UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
CENTRO DE ENERGIA NUCLEAR NA AGRICULTURA

Estoques de carbono do solo na mudança de uso da terra para o cultivo de cana-de-açúcar na região Centro Sul do Brasil

Francisco Fujita de Castro Mello

Piracicaba
2012

Francisco Fujita de Castro Mello

Estoques de carbono do solo na mudança de uso da terra para o cultivo de cana-de-açúcar na região Centro Sul do Brasil

Versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011

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

Área de Concentração: Química na Agricultura e no Ambiente

Orientador: Prof. Dr. Carlos Clemente Cerri

Piracicaba

2012

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

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Seção Técnica de Biblioteca - CENA/USP

Mello, Francisco Fujita de Castro

Estoques de carbono do solo na mudança de uso da terra para o cultivo de cana-de-açúcar na região Centro Sul do Brasil / Francisco Fujita de Castro Mello; orientador Carlos Clemente Cerri. - - versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2012.

102 p.: il.

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

1. Agricultura 2. Aquecimento global 3. Biocombustíveis 4. Cerrado 5. Densidade do solo 6. Dióxido de carbono 7. Etanol 8. Matéria orgânica do solo 9. Pastagens 10. Sustentabilidade I. Título

CDU (631.417.1 + 633.61) : 504.7

Aos meus pais Alcy e Angela, meus irmãos Fernanda e Tadeu e minha companheira Carol por todo carinho e apoio, dedico.

AGRADECIMENTOS

Ao orientador, Prof. Dr. Carlos Clemente Cerri pela oportunidade e confiança aplicada, imprescindível ao desenvolvimento deste projeto de pesquisa.

Ao Prof. Dr. Carlos Eduardo Cerri pelos valiosos conselhos e suporte científico.

A Professora Noel Michele Holbrook pela oportunidade de permanência junto do seu grupo de trabalho no *"Department of Organismic and Evolutionary Biology"* da Universidade de Harvard.

Aos diretores do programa de Ciência da Sustentabilidade de Universidade de Harvard, Bill Clark e Nancy Dickinson pela bolsa oferecida e oportunidade de participar de programa tão prestigiado no meio acadêmico.

Aos Professores, Paul Moorcroft e Steven Wofsy da Universidade de Harvard pelos valiosos ensinamentos.

Ao amigo e consultor do agronegócio Bernardo Ide, a época gerente de qualidade da Cosan, que auxiliou na seleção de áreas de produção de cana-de-açúcar no estado de São Paulo.

À *Shell Global Solutions*, especialmente ao Dr. Christian Davies pelo suporte científico.

Ao amigo, Prof. Dr. Stoécio Maia pelo auxílio no desenvolvimento dos fatores de mudança de uso da terra.

Ao Prof. Dr. Martial Bernoux do *Institut de recherche pour le développement-IRD* da França pelo auxílio no desenvolvimento das equações de pedotransferência.

Ao CTBE - Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol, especialmente ao Dr. Marcelo Galdos pelo apoio.

Ao Prof. Dr. Bernardo Rudorff do INPE, que auxiliou em etapas importantes desde o início deste projeto de pesquisa.

Ao Eduardo Reidel que auxiliou selecionar áreas de produção de cana-de-açúcar no estado do Mato Grosso do Sul.

Às Usinas de produção de açúcar e etanol, associações e consultores do setor sucroenergético que tanto auxiliaram na seleção de áreas de amostragens na região Centro Sul do Brasil e permitiram a execução deste projeto científico

À FAPESP, pelo suporte financeiro (processo 2011/ 07105-7) e às agências de fomento CAPES e CNPq pelas bolsas concedidas durante o curso de Doutoramento.

Ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura e a Universidade de São Paulo pela oportunidade de participar deste prestigiado programa de Doutoramento.

A Prof. Dra. Brigitte Feigl do Laboratório de Biogeoquímica Ambiental do CENA-USP.

Aos funcionários do Laboratório de Biogeoquímica Ambiental do CENA-USP, Lilian, Sandra, Dagmar, Admilson, Ralf e José Souto pelo apoio.

Aos amigos que auxiliaram na etapa de coletas de solo, especialmente Gregori, Ciniro e Marcos.

Aos amigos do Laboratório de Biogeoquímica Ambiental do CENA-USP que me acompanharam desde o início desta jornada, Cindy, Gabor, André Mazzetto, Bruna, Maísa, Leidivan, Adriana, Arlete, José Geraldo, Karina, Angélica e Felipe, e aos que recentemente chegaram Ingrid, André Franco, João, Karina e Naíssa.

Aos estagiários do Laboratório de Biogeoquímica Ambiental do CENA-USP, Amanda, Henrique, Joana, Taís, Caio, Lucas, Felipe e Jaqueline.

À Marília Ribeiro Garcia Henyei pelas preciosas correções e formatação desta tese.

Aos amigos do programa de Ciência da Sustentabilidade, especialmente Eben, Angelica, Ram, Nazia, Salla, Matt e Hao por todo apoio e discussão que foram importantes para o engrandecimento profissional.

Aos amigos Matheus, Aline, Rogério, Giuliana, Thiago, Letícia, Guilherme, Cindy, Cristina, Joni, Bruno, Vitor, Jim Adler e Don Sawyer que me acompanharam em Piracicaba e em Cambridge ao longo deste Doutoramento. Obrigado!

Aos colegas do Holbrook Lab., especialmente Jim, Brett, Jessica, Kare, Wendy, Guilhermo, Maciej Zwieniecki e Tony Rockwell.

À família Dal Fabbro pelos longos anos de amizade.

À família McLaughlin pelo carinho com que me acolheu durante a etapa de estágio no exterior.

Agradecimento especial a toda minha família, principalmente aos meus pais Alcy e Angela, meus irmãos Fernanda e Tadeu e a minha companheira Carol por todo apoio, carinho e amor. Muito Obrigado!

A todos aqueles que direta ou indiretamente auxiliaram na execução deste trabalho de pesquisa.

RESUMO

MELLO, F. F. C. **Estoques de carbono do solo na mudança de uso da terra para o cultivo de cana-de-açúcar na região Centro Sul do Brasil**. 2012. 102 p. Tese (Doutorado) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

O Brasil se destaca como o maior produtor de cana-de-açúcar do planeta. Como resultado do aumento da demanda de açúcar e etanol, cerca de 4 milhões de hectares foram convertidos em áreas de cana-de-açúcar nos últimos 10 anos. Espera-se que outros 6 milhões de hectares sejam convertidos nos próximos 10 a 20 anos para suprir a demanda nacional de derivados dessa cultura. Estas modificações podem ocasionar a emissão de gases do efeito estufa, resultantes principalmente da decomposição da matéria orgânica do solo, o que pode levar a dívida de carbono. Por outro lado, a substituição de áreas degradadas pelo cultivo da cana-de-açúcar pode acarretar no incremento dos estoques de carbono dos solos promovendo o sequestro de carbono. O principal objetivo foi proceder a metodologia proposta pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) da Organização das Nações Unidas para avaliar o impacto ocasionado pela expