIST, C. G.; CERRI, C. E. C.; DIECKOW, J.; ZANATTA, J. A.; NICOLOSO, R. D. S. Estabilização do carbono no solo e mitigação das emissões de gases de efeito estufa na agricultura conservacionista. In: KLAUBERG FILHO, O.; MAFRA, A. L.; GATIBONI, L. C. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2011. p. 55-117. 7 cap.

BODDEY, R. M.; JANTALIA, C. P.; CONCEIÇÃO, P. C.; ZANATTA, J. A.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; DIECKOW, J.; SANTOS, H. P.; DENARDIN, J. E.; AITA, C.; GIACOMINI, S. J.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S. Carbon accumulation at depth in Ferralsols under zero-till subtropical agriculture. **Global Change Biology**, Malden, v. 16, n. 2, p. 784-795, 2010.

BUNGENSTAB, D. J. A posição estratégica dos sistemas de integração no contexto da agropecuária e do meio ambiente. In: BUNGENSTAB, D. J. (Ed.). **Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta: a produção sustentável**. Brasília: Embrapa, 2012. p. 217-224. 16 cap.

CARVALHO, J. L. N.; RAUCCI, G. S.; CERRI, C. E. P.; BERNOUX, M.; FEIGL, B. J.; WRUCK, F. J.; CERRI, C. C. Impact of pasture, agriculture and crop-livestock systems on soil C stocks in Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 110, n. 1, p. 175-186,

2010.

COSER, T. R.; FIGUEIREDO, C. C.; RAMOS, M. L. G.; JANNUZZI, H.; MARCHÃO, R. L. Recuperação de carbono obtida por três métodos em frações da matéria orgânica de Latossolo, sob consórcio milho-forrageiras, no Cerrado. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 28, n. 1, p. 91-97, 2012.

ELLERT, B. H.; BETTANY, J. R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. **Canadian Journal Soil Science**, Ottawa, v. 75, n. 4, p. 529-538, 1995.

EMBRAPA. Documentos, 132. **Manual de métodos de análises de solo**. 2 revisada ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230 p.

GOUVEIA, S. E. M.; PESSENDA, L. C. R.; ARAVENA, R.; BOULET, R.; SCHEELS-YBERT, R.; BENDASSOLI, J. A.; RIBEIRO, A. S.; FREITAS, H. A. Carbon isotopes in charcoal and soil in studies of paleovegetation and climate changes during the late Pleistocene and the Holocene in the southeast and centerwest regions of Brazil. **Global and Planetary Change**, Hoboken, v. 33, n. s/n, p. 95-106, 2002.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapa de Biomas do Brasil: Primeira Aproximação**. Rio de Janeiro: Ministério do Meio Ambiente / Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão / Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Esc. 1:5.000.000. 2004. Disponível em: <ftp://geoftp.ibge.gov.br/mapas\_tematicos/mapas\_murais/biomas.pdf>. Acesso em: 7 Out. 2014.

KIRKBY, C. A.; RICHARDSON, A. E.; WADE, L. J.; PASSIOURA, J. B.; D., B. G.; BLANCHARD, C.; KIRKEGAARD, J. A. Nutrient availability limits carbon sequestration in arable soils. **Soil Biology & Biochemistry**, Elmsford, v. 68, n. s/n, p. 4026409, 2014.

LEMAIRE, G.; FRANZLUEBBERS, A.; CARVALHO, P. C. D. F.; DEDIEU, B. Integrated crop-livestock systems: Strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 190, n. s/n, p. 4-8, 2014.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; GIÁCOMO, S. G.; PERIN, A.; ANJOS, L. H. C. Agregação, carbono e nitrogênio em agregados do solo sob plantio direto com integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 10, p. 1269-1276, 2011.

LOVATO, T.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; VEZZANI, F. M. Adição de carbono e nitrogênio e sua relação com os estoques no solo e com o rendimento do milho em sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 1, p. 175-187, 2004.

LUO, Z.; WANG, E.; SUN, O. J. Can no-tillage stimulate carbon sequestration in agricultural soils? A meta-analysis of paired experiments. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 139, n. 1-2, p. 224-231, 2010.

MAPA; MDA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento; Ministério do Desenvolvimento Agrário. **Plano setorial de mitigação e de adaptação às mudanças**

climáticas para a consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono na agricultura. **Plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono)**. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento / Ministério do Desenvolvimento Agrário, 2012.

MAROTA, H. B. **Microrganismos como indicadores de alteração do uso do solo em sistema integração Lavoura-Pecuária**. 2014. 87 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo)óCurso de Pós-graduação em Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2014.

MARTIN, A.; MARIOTTI, A.; BALESSENT, J.; LAVELLE, P.; VUATTOUX, R. Estimate of organic matter turnover rate in a savanna soil by <sup>13</sup>C natural abundance measurements. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 22, n. 1, p. 517-523, 1990.

MCSHERRY, M. E.; RITCHIE, M. E. Effects of grazing on grassland soil carbon: a global review. **Global Change Biology**, Malden, v. 19, n. 5, p. 1347-1357, 2013.

MORAES, J. F. L. D.; VOLKOFF, B.; CERRI, C. C.; BERNOUX, M. Soil properties under Amazon forest and changes due to pasture installation in Rondônia, Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 70, n. 1-2, p. 63-81, 1996.

O'BRIEN, B. J.; STOUT, J. D. Movement and turnover of soil organic matter as indicated by carbon isotope measurements. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 10, n. 1, p. 309-317, 1978.

PEREIRA, A. L.; BENEDITO, E. Isótopos estáveis em estudos ecológicos: métodos, aplicações e perspectivas. **Revista Biociências**, Taubaté, v. 13, n. 1-2, p. 16-27, 2007.

PESSENDA, L. C. R.; GOMES, B. M.; ARAVENA, R.; RIBEIRO, A. S.; BOULET, R.; GOUVEIA, S. E. M. The carbon isotope record in soils along a forestócerrado ecosystem transect: implications for vegetation changes in the Rondonia state, southwestern Brazilian Amazon region. **Holocene**, Chile, v. 8, n. s/n, p. 631-635, 1998.

PINHEIRO, E. F.; LIMA, E.; CEDDIA, M. B.; URQUIAGA, S.; ALVES, B. J. R.; BODDEY, R. M. Impact of pre-harvest burning versus trash conservation on soil carbon and nitrogen stocks on a sugarcane plantation in the Brazilian Atlantic forest region. **Plant and Soil**, Dodrecht, v. 333, n. 1, p. 71680, 2010.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **A language and environment for statistical computing. R foundation for statistical computing**. Viena, Áustria. 2011. Disponível em: <<http://www.r-project.org/>>. Acesso em: 25 Jan 2011.

SALGADO-LABOURIAU, M. L. Alguns aspectos sobre a Paleoecologia dos Cerrados. **Paleoecologia**. Brasília: EMBRAPA, 2000. p. 109-118.

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; FABRÍCIO, A. C.; MACEDO, M. C. M.; BROCH, D. L. Teor e dinâmica do carbono no solo em sistemas de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 10, p. 1349-1356, 2011.

SANTOS, R. S. M.; OLIVEIRA, I. P.; MORAIS, R. F.; URQUIAGA, S.; 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. 37, n. 2, p. 119-124, 2007.

SATO, J. H. **Métodos para determinação do carbono orgânico em solos do cerrado**. 2013. 90 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

SCHEER, M. B.; CURCIO, G. R.; RODERJAN, C. V. The Late Holocene upper montane cloud forest and high altitude grassland mosaic in the Serra da Igreja, Southern Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 85, n. 2, p. 769-783, 2013.

SILVA, F. D.; AMADO, T. J. C.; FERREIRA, A. O.; ASSMANN, J. M.; ANGHINONI, 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 & Environment**, Amsterdam, v. 190, n. special (Crop-Livestock System), p. 60-69, 2014.

SILVA, I. R.; MENDONÇA, E. S. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 275-374.

SILVA, V. E.; SILVA, A. C.; PEREIRA, R. C.; CAMARGO, P. B.; SILVA, B. P. C.; BARRAL, U. M.; MENDONÇA FILHO, C. V. Composição lignocelulósica e isotópica da vegetação e da matéria orgânica do solo de uma turfeira tropical. I - composição florística, fitomassa e acúmulo de carbono. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 1, p. 121-133, 2013.

SISTI, C. P. J.; SANTOS, H. P.; KOHHANN, R.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 76, n. 1, p. 39-58, 2004.

SOUSSANA, J.-F.; LEMAIRE, G. Coupling carbon and nitrogen cycles for environmentally sustainable intensification of grasslands and crop-livestock systems. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 190, n. s/n, p. 9-17, 2014.

TARRÉ, R. M.; MACEDO, R.; CANTARUTTI, R. B.; REZENDE, C. P.; PEREIRA, J. M.; FERREIRA, E.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. The effect of the presence of a forage legume on nitrogen and carbon levels in soils under *Brachiaria* pastures in the Atlantic forest region of the South of Bahia; Brazil. **Plant and Soil**, Dodrecht, v. 234, n. 1, p. 15-26, 2001.

TORNQUIST, C. G.; MIELNICZUK, J.; CERRI, C. E. P. Modeling soil organic carbon dynamics in Oxisols of Ibirubá (Brazil) with the Century Model. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 105, n. 1, p. 33-43, 2009.

TRIVELIN, P. C. O.; BENDASSOLLI, J. A. **Isótopos Estáveis. Espectrometria de Massas para Determinação de Razão Isotópica de Elementos de Baixo Número Atômico (IRMS). A Técnica de Traçador e a Diluição Isotópica**. 2013. Disponível em:

<[http://apostilas.cena.usp.br/Bertinho/MIECen5706/Trabalhos%20adicionais/DiluicaoIsotopica\\_Completo2013.pdf](http://apostilas.cena.usp.br/Bertinho/MIECen5706/Trabalhos%20adicionais/DiluicaoIsotopica_Completo2013.pdf)>. Acesso em: 09 Fev. 2014

URQUIAGA, S.; ALVES, B. J. R.; JANTALIA, C. P.; BODDEY, R. M. Variações nos estoques de carbono e emissões de gases de efeito estufa em solos das regiões tropicais e subtropicais do Brasil: uma análise crítica. **Informações Agronômicas**, Brasil, v. 2, n. 130, p. 12-21, 2010a. Disponível em: <[http://www.ipni.net/publication/ia-brasil.nsf/0/41898835F91B508383257A90000C1DBB/\\$FILE/Page12-21-130.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-brasil.nsf/0/41898835F91B508383257A90000C1DBB/$FILE/Page12-21-130.pdf)>. Acesso em: 14 Jan. 2014.

URQUIAGA, S.; ALVES, B. J. R.; JANTALIA, C. P.; SOARES, L. H. D. B.; BODDEY, R. M. Mudanças ambientais: sequestro de carbono e emissão de gases de efeito estufa pelo solo. In: PRADO, R. B.; TURETTA, A. P. D.; ANDRADE, A. G. (Ed.). **Manejo e conservação do solo e da água no contexto das mudanças ambientais**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2010b. p. 377-388. 7 cap.

VITORELLO, V. A.; CERRI, C. C.; ANDERSON, F.; FELLER, C.; VICTORIA, R. L. Organic matter and natural carbon-13 distribution in forested and cultivated oxisols. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 53, n. 1, p. 773-778, 1989.

ZAGATTO, E. **Isótopos de Carbono em Estudos Ambientais**. 2000. Disponível em: <[https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&ved=0CD8QFjAC&url=http%3A%2F%2Fapostilas.cena.usp.br%2FZagatto%2FFAN2-CarbonoAmbiente.doc&ei=Wof3UubhA4eSkQfL-IHQcw&usq=AFQjCNFXoC8M9a\\_QNndW8xApOImidPxA2w&sig2=jOL4F3Ja66tULSeJoutkYQ&bvm=bv.60983673,d.eW0](https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&ved=0CD8QFjAC&url=http%3A%2F%2Fapostilas.cena.usp.br%2FZagatto%2FFAN2-CarbonoAmbiente.doc&ei=Wof3UubhA4eSkQfL-IHQcw&usq=AFQjCNFXoC8M9a_QNndW8xApOImidPxA2w&sig2=jOL4F3Ja66tULSeJoutkYQ&bvm=bv.60983673,d.eW0)>. Acesso em: 09 Fev. 2014.

#### **4            MODELAGEM DA DINÂMICA DO CARBONO ORGÂNICO DO SOLO EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA NO CERRADO BRASILEIRO COM O MODELO CQESTR**

##### **RESUMO**

Modelos de simulação da dinâmica de carbono baseados em processos são ferramentas para a predição do impacto de práticas de manejo no carbono orgânico do solo (COS). O modelo CQESTR foi utilizado para simular o efeito do sistema de integração lavoura-pecuária (iLP) e cenários de manejo do solo na dinâmica do COS para validar seu uso para ecossistemas tropicais. O estudo foi conduzido no bioma Cerrado em Latossolo Vermelho acriférrico de textura argila. A área vem sendo manejada em iLP desde 2000. As rotações de cultura incluíram milho como cultura de verão e 3,5 ou 4,5 anos em pastagem no Piquete 4 (P4), e 2,5 anos na fase agrícola (soja, arroz de terras altas e milho) seguida por 2,5 ou 3,5 anos na fase pastagem no Piquete 5 (P5). A densidade do solo e o teor de matéria orgânica foram determinados para as camadas 0,0-0,1 e 0,1-0,3 m. O modelo CQESTR foi calibrado com dados do P5 e validado com P4. Seu desempenho foi avaliado usando análise estatística de regressão e o desvio médio quadrático (MSD). A calibração do modelo foi realizada pelo ajuste do coeficiente da taxa de decomposição básica, o que melhorou a acurácia dos valores de COS simulados para esse solo. Os valores simulados e medidos foram significativamente correlacionados com um MSD de 2,11, indicando que o modelo capturou satisfatoriamente a dinâmica temporal do COS na camada superficial (0,0-0,1 m). Entretanto, o CQESTR não simulou bem a acumulação de COS para a segunda camada (0,1-0,3 m). A subestimação pela simulação pode ter ocorrido devido às diferenças na biomassa e distribuição de raízes de poáceas em solos tropicais em comparação ao poáceas em solos sob clima temperado. Calibração adicional é requerida para melhorar a predição do COS e processos de estabilização nas camadas subsuperficiais de solos tropicais. Para a camada superficial (0,0-0,1 m), em longo prazo, o modelo simulou acumulação de C em iLP e decréscimo de C em sistema de produção com sucessão soja/milho, tanto sob plantio direto quanto plantio convencional em condições do Cerrado.

*Palavras-chave:* integração lavoura-pecuária, sistemas de produção de grãos, calibração, validação, estoque de carbono do solo

# PREDICTING SOIL CARBON DYNAMICS IN AGRICULTURE PRODUCTION SYSTEMS IN THE BRAZILIAN SAVANNAH USING THE CQESTR MODEL

## ABSTRACT

Process-based C models are used to predict management impact on soil organic carbon (SOC). The CQESTR model was used to simulate the effect of integrated crop-livestock system (iCLS) and other management scenarios on soil C dynamics over time and to validate its use for tropical ecosystems. The study was conducted in a tropical savannah ecosystem. The land use has been under iCLS since 2000. Crop rotations included corn as summer crop and 3.5 or 4.5 years in pasture in Paddock 4 (P4), and 2.5 years crop phase (soybean, dryland rice and corn) followed by 2.5 or 3.5 years in pasture in Paddock 5 (P5). Soil bulk density and organic matter were determined for the 0,0-0,1 and 0,1-0,3 m depths. The CQESTR model was calibrated with P5 and validated with P4 data. Model performance was evaluated using regression analysis and mean square deviation (MSD) statistics. The CQESTR model was calibrated for the Brazilian savannah (Cerrado) ecosystem by adjusting the basic decomposition rate coefficient which improved the accuracy of the simulated SOC values for the studied soil. The measured and simulated values were significantly correlated with a MSD of 2.11, indicating that the model captured spatial-temporal dynamics of SOC in the topsoil (0,0-0,1 m) in iCLS very well. However, CQESTR did not predict SOC accumulation for the underlying soil layer (0,1-0,3 m). The underestimation by the simulation could be due to lack of site specific grass or crop root biomass and distribution data under tropical conditions. Additional calibration is required to improve prediction of SOC stabilization process in the subsoil layers of tropical soils. In the long term, for the superficial (0,0-0,1 m) soil layer, the model simulated C accumulation in iCLS and C loss in soybean/corn grain production system independently of the use of zero-tillage or conventional tillage in either of these systems under Cerrado conditions.

*Key words:* integrated crop-livestock systems, grains production systems, calibration, validation, soil carbon stocks

## 4.1 INTRODUÇÃO

O solo é um importante reservatório de carbono (C) e pode atuar como fonte ou dreno do CO<sub>2</sub> atmosférico dependendo do manejo agrícola adotado (Carvalho et al., 2010). O manejo inadequado tem resultado em degradação do solo e redução da capacidade produtiva de muitas áreas agrícolas no Brasil. Ainda que os dados oficiais sejam limitados, estima-se que 50% a 70% das pastagens brasileiras apresentem sinais de degradação (Dias-Filho, 2014) e mais de 80% das áreas de pastagens degradadas estejam no Brasil Central

(Balbino et al., 2012). Nesta situação, o manejo inadequado leva a perdas do carbono orgânico do solo (COS), levando ao aumento das emissões de CO<sub>2</sub>.

Sistemas integrados de produção, como a integração lavoura-pecuária (iLP) e lavoura-pecuária-floresta (iLPF), mostram-se como estratégias alternativas de manejo para recuperar pastagens e áreas agrícolas degradadas, sendo economicamente viáveis e sustentáveis em comparação aos sistemas puros de produção. No Brasil, sistemas integrados têm recebido considerável atenção de agricultores e formadores de políticas públicas. Recentemente foi lançado o chamado Plano ABCö, que é um plano desenvolvido para promover uma agricultura de baixa emissão de C utilizando iLP e iLPF entre suas estratégias (Mapa & Mda, 2012). Em iLP há interações benéficas entre seus componentes (Tsukamoto Filho et al., 2004; Lemaire et al., 2014) que resultam na adição de resíduos variados (Bayer et al., 2011). Esses resíduos adicionados diferem em quantidade e qualidade daqueles adicionados por sistemas simples ou rotações de cultura em que não haja gramíneas e o componente animal, portanto, tais sistemas têm sido sugeridos como potenciais acumuladores de C no solo (Bungenstab, 2012).

Avaliar a dinâmica do COS em agroecossistemas é desafiante (Tornquist et al., 2009), assim em iLP, devido às complexas interações resultantes dos seus componentes, não é diferente, ainda que o objetivo seja simplesmente determinar se o sistema está atuando como fonte ou dreno de C. Detectar pequenas mudanças no COS induzidas pelo manejo em períodos de tempo reduzidos torna-se difícil devido às grandes diferenças espaço-temporais dos estoques de COS (Kravchenko & Robertson, 2011). Experimentos de longa duração, com histórico registrado, têm sido utilizados para avaliar os impactos de práticas de manejo na dinâmica de COS, e os dados obtidos são utilizados como base para a calibração e uso de modelos de simulação do ciclo de C em sistemas de produção agropecuária.

Os modelos de simulação da dinâmica do C no solo baseados em processos mostram-se como ferramentas úteis, ágeis e de baixo custo para analisar opções de manejo e comparar o impacto de cenários de manejos futuros. Eles podem ser utilizados na complementação de experimentos de campo, em estudos da dinâmica da matéria orgânica do solo (MOS) e do COS associado para estimar a distribuição do C no solo (Al-Adamat et al., 2007; Gollany et al., 2012). Adicionalmente, modelos de C são úteis na predição dos efeitos potenciais do manejo nas mudanças dos estoques de C do solo, tornando possível testar diferentes cenários e buscar estratégias para mitigar os impactos negativos de tais

mudanças.

Modelos de C têm sido utilizados extensivamente para ecossistemas e solos em regiões sob clima temperado, enquanto em condições de clima tropical o uso e aplicação dessas ferramentas têm sido menos comum (Kamoni et al., 2007; Tornquist et al., 2009). Quando esses modelos, desenvolvidos para ecossistemas de clima temperado, são utilizados para ecossistemas sob clima tropical, cuidados devem ser tomados na sua aplicação, devido às diferenças nas condições edafoclimáticas que afetam a acumulação, decomposição e, de maneira geral, a ciclagem do COS. Nas regiões tropicais os processos de ciclagem do COS podem ser dez vezes mais rápidos (Moreira & Siqueira, 2006), devido à predominância de solos altamente intemperizados com elevada acidez e baixa capacidade de troca catiônica e elevadas temperaturas e precipitações anuais.

Dada a importância da agropecuária brasileira para a economia global e os limitados dados de pesquisa com a utilização de modelos de C em sistemas de produção agropecuária em clima tropical, inclusive em sistemas integrados, torna-se necessário a calibração e validação desses modelos para essas condições. Assim, o objetivo do presente estudo foi calibrar e validar o modelo CQESTR (Rickman et al., 2001; Liang et al., 2009) e simular o efeito de diferentes sistemas de produção, incluindo iLP, na dinâmica do COS e nos estoques de C para as condições de Cerrado. O modelo CQESTR foi escolhido devido à sua relativa simplicidade e à disponibilidade das variáveis de entrada.

## 4.2 MATERIAL E MÉTODOS

### *Área de estudo*

O experimento, localizado na Fazenda Capivara da Embrapa Arroz e Feijão, está inserido no bioma Cerrado (16°28' S, 49°17' O; altitude 803 m), em Santo Antônio de Goiás, Goiás, Brasil. De acordo com Silveira (2010), a vegetação nativa é a floresta decídua (Cerradão) composta por aproximadamente 30 espécies, numa densidade de 2800 plantas individuais ha<sup>-1</sup>, das quais sete (*Hirtella glandulosa* Spreng; *Hirtella gracilipes* (Hook.f.) Prance; *Protium heptaphyllum* (Aubl.) March.; *Tapirira guianensis* Aubl.; *Emmotum nitens* (Benth.) Miers.; *Copaifera langsdorfi* Desf; *Pterodon emarginatus* Vog.) são as mais comuns. O solo foi classificado como Latossolo Vermelho acriférrico típico, textura argila, com conteúdo médio de 524 g kg<sup>-1</sup> argila e 349 g kg<sup>-1</sup> areia, com relevo

plano. Entre os argilominerais predominou a caulinita com presença de óxidos e hidróxidos de Fe e Al como goetita e hematita. De acordo com a classificação de Köppen, o clima é tropical megatérmico (Aw) com duas estações bem definidas, uma seca, de maio a setembro e uma chuvosa, de outubro a abril (Ibge, 2002). A precipitação média anual dos últimos trinta anos (1983 - 2013) foi de 1504,3 mm (Agritempo, 2014), das quais aproximadamente 90% são concentradas entre outubro e abril. A temperatura média do ar é aproximadamente 23°C.

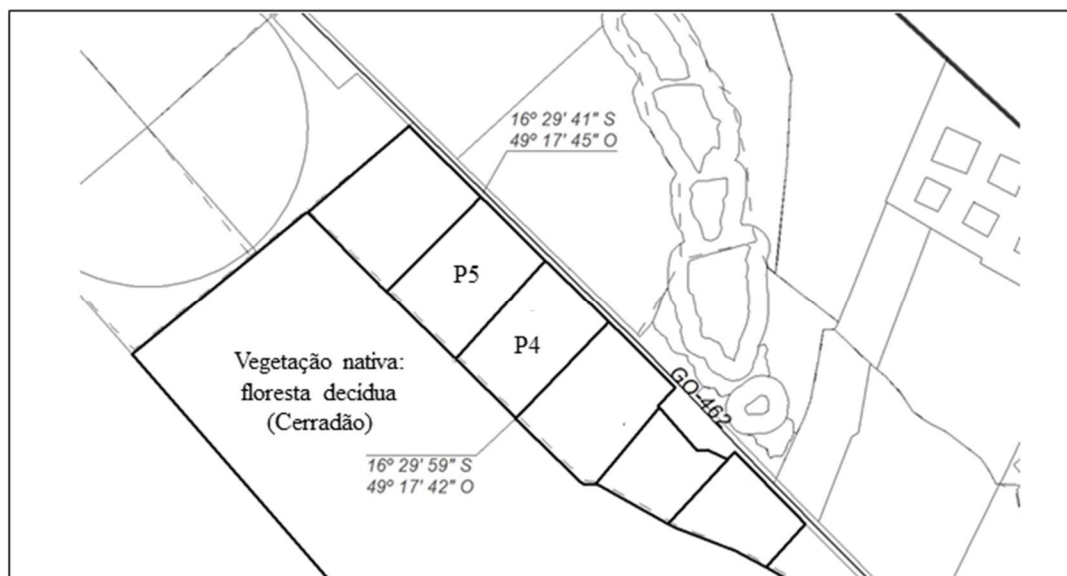
#### *Manejo da integração lavoura-pecuária*

Dois áreas sob iLP e uma área vizinha sob vegetação nativa (assumida como referência) foram utilizadas neste estudo. As áreas sob iLP são parte de uma das Unidades de Referência Tecnológica (URT iLP Santo Antônio de Goiás/GO), da rede de URTs de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta<sup>1</sup> da Embrapa.

Essa URT é composta de seis áreas variando de 5,1 a 9,2 ha. A área era coberta por vegetação natural até 1933, quando começou a derrubada por corte seletivo de árvores, que terminou por volta de 1950. Na década de 1970 a agricultura foi iniciada. Feijão comum (*Phaseolus vulgaris* L.), arroz de terras altas (*Oryza sativa* L.) e milho (*Zea mays* L.) foram cultivados como cultura principal na área. Em 1983 cessou o cultivo de arroz e a rotação de culturas permaneceu apenas com feijão comum e milho. Em 1994 a soja (*Glycine max* L.) foi cultivada pela primeira vez e somente entrou definitivamente para a rotação em 1999. No ano de 1995 a área foi, então, dividida em seis piquetes, a iLP foi gradualmente implantada e poucas variações na rotação ocorreram desde 2000. Dois dos seis piquetes foram selecionados para este estudo de simulação, Piquete 4 (P4) (7,5 ha) e Piquete 5 (P5) (8,1 ha) (Figura 4.1). Ocasionalmente na área foi cultivado feijão comum irrigado durante a estação seca. Os ciclos atuais do sistema, com esquema de rotação de grãos e pastejo, são apresentados na Tabela 4.1.

---

<sup>1</sup> Disponível no endereço eletrônico: <http://www.cnpgl.embrapa.br/nova/silpf/index.php>



**Figura 4.1.** Localização da floresta decídua (área sob vegetação nativa de referência) e do Piquete 4 (P4) e Piquete 5 (P5) sob sistema de integração lavoura-pecuária em Santo Antônio de Goiás, Goiás, Brasil.

Como cenários futuros, P4 recebeu uma rotação incluindo milho como cultura de verão semeado juntamente com pastagem de *Urochloa ruziziensis*, permanecendo por 3,5 a 4,5 anos na fase de pastejo rotacionado. No P5 a rotação foi de 2,5 anos na fase grãos (soja, arroz de terras altas e milho+braquiária) seguida por mais 2,5 a 3,5 anos na fase de pastejo com *U. brizantha* c. Piatã. A pastagem remanescente após a colheita do milho dá início à fase de pastejo. O preparo do solo até 1995 consistia de aração com arado de discos (10 cm de profundidade) e gradagem (com primeira operação a 7 cm e a segunda a 3 cm de profundidade). Desde então, o plantio direto (PD) foi adotado na área.

#### *Amostragem de solos e análises*

Amostras de solo foram coletadas ao longo de um transecto em cada área de estudo (P4 e P5). Cada amostra analisada (n=4) era composta de pelo menos 5 subamostras. Antes da análise de solos foram removidos tecidos de plantas e outros materiais orgânicos maiores que 2 mm. As amostras de solo secas ao ar foram peneiradas a 2 mm antes da análise química.

Foram determinadas as frações de argila, areia e silte do solo utilizando o método do densímetro, baseado na sedimentação de partículas com um densímetro padrão com escala de Bouyoucos (Gee & Or, 2002). A densidade do solo foi determinada pelo

método dos anéis volumétricos (Grossman & Reinsch, 2002). O pH do solo foi determinado em água (1:2,5 solo/água) usando método do eletrodo (Thomas, 1996). Cálcio e magnésio trocável, extraído com 1 mol L<sup>-1</sup> KCl e o potássio e fósforo extraível com solução Mehlich 1 como descrito por Kuo (1996), então, os íons Ca e Mg foram determinados com fotometria de chama e a concentração dos íons K e P por colorimetria usando espectrofotômetro (Wright & Stuczynski, 1996).

**Tabela 4.1.** Sequência dos ciclos de culturas e pastejo do Piquete 4 (P4) e Piquete 5 (P5), sob sistema integração lavoura-pecuária em Santo Antônio de Goiás, Goiás, Brasil (1990-2015)

Ano agrícola	Piquete 4		Piquete 5	
	Verão	Inverno	Verão	Inverno
1990/91	Feijão c. <sup>1</sup> PC <sup>2</sup>	Pousio	Feijão c. PC	Pousio
1991/92	Milho PC	Pousio	Milho PC	Pousio
1992/93	Milho PC	Pousio	Milho PC	Pousio
1993/94	Soja PD	Pousio	Soja PD	Pousio
1994/95	Pousio	Feijão c. PC	Pousio	Pousio
1995/96	Milho PD	Pousio	Milho PD	Pousio
1996/97	Milho PD	Pousio	Milho PD	Pousio
1997/98	Milho PD	Pousio	Milho PD	Feijão c. PD
1998/99	Soja PD	Pousio	Arroz PD	Pousio
1999/00	Milho PD	Pousio	Milho PD	Pousio
2000/01	Milho+Braq (C) <sup>3</sup> PD	Braq (C) <sup>4</sup>	Soja PD	Milheto PD
2001/02	Soja PD	Milheto PD	Milho+Braq(C) PD	Braq(C)
2002/03	Milho+Braq (C) PD	Braq (C)	Soja PD	Feijão c. PD
2003/04	Arroz PC	Pousio	Milho+Braq (P) <sup>5</sup> PD	Braq (P) <sup>6</sup>
2004/05	Milho+Braq (P) PD	Braq (P)	Braq (P)	Braq (P)
2005/06	Braq(P)	Braq (P)	Braq (P)	Braq (P)
2006/07	Braq(P)	Braq (P)	Braq (P)	Braq (P)
2007/08	Braq(P)	Braq (P)	Soja PC	Feijão c. PD
2008/09	Braq(P)	Braq (P)	Arroz PD	Pousio
2009/10	Milho+Braq (P) PD	Braq (P)	Soja PD	Braq (P)
2010/11	Braq (P)	Braq (P)	Braq (P)	Braq (P)
2011/12	Braq (P)	Braq (P)	Milho+Braq (P) PD	Braq (P)
2012/13	Braq (P)	Braq (P)	Braq (P)	Braq (P)
2013/14	Soja PD	Pousio	Braq (P)	Braq (P)
2014/15	Arroz PD	Pousio	Soja PD	Pousio

<sup>1</sup> Feijão c., feijão comum; <sup>2</sup> PC, plantio convencional; PD, plantio direto; <sup>3</sup> Milho + Braq (C), milho com *Urochloa* spp. cultivada como cultura de cobertura; <sup>4</sup> Braq (C), *Urochloa* spp. cultivada como cultura de cobertura; <sup>5</sup> Milho + Braq (P), milho com *Urochloa* spp. cultivada como pastagem; <sup>6</sup> Braq (P), *Urochloa* spp. cultivada como pastagem.

A acidez potencial (H+Al) foi medida com extração em solução de acetato de

cálcio a  $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  a pH 7 e posterior titulação com  $0,025 \text{ mol L}^{-1}$  NaOH, usando  $10 \text{ g L}^{-1}$  de fenolftaleína como indicador Silva (2009). O alumínio foi extraído usando solução de KCl ( $1 \text{ mol L}^{-1}$ ) e titulação com NaOH, conforme Bertsch & Bloom (1996) modificado por Silva (2009). As propriedades do solo na camada superficial (0,0-0,1 m de profundidade) podem ser encontradas na Tabela 4.2.

**Tabela 4.2.** Principais características químicas do Latossolo Vermelho acriférrico típico, carbono orgânico do solo (COS) e textura do solo na camada superficial (0,0-0,1 m), amostras para os dois piquetes sob sistema de integração lavoura-pecuária sob manejo diferenciado e vegetação nativa adjacente em Santo Antônio de Goiás, Goiás, Brasil

Area	pH	Ca	Mg	Al	H + Al	K	COS	Argila	Silte	Areia
	H <sub>2</sub> O	----- mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----				mg dm <sup>-3</sup>	----- g kg <sup>-1</sup> -----			
Piquete 4	6,1	14,6	8,5	0,0	22,0	296,5	19,9	534	144	321
Piquete 5	5,8	12,3	6,6	0,5	27,7	133,7	18,8	514	109	376
Floresta	5,2	0,8	1,0	8,0	62,7	36,3	41,0	449	114	436

Amostras de solo para análises do teor da matéria orgânica foram coletadas como segue: 0,0-0,1m em 1999 e 2013; 0,0-0,1m e 0,1-0,3 m em 2007, 2010 e 2014. A matéria orgânica foi determinada pelo método Walkley-Black (Nelson & Sommers, 1996) sem fonte externa de calor, usando ácido sulfúrico para geração de calor. A conversão do foi realizada admitindo-se 58% de COS na MOS (Segnini et al., 2008). Amostras de solo da vegetação nativa vizinha (Figura 4.1) também foram coletadas (n=4) para estimar o conteúdo inicial de C, devido à ausência de dados de C para as áreas de interesse antes de seu uso agrícola.

#### *Dados de entrada para o modelo CQESTR*

A maior parte dos dados requeridos para alimentar o modelo foi provida pela Embrapa Arroz e Feijão e outras informações requeridas foram obtidas na literatura. Médias diárias de temperatura do ar e a precipitação média mensal foram fornecidas da estação meteorológica da Embrapa Arroz e Feijão. Cada piquete recebeu 100 animais com aproximadamente 320 kg de peso vivo. O pastejo rotacionado contava com 10 dias em pastejo e 56 dias de descanso por ciclo, assim, durante todo o ano cada piquete recebia animais por 52 dias. A quantidade de esterco foi estimada com base nessas informações na produção diária de esterco sugerida por Asae (2003) e variou de 13 a 12 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> para

P4 e P5, respectivamente. Dados de biomassa de raízes e parte aérea da braquiária foram providos pela Embrapa Arroz e Feijão.

A produção anual de grãos foi extraída do banco de dados da Conab<sup>2</sup> que conta com dados desde a safra 1976/77 até 2012/13. Tais informações foram utilizadas para calcular a quantidade de resíduos depositados sobre o solo após a colheita, baseado no índice de colheita médio da cultura, que foi utilizada para a criação de arquivos *crop files*. Devido à crescente variação ao longo do tempo, as culturas foram agrupadas pela produtividade. As produtividades utilizadas nas simulações foram como segue: o milho foi dividido em 2225, 4939, 4481 e 7620 kg ha<sup>-1</sup>; o arroz de terras altas em 965 e 2069 kg ha<sup>-1</sup>; a soja em 1845 e 2801 kg ha<sup>-1</sup>; e o feijão comum 522, 1718 e 2738 kg ha<sup>-1</sup>. Foi utilizada uma produção de resíduos de 4266 kg ha<sup>-1</sup> para milheto e 1800 kg ha<sup>-1</sup> para plantas voluntárias nos períodos de pousio. Baseado em dados providos pela Embrapa Arroz e Feijão, a produção de resíduos de *U. brizantha* e *U. ruziziensis* variando de 4850-12730 e 3100-15090 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente, foi utilizada nas simulações para os períodos de crescimento de 0,5 a 4 anos.

Nas simulações, o plantio, a 0,05 m de profundidade, foi realizado numa única passada de semeadora com discos de corte com mínima perturbação da superfície do solo em todos os anos, à exceção das semeaduras de verão em 2003 e 2007 para P4 e P5, respectivamente. Nesses anos, foi realizado o plantio convencional com 2 gradagens a 0,03 m e a 0,09 m de profundidade.

Outras informações requeridas pelo modelo CQESTR também foram providas pela Embrapa Arroz e Feijão, como biomassa de raízes, conteúdo de N dos resíduos no início da decomposição, resíduos remanescentes na superfície do solo após cada operação de preparo, conteúdo de matéria orgânica, densidade do solo de cada camada. O CQESTR é o único modelo que é capaz de trabalhar com mais de uma camada de solo (até 5) em condições de clima temperado. Assim, neste trabalho consideramos duas camadas, 0,0-0,1 e 0,1-0,3 m. As variáveis de entrada para conteúdo inicial de MOS nas camadas 0,0-0,1 e 0,1-0,3 m foram 15 e 25 g kg<sup>-1</sup> e a correspondente densidade do solo para estas camadas 1,34 e 1,35 g cm<sup>-3</sup>, respectivamente. O COS foi escolhido como variável de saída para os dados simulados, sendo convertido para estoque, com base na densidade do solo para cada uma das camadas.

---

<sup>2</sup> Disponível no endereço eletrônico <<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&ordem=produto>>

### *Calibração e validação do modelo CQESTR*

O P5 foi selecionado especificamente para a calibração e o P4 foi utilizado na validação do modelo CQESTR. A exata rotação de culturas praticada em cada um dos piquetes é apresentada na Tabela 4.1. A partir do ano de 2010 até 2039 repetidos ciclos de iLP foram considerados, consistindo de ciclos de 5 anos para P4 (milho semeado com braquiária seguido de 4,5 anos na fase pastejo) e ciclos de 6 anos para P5 (soja-pousio, arroz-pousio e milho semeado com braquiária seguido de 3,5 anos na fase pastejo). Os arquivos específicos para cada cultura, criados com dados descritos acima, bem como arquivos de operações de manejo do solo foram utilizados nas simulações. A dinâmica do COS nas camadas 0,0-0,1 e 0,1-0,3 m foi simulada para 50 anos (1990-2039) e os resultados obtidos comparados a dados observados de COS para os anos de 1999, 2007, 2010, 2013 e 2014 para a camada 0,0-0,1 m, e em 2007, 2010 e 2014 para a camada 0,1-0,3 m.

### *Simulações no CQESTR para rotações de culturas em diferentes cenários*

Cenários de manejo adicionais foram simulados para representar a adoção de sistemas de culturas e a transição para iLP com diferentes rotações de culturas. Dois cenários de rotações de iLP foram preparados para o P4, com ciclos de 5 anos (milho semeado com braquiária seguido de 4,5 anos na fase pastejo) em PD e em PC. Ciclos de 6 anos para P5 (soja-pousio, arroz-pousio e milho semeado com braquiária seguido de 3,5 anos na fase pastejo) em PD. Resíduos de biomassa vegetal após a colheita, biomassa da pastagem remanescente e esterco adicionado aos piquetes estimados para o ano atual foram utilizados nas simulações para os cenários futuros (incrementos de produtividade não foram considerados).

Três cenários adicionais foram preparados contando com rotações soja-milho. O primeiro cenário, consistiu de soja semeada como cultura de verão seguida de milho ãsafrinhaõ em PD (Soja-MS(PD)); no segundo cenário, soja e milho foram alternados a cada ano como cultura de verão (única colheita) em PD (Soja/Milho(PD)); e, finalmente, no terceiro cenário, soja e milho foram alternados a cada ano como cultura de verão, igualmente em colheita única, em PC (Soja/Milho(PC)). Em PC as operações de preparo consistiram de aração com disco (0,1 m profundidade) e gradagens (sendo a primeira a

0,07 m e a segunda a 0,03 m de profundidade).

#### *Avaliação do modelo CQESTR*

O desempenho do modelo foi avaliado conforme descrito por Liang et al. (2009), usando ferramentas estatísticas de análises de regressão e quadrado médio dos desvios (mean square deviation, MSD). Os três componentes do MSD, viés quadrado (squared bias, SB), inclinação não unitária (non-unit slope, NU) e falta de correlação (lack of correlation, LC), são inteiramente independentes e relacionados aos termos da equação de regressão linear ( $Y = a + bX$ ) e ao coeficiente de correlação de regressão ( $r^2$ ) (Gauch Jr. et al., 2003).

### 4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### *Calibração do CQESTR*

O modelo CQESTR foi calibrado para o bioma Cerrado no estado de Goiás pela variação e avaliação do coeficiente de decomposição da equação do modelo (Liang et al., 2009). Na simulação inicial para o P5, o COS na camada 0,0-0,1 m foi subestimado em 9,39 Mg ha<sup>-1</sup> em 2014. Baseado na diferença entre as taxas de decomposição para ecossistemas tropicais e temperados, um ajuste no coeficiente de decomposição,  $k$ , de 0,0004 para 0,0003 °C<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> melhorou a acurácia do modelo para esse ambiente. A simulação do COS para P5, usando os valores ajustados de  $k$  resultou numa melhora do MSD, que caiu de 13,05 para 2,11. Ademais, nessas condições a subestimação do COS predito para a camada 0,0-0,1 m para o ano de 2014 foi de apenas 3,45 Mg ha<sup>-1</sup>. Isto, muito provavelmente é devido à alta capacidade desses solos em reter COS em função de seu conteúdo de argila (Tabela 4.2) e elevado teor de óxidos de ferro e alumínio, que resultam em diferentes mecanismos de estabilização do C no solo (Dick et al., 2009; Leite et al., 2009; Bayer et al., 2011) e que não são considerados pelo CQESTR. Maiores melhorias do modelo não foram possíveis no presente estudo para a camada 0,1-0,3 m por não haver dados suficientes para a calibração. O CQESTR simulou um decréscimo do COS de 19,07 e 13,15 Mg ha<sup>-1</sup> para a camada de 0,1-0,3 m para o período entre 1990 e 2039 com o coeficiente  $k$  original e com o coeficiente ajustado, respectivamente, ao passo que os dados

observados indicaram um acréscimo de  $16,68 \text{ Mg ha}^{-1}$  no COS somente para o período entre 2007 e 2014.

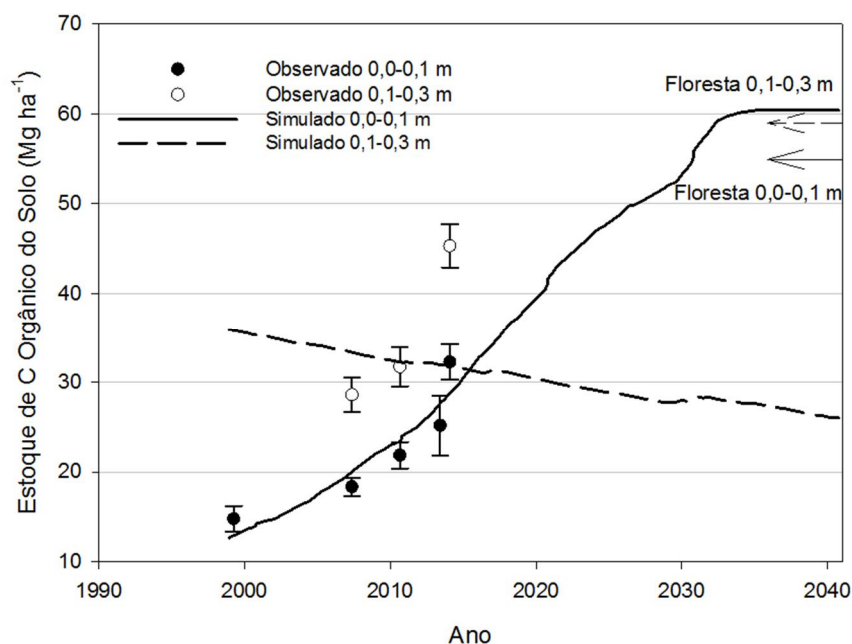
Possivelmente alguns mecanismos de deposição e, principalmente, estabilização de C, via interações organo-minerais, para camadas mais profundas em solos tropicais não estão inclusos no CQESTR. Ademais uma subestimação da contribuição da biomassa radicular para o C do solo nessa camada resultou em tendência de decréscimo na camada 0,1-0,3 m. Informações limitadas sobre biomassa e distribuição do sistema radicular para essas culturas e condição climática estão disponíveis na literatura e estimativas derivadas de dados publicados podem não refletir a condição real observada no local de estudo (Liang et al., 2009).

O conteúdo de COS da floresta ( $54,94 \text{ Mg ha}^{-1}$ ), considerado como o conteúdo inicial de COS antes da abertura da área para agricultura, poderia ser reestabelecido no P5 em sistema iLP em 15 anos (em torno de 2030, Figura 4.2), apenas mantendo o sistema iLP e os ciclos de rotação, se as condições de temperatura e precipitação atuais para a região permanecessem inalteradas. Além do mais, a acumulação de COS, como simulado, poderia resultar em um novo estado de equilíbrio do sistema no nível de  $60,3 \text{ Mg ha}^{-1}$ , atingido quatro anos mais tarde (em 2034) como mostra a Figura 4.2. Carvalho et al. (2010) avaliaram a conversão de sistemas de produção de grãos em iLP e observaram uma tendência de acréscimo no C do solo nas camadas superficiais, embora diferenças significativas não tenham sido observadas durante os oito anos após a implementação da iLP. Salton et al. (2011) avaliaram o impacto de diferentes manejos de solo no conteúdo de C do solo e encontraram que os estoques e taxas de acumulação de C foram baixos em sistemas de produção de grãos, intermediários em iLP e os mais elevados foram observados em pastagem. Muniz et al. (2011) obtiveram conteúdos de C em iLP superiores aos encontrados na pastagem degradada, mas ambos inferiores aos encontrados em área de vegetação nativa.

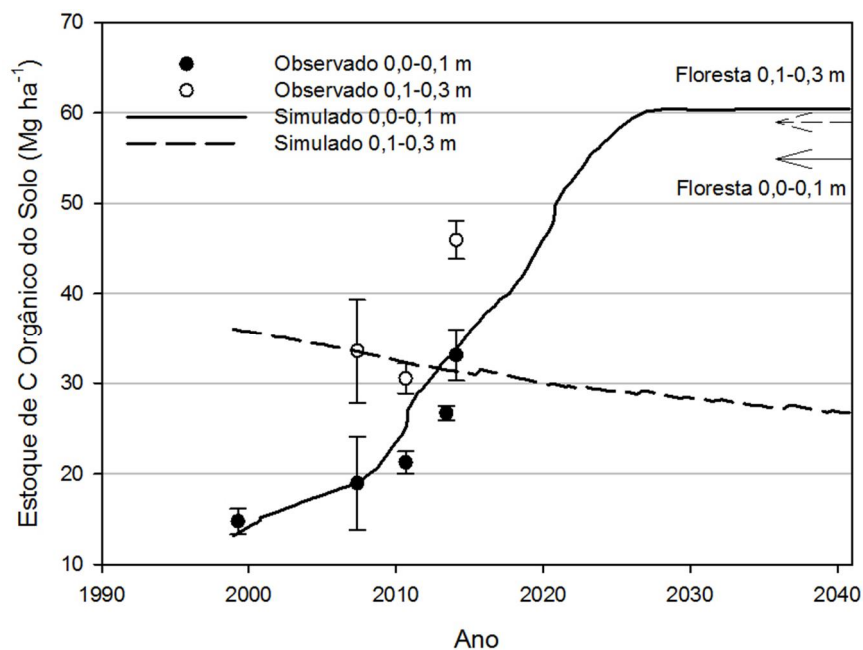
### *Validação do CQESTR*

Os estoques de COS medidos e simulados aumentaram na camada superficial no P4 (Figura 4.3). Os valores medidos de COS no P4 apresentaram padrão similar àquele observado para o P5 (Figura 4.2), apesar de essa última área ter uma rotação de culturas mais complexa. Ambas as áreas se situavam em condições edáficas similares, entretanto,

P4 permaneceu mais tempo na fase pastagem (0,5 anos sob cultivo de grãos + 4,5 anos sob pastagem) que P5, e as braquiárias são bastante produtivas em termos de biomassa e possuem sistema radicular abundante e agressivo, o que poderia contribuir para o incremento do COS em todo o perfil de solo. Isso, provavelmente foi uma das razões para o incremento dos valores de COS em iLP, mesmo nas camadas mais profundas de solo. Outra possível razão poderia ser a perturbação do solo na camada superficial durante a semeadura, mesmo em PD, que ocorreu com mais frequência no P5. Adicionalmente, P4 tem uma área 0,6 ha (7,4 %) menor que o P5, mas recebeu sempre a mesma quantidade total de esterco (que resulta em maior quantidade de esterco  $\text{ha}^{-1}$ ), atingindo, então, o estoque inicial de COS mais cedo que P5, em torno de 2023 (Figura 4.2). Além do mais, P4 atingiu o novo estado de equilíbrio do sistema após 5 anos (em torno de 2028). Assim, maiores quantidades de esterco por unidade de área associado à menor perturbação do solo pelas operações de plantio em P4 contribuíram para o estoque de COS maior que em P5.



**Figura 4.2.** Estoque de carbono orgânico do solo (COS) simulado e observado para as camadas 0,0-0,1 e 0,1-0,3 m para o Piquete 5 num Latossolo Vermelho acriférrico típico de textura argila, em sistema de integração lavoura-pecuária em Santo Antônio de Goiás, GO, Brasil. As setas representam o COS da floresta (inicial).



**Figura 4.3.** Estoque de carbono orgânico do solo (COS) simulado e observado para as camadas 0,0-0,1 e 0,1-0,3 m para o Piquete 4 num Latossolo Vermelho acriférrico típico de textura argila, em sistema de integração lavoura-pecuária em Santo Antônio de Goiás, GO, Brasil. As setas representam o COS da floresta (inicial).

O P5 recebeu leguminosas mais vezes que o P4, tipicamente soja, e isto poderia ser outra razão para a diferença no conteúdo de COS das duas áreas. A soja, com elevada eficiência na fixação biológica de N, é usualmente cultivada sem adição de fertilizante nitrogenado, usando somente a inoculação com bactérias do gênero *Rhizobium spp.* para suprir a necessidade desse nutriente pela cultura. Em geral, a maior parte do N fixado biologicamente pela soja é exportada nos grãos, resultando em um balanço de N nulo ou negativo no sistema, o que reduz a acumulação de C (Sisti et al., 2004; Urquiaga et al., 2006; Bayer et al., 2011). Esses autores recomendam a introdução de leguminosas como adubos verdes na rotação para promover o sequestro de C no solo. De acordo com Souza et al. (2009), o N da fixação biológica pode promover maior acumulação de C que fontes minerais do nutriente.

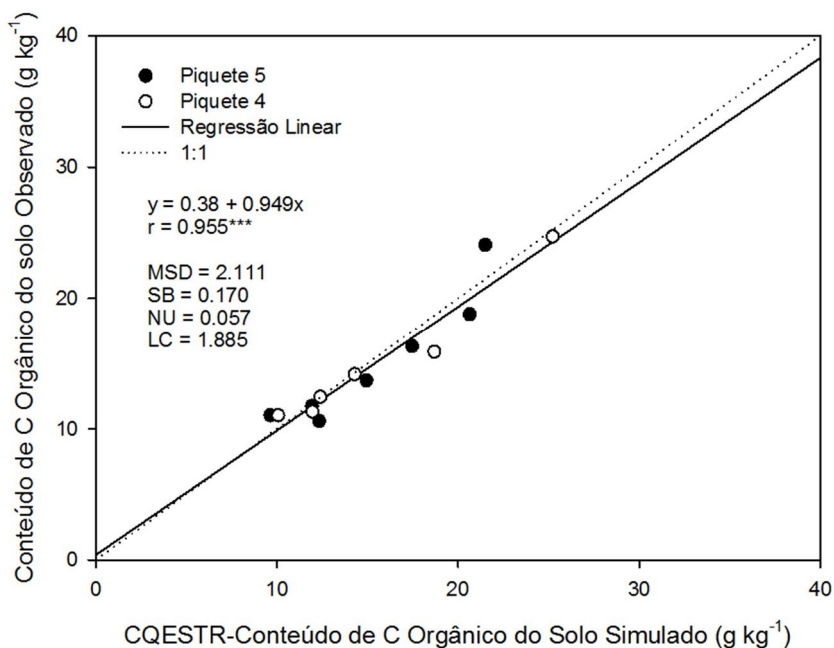
A tendência de acumulação do COS foi predita pelo CQESTR com acurácia para a primeira camada de solo, contudo, subestimou para a segunda camada. O modelo simulou uma tendência de constante decréscimo para a camada 0,1-0,3 m, enquanto os dados medidos de COS indicaram acréscimo. A mais provável razão para essa discrepância é a falta dos coeficientes corretos de distribuição do sistema radicular de gramíneas tropicais para o CQESTR. As informações disponíveis sobre biomassa de raízes das

gramíneas tropicais mais comumente utilizadas são ainda insuficientes. Adicionalmente, as complexas relações e interações que ocorrem entre os componentes do sistema iLP, como a influência do pastejo pelos animais, que estimula o crescimento radicular e a produção de exudatos pelas raízes, podem modificar a relação de biomassa acima e abaixo do solo e assim, a qualidade do C adicionado ao solo (Bayer et al., 2011), influenciando os estoques de C e a decomposição da MOS no perfil do solo.

#### *Avaliação estatística das simulações*

A avaliação estatística das simulações foi feita para os teores de COS e não para estoques, para que os possíveis erros associados com a determinação quando da avaliação da densidade do solo não fossem incluídos na análise. Os dados medidos e simulados, para o relativamente pequeno número de valores observados, foram significativamente ( $P = 0.001$ ) correlacionados ( $r = 95\%$ ) com um MSD de 2,11, indicando que o modelo capturou muito bem a dinâmica espaço-temporal do COS na camada superficial do solo para o sistema iLP, mesmo com os dados limitados de COS (Figura 4.4). A maior parte dos erros da simulação foi associada com a falta de correlação (1,885), que foi o maior componente (89%) do MSD (Figura 4.4). O viés quadrático (SB) e a inclinação não unitária (NU) foram os menores componentes do MSD com 8% e 3%, respectivamente. A falta de correlação (LC) é, muito provavelmente, devida à subestimação do COS na camada subsuperficial.

Leite et al. (2009), simulando a dinâmica do COS para Argissolo Vermelho Amarelo e Latossolo Vermelho Amarelo em condições tropicais utilizando o CQESTR, encontraram que o SB foi o maior componente do MSD e concluíram que o modelo estava mais apto a simular a dinâmica do COS sob diferentes sistemas de manejo em alguns solos do que em outros, neste caso, o melhor desempenho foi para Argissolos, considerando as condições de clima avaliadas. De acordo com Gauch Jr. et al. (2003), problemas relacionados com a LC elevada na composição do MSD da análise de um modelo não são fáceis de resolver, ao contrário do SB e NU que são relativamente simples para reduzir. Neste sentido, é correto afirmar que o CQESTR teve bom desempenho na predição da tendência de acumulação de C na camada superficial e um desempenho insatisfatório para a subsuperfície, requerendo ainda, para simulações em subsuperfície, modificações para as condições de solos e clima tropicais.



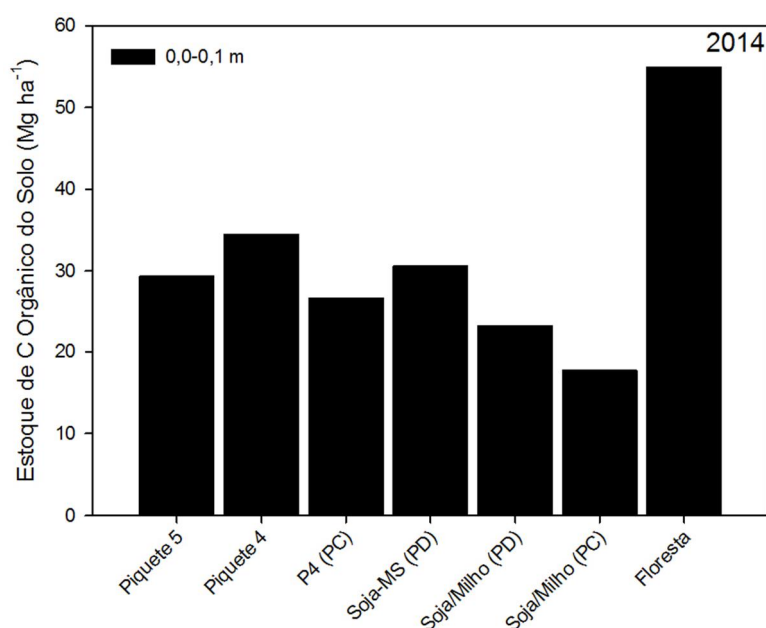
**Figura 4.4.** Regressão linear de dados observados e simulados de carbono orgânico do solo nas camadas 0,0-0,1 e 0,1-0,3 m para o Piquete 4 e o Piquete 5 num Latossolo Vermelho acriférrico típico de textura argila, em sistema de integração lavoura-pecuária em Santo Antônio de Goiás, GO, Brasil. MSD: *Mean Square Deviation* ou quadrado médio dos desvios; SB: *Squared bias* ou viés quadrado; NU: *Non-unity slope* ou inclinação não unitária; e LC: *Lack of correlation* ou falta de correlação.

#### *Cenários de rotação de culturas no CQESTR*

Uma comparação entre os cenários simulados em 2014 apontou diferenças nos estoques de COS para a camada de 0,0-0,1 m (Figura 4.5). O P4, sob plantio direto, foi o melhor cenário de manejo de acordo com a simulação pelo CQESTR, com o maior estoque de COS ( $33,80 \text{ Mg ha}^{-1}$ ). Em comparação com o P4, um decréscimo de  $7,8 \text{ Mg ha}^{-1}$  foi simulado para a camada superficial no cenário P4 (PC), com a mesma rotação de culturas do P4 mas em plantio convencional.

O cenário Soja-MS (PD) apresentou o segundo maior estoque de COS na primeira camada de solo, superando o P5. Embora o P5 tenha recebido grande conteúdo de C, muito desse foi adicionado sob a forma de esterco, somente na camada superficial do solo e, provavelmente teve decomposição mais lenta, uma vez que esterco é mais estável que resíduos vegetais e é menos incorporado ao perfil do solo. Por outro lado, se apenas os resíduos vegetais forem considerados, a rotação Soja-MS (PD) recebeu mais resíduos que o P5 e, como o milho foi cultivado no cenário anualmente, ainda que em safrinha, a

contribuição dos resíduos radiculares para o C do solo em perfil seria maior. Este fato contradiz alguns estudos em que houve decréscimo do COS em PD comparado com iLP ou pastagens (Carvalho et al., 2010; Loss et al., 2011; Salton et al., 2011; Salton et al., 2014); todavia, Carvalho et al. (2010) salientaram que o PD, dependendo da situação, não é adequadamente conduzido, principalmente no Cerrado, onde as elevadas temperaturas e umidade (durante a estação chuvosa) não favorecem a manutenção dos resíduos vegetais sobre o solo, e o CQESTR simula o sistema PD manejado em condições ideais.



**Figura 4.5.** Estoque de carbono orgânico simulado para sistemas de integração lavoura-pecuária Piquete 4 (P4) e Piquete 5 (P5) e quatro cenários de manejo, P4 sob plantio convencional (P4 (PC)); soja seguida por milho ôsafrinhaö sob plantio direto (Soja-MS (PD)); soja e milho semeados como cultura de verão sob plantio direto (Soja/Milho (PD)); e soja e milho semeados como cultura de verão sob plantio convencional (Soja/Milho (PC)), para a camada de 0,0-0,1 m em Latossolo Vermelho acriférrico típico de textura argila (Santo Antônio de Goiás, GO, Brasil).

O modelo subestimou a taxa de acumulação do estoque de COS para o P5 (32,26 vs 28,81 Mg ha<sup>-1</sup>) para o período de 1999 a 2014 (Tabela 4.3). Considerando o período entre o desflorestamento (1970) e o final da simulação para iLP (2040), tanto P4 como P5 apresentaram a mesma taxa de acumulação de COS (0,08 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>). Redução nos estoques de COS foi observada para os cenários de rotação soja e milho, entre os quais Soja/Milho (PC) apresentou as maiores perdas (30,96 Mg ha<sup>-1</sup>). As maiores taxas de perda de COS foram observadas para os cenários em que soja e milho foram semeados

como culturas de verão (0,17 e 0,44 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> para PD e PC, respectivamente). Portanto, mesmo sob PD, quando há menor intensidade de manejo do solo (Soja/Milho (PD)) comparado ao PC (Soja/Milho (PC)), há baixa entrada de resíduos no sistema. Assim, a sucessão soja-milho é a menos provável de melhorar os estoques de COS e recuperar os estoques iniciais do mesmo modo que sistemas iLP, em que há grande entrada de resíduos. Tem sido demonstrado que sistemas intensivos de produção são drenos potenciais de CO<sub>2</sub> atmosférico para o solo (Balbino et al., 2012; Salton et al., 2014). Embora, em iLP, se as emissões de metano oriundas da fermentação entérica forem consideradas, o sistema poderia requerer mais tempo para mitigar as emissões adicionais pelos animais e o solo, eventualmente se tornar um dreno de C e recuperar o estoque inicial de COS.

**Tabela 4.3.** Estoques de carbono orgânico do solo, variação e taxa observada para as áreas integração lavoura-pecuária no Piquete 4 (P4) e Piquete 5 e para os cenários de manejo, P4 sob plantio convencional (P4 (PC)); soja seguida por milho ôsafrinhaõ sob plantio direto (Soja-MS (PD)); soja e milho semeados como cultura de verão sob plantio direto (Soja/Milho (PD)); e soja e milho semeados como cultura de verão sob plantio convencional (Soja/Milho (PC)), para a camada de 0,0-0,1 m num Latossolo Vermelho acriférrico típico de textura argila (Santo Antônio de Goiás, GO, Brasil).

Sistema de produção	Estoques COS			
	1999	2014	taxa	
	-----Mg ha <sup>-1</sup> -----		-----Mg ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> -----	
	<b>Observado</b>			
Piquete 5	14,77	32,26	17,50	1,17
Piquete 4	14,77	33,12	18,35	1,22
	<b>Simulado</b>			
Piquete 5	12,92	28,81	15,89	1,06
Piquete 4	13,50	33,80	20,30	1,35
P4 (PC)	13,25	26,00	12,75	0,85
Soja-MS (PD)	13,74	30,18	16,44	1,10
Soja/Milho (PD)	12,77	22,87	10,10	0,67
Soja/Milho (PC)	13,04	17,60	4,56	0,30
	1970	2040	taxa	
Piquete 5	54,94	60,39	5,45	0,08
Piquete 4	54,94	60,39	5,45	0,08
P4 (PC)	54,94	60,13	5,19	0,07
Soja-MS (PD)	54,94	55,41	0,47	0,01
Soja/Milho (PD)	54,94	42,90	-12,04	-0,17
Soja/Milho (PC)	54,94	23,98	-30,96	-0,44

#### 4.4 CONCLUSÕES

O modelo CQESTR estimou com acurácia o COS para a camada de 0,0-0,1 m de profundidade após o ajuste do coeficiente da taxa de decomposição básica,  $k$ . No entanto, o modelo subestimou os valores medidos de COS para a segunda camada (0,1-0,3 m).

Uma forma de melhorar as simulações da tendência do COS no CQESTR para a subsuperfície seria revisar os coeficientes de distribuição de raízes para capturar melhor a arquitetura radicular de gramíneas tropicais no perfil de solo e prover melhores estimativas para a distribuição e respectiva contribuição da biomassa de gramíneas tropicais para o COS.

O carbono orgânico do solo (COS) aumentou na camada superficial (0,0-0,1 m) em sistema de integração lavoura-pecuária (iLP), indicando o potencial desse sistema de produção para a acumulação de C. Embora o P4 com maior presença da pastagem e P5 com menor presença da pastagem, apresentassem a mesma taxa de acumulação do COS, na simulação ( $0,08 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ) no longo prazo (até o ano 2040), o P4 atingiu um estado de equilíbrio de COS antes (ano 2028) do P5 (ano 2030).

Comparando os resultados da simulação com o modelo CQESTR para diferentes sistemas de produção até 2040, o iLP, independentemente da rotação utilizada e de tipo de uso da terra (culturas anuais e pastagem) e do uso de plantio direto (PD) ou plantio convencional (PC), foi o mais efetivo em acumular C no solo, apresentando taxa de acúmulo de C positivo. Sistemas de produção soja/milho para obtenção de grãos, independentemente do tipo de manejo, PD ou PC, promoveram perda de C do solo em latossolo de textura argila em condições do Cerrado.

#### 4.5 REFERÊNCIAS

AGRITEMPO. **Sistema de Monitoramento Agrometeorológico**. Embrapa Informática Agropecuária / CEPAGRI-Meteorologia Unicamp. 2014. Disponível em: <<http://www.agritempo.gov.br/agritempo/produtos.jsp?siglaUF=GO>>. Acesso em: 08 Fev. 2014.

AL-ADAMAT, R.; RAWAJFIH, Z.; EASTER, M.; PAUSTIAN, K.; COLEMAN, K.; MILNE, E.; FALLOON, P.; POWLSON, D. S.; BATJES, N. H. Predicted soil organic carbon stocks and changes in Jordan between 2000 and 2030 made using the GEFSOC Modelling System. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 122, n. 1,

p. 35-45, 2007.

ASAE. Manure Production and Characteristics. **ASAE standards 2003**. St. Joseph, MI: The Society for engineering in agricultural, food, and biological systems, 2003. Disponível em:

<[http://www.manuremanagement.cornell.edu/Pages/General\\_Docs/Other/ASAE\\_Manure\\_Production\\_Characteristics\\_Standard.pdf](http://www.manuremanagement.cornell.edu/Pages/General_Docs/Other/ASAE_Manure_Production_Characteristics_Standard.pdf)>. p. 682-685.

BALBINO, L. C.; CORDEIRO, L. A. M.; OLIVEIRA, P.; KLUTHCOUSKI, J.; GALERANI, P. R.; VILELA, L. Agricultura sustentável por meio da integração lavoura-pecuária-floresta (iLPF). **Informações Agrônomicas**, Brasil, v. 2, n. 138, p. 1-18, 2012. Disponível em: <[http://www.ipni.net/publication/ia-brasil.nsf/0/37D541B90CDB2E1685257A84005C6490/\\$FILE/Jornal1-18-138.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-brasil.nsf/0/37D541B90CDB2E1685257A84005C6490/$FILE/Jornal1-18-138.pdf)>. Acesso em: 14 Jan. 2014.

BAYER, C.; AMADO, T. J. C.; TORNQUIST, C. G.; CERRI, C. E. C.; DIECKOW, J.; ZANATTA, J. A.; NICOLOSO, R. D. S. Estabilização do carbono no solo e mitigação das emissões de gases de efeito estufa na agricultura conservacionista. In: KLAUBERG FILHO, O.; MAFRA, A. L.; GATIBONI, L. C. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2011. p. 55-117. 7 cap.

BERTSCH, P. M.; BLOOM, P. R. Aluminium. In: SPARKS, D. L.; PAGE, A. L.; HELMKE, P. A.; LOEPPERT, R. H.; SOLTANPOUR, P. N.; TABATABAI, M. A.; JOHNSTON, C. T.; SUMNER, M. E. (Ed.). **Methods of soil analysis: Part 3 - Chemical Methods**. Madison, Wisconsin, USA: Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, 1996. p. 517-550. 18 cap. SSSA Book series, 5.

BUNGENSTAB, D. J. A posição estratégica dos sistemas de integração no contexto da agropecuária e do meio ambiente. In: BUNGENSTAB, D. J. (Ed.). **Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta: a produção sustentável**. Brasília: Embrapa, 2012. p. 217-224. 16 cap.

CARVALHO, J. L. N.; RAUCCI, G. S.; CERRI, C. E. P.; BERNOUX, M.; FEIGL, B. J.; WRUCK, F. J.; CERRI, C. C. Impact of pasture, agriculture and crop-livestock systems on soil C stocks in Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 110, n. 1, p. 175-186, 2010.

DIAS-FILHO, M. B. **Diagnóstico das Pastagens no Brasil**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2014. (Documentos 402).

DICK, D. P.; NOVOTNY, E. H.; DIECKOW, J.; BAYER, C. Química da matéria orgânica do solo. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. (Ed.). **Química e mineralogia do solo: Parte II - Aplicações**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. p. 1-68. XI cap.

GAUCH JR., H. G.; HWANG, J. T. G.; FICK, G. W. Model evaluation by comparison of model-based predictions and measured values. **Agronomy Journal**, Madison, v. 95, n. 6, p. 1442-1446, 2003.

GEE, G. W.; OR, D. Particle-size analysis. In: DANE, J. H.; CLARKE-TOPP, G.; CAMPBELL, G. S.; HORTON, R.; JURY, W. A.; DONALD, R. N.; VAN-ES, H. M.;

WIERENGA, P. J. (Ed.). **Methods of soil analysis**: Part 4 - Physical methods. Madison, Wisconsin, USA: Soil Science Society of America, 2002. p. 255-293. 2.4 cap. SSSA Book series, 5.

GOLLANY, H. T.; FORTUNA, A. M.; SAMUEL, M. K.; YOUNG, F. L.; PAN, W. L.; PECHARCO, M. Soil Organic Carbon accretion vs. Sequestration using physicochemical fractionation and CQESTR simulation. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 77, n. 2, p. 618-629, 2012.

GROSSMAN, R. B.; REINSCH, T. G. Bulk density and linear extensibility. In: DANA, J. H.; TOPP, G. C. (Ed.). **Methods of soil analysis**: Part 4 - Physical methods. Madison, Wisconsin, USA: Soil Science Society of America, 2002. p. 201-228. ?? cap. SSSA Book series, X.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapa de Clima do Brasil**. Rio de Janeiro: Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão / Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Esc. 1:5.000.000. 2002. Disponível em: <ftp://geoftp.ibge.gov.br/mapas\_tematicos/mapas\_murais/clima.pdf>. Acesso em: 7 Out. 2014.

KAMONI, P. T.; GICHERU, P. T.; WOKABI, S. M.; EASTER, M.; MILNE, E.; COLEMAN, K.; FALLOON, P.; PAUSTIAN, K.; KILLIAN, K.; KIHANDA, F. M. Evaluation of two soil carbon models using two Kenyan long term experimental datasets. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 122, n. 1, p. 95-104, 2007.

KRAVCHENKO, A. N.; ROBERTSON, G. P. Whole-profile soil carbon stocks: The danger of assuming too much from analyses of too little. **Soil Science Society of American Journal**, v. 75, n. 1, p. 235-240, 2011.

KUO, S. Phosphorus. In: SPARKS, D. L.; PAGE, A. L.; HELMKE, P. A.; LOEPPERT, R. H.; SOLTANPOUR, P. N.; TABATABAI, M. A.; JOHNSTON, C. T.; SUMNER, M. E. (Ed.). **Methods of soil analysis**: Part 3 - Chemical Methods. Madison, Wisconsin, USA: Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, 1996. p. 869-919. 32 cap. SSSA Book series, 5.

LEITE, L. F. C.; DORAISWAMY, P. C.; CAUSARANO, H. J.; GOLLANY, H. T.; MILAK, S.; MENDONÇA, E. S. Modeling organic carbon dynamics under no-tillage and plowed systems in tropical soils of Brazil using CQESTR. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 102, n. 1, p. 118-125, 2009.

LEMAIRE, G.; FRANZLUEBBERS, A.; CARVALHO, P. C. D. F.; DEDIEU, B. Integrated crop-livestock systems: Strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 190, n. s/n, p. 4-8, 2014.

LIANG, Y.; GOLLANY, H. T.; RICKMAN, R. W.; ALBRECHT, S. L.; FOLLETT, R. F.; WILHELM, W. W.; NOVAK, J. M.; DOUGLAS, C. L. Simulating soil organic matter with CQESTR (v. 2.0): Model description and validation against long-term experiments across North America. **Ecological Modelling**, v. 220, n. 4, p. 568-581, 2009.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; GIÁCOMO, S. G.; PERIN, A.; ANJOS, L. H. C. Agregação,

carbono e nitrogênio em agregados do solo sob plantio direto com integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 10, p. 1269-1276, 2011.

MAPA; MDA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento; Ministério do Desenvolvimento Agrário. **Plano setorial de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas para a consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono na agricultura. Plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono)**. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento / Ministério do Desenvolvimento Agrário, 2012.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2 ed. Lavras: UFLA, 2006. 729 p.

MUNIZ, L. C.; MADARI, B. E.; TROVO, J. B. F.; CANTANHÊDE, I. S. D. L.; MACHADO, P. L. O. A.; COBUCCI, T.; FRANÇA, A. F. S. Soil biological attributes in pastures of different ages in a crop-livestock integrated system. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 10, p. 1262-1268, 2011.

NELSON, D. W.; SOMMERS, L. E. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: SPARKS, D. L.; PAGE, A. L.; HELMKE, P. A.; LOEPPERT, R. H.; SOLTANPOUR, P. N.; TABATABAI, M. A.; JOHNSTON, C. T.; SUMNER, M. E. (Ed.). **Methods of soil analysis: Part 3 - Chemical Methods**. Madison, Wisconsin, USA: Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, 1996. p. 961-1010. 34 cap. SSSA Book series, 5.

RICKMAN, R. W.; DOUGLAS JR., C. L.; ALBRECHT, S. L.; BUNDY, L. G.; BERG, J. L. CQESTR: A model to estimate carbon sequestration in agricultural soils. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 56, n. 3, p. 237- 242, 2001.

SALTON, J. C.; MERCANTE, F. 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**, v. 190, n. s/n, p. 70-79, 2014.

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; FABRÍCIO, A. C.; MACEDO, M. C. M.; BROCH, D. L. Teor e dinâmica do carbono no solo em sistemas de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 10, p. 1349-1356, 2011.

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

SILVA, F. C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 627 p. 2ª edição revista e ampliada.

SILVEIRA, J. **Estoques e indicadores de carbono em Cerradão e Cerrado Strictu Sensu**. 2010. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente)óEscola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.

SISTI, C. P. J.; SANTOS, H. P.; KOHHANN, R.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 76, n. 1, p. 39-58, 2004.

SOUZA, E. D.; COSTA, S. E. V. G. A.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. F.; ANDRIGUETI, M.; CAO, E. Estoques de carbono orgânico e de nitrogênio no solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto, submetido a intensidades de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 6, p. 1829-1836, 2009.

THOMAS, G. W. Soil pH and soil acidity. In: SPARKS, D. L.; PAGE, A. L.; HELMKE, P. A.; LOEPPERT, R. H.; SOLTANPOUR, P. N.; TABATABAI, M. A.; JOHNSTON, C. T.; SUMNER, M. E. (Ed.). **Methods of soil analysis: Part 3 - Chemical methods**. Madison, Wisconsin, USA: Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, 1996. p. 475-490. 16 cap. SSSA Book series, 5.

TORNQUIST, C. G.; MIELNICZUK, J.; CERRI, C. E. P. Modeling soil organic carbon dynamics in Oxisols of Ibirubá (Brazil) with the Century Model. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 105, n. 1, p. 33-43, 2009.

TSUKAMOTO FILHO, A. A.; COUTO, L.; NEVES, J. C. L.; PASSOS, C. A. M.; SILVA, M. L. Fixação de Carbono em um sistema agrossilvipastoril com eucalipto na região do cerrado de Minas Gerais. **Agrossilvicultura**, Viçosa, v. 1, n. 1, p. 29-41, 2004. Disponível em: <<http://www.sbag.org.br/03-SBAG-v1-n1-2004-29-41.pdf>>. Acesso em: 28 Jan. 2014.

URQUIAGA, S.; JANTALIA, C. P.; RESENDE, A. S.; ALVES, B. J. R.; BODDEY, R. M. **Capítulo 7: Contribuição da Fixação Biológica de Nitrogênio na Produtividade dos Sistemas Agrícolas na América Latina**. 2006. Disponível em: <<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/recursos/biotacap7ID-1aDona7p8o.pdf>>. Acesso em: 08 Fev. 2014.

WRIGHT, R. J.; STUCZYNSKI, T. I. Atomic absorption and flame emission spectrometry. In: SPARKS, D. L.; PAGE, A. L.; HELMKE, P. A.; LOEPPERT, R. H.; SOLTANPOUR, P. N.; TABATABAI, M. A.; JOHNSTON, C. T.; SUMNER, M. E. (Ed.). **Methods of soil analysis: Part 3 - Chemical Methods**. Madison, Wisconsin, USA: Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, 1996. p. 65-90. 4 cap. SSSA Book series, 5.

## **5            CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Os sistemas integrados de produção, integração lavoura-pecuária (iLP) e integração lavoura-pecuária-floresta (iLPF), são sistemas promissores para acumular carbono, não somente na biomassa das árvores e seus outros componentes mas no solo também, mostrando sinais de acumulação desde os primeiros anos de sua implantação. Entretanto, pela implantação dos sistemas integrados nas áreas avaliadas neste estudo ser relativamente recente, principalmente o iLPF, há que se ter cautela quanto às conclusões, visto que não há dados disponíveis de experimentos de longa duração para confirmar as avaliações que estão, ainda, em andamento. Faz-se necessário a ampliação da rede de monitoramento para, inclusive, realizar-se a calibração de modelos de simulação de C no solo para aplicação em iLPF, uma vez que a agilidade das simulações poderia facilitar a escolha do melhor arranjo e ciclo adotado no sistema.

Entretanto, mesmo para iLP, sistema consolidado há mais tempo no Brasil, ainda são requeridos estudos sobre a ciclagem da matéria orgânica para melhores ajustes de modelos para funcionarem adequadamente em ecossistemas tropicais sob sistemas integrados de produção.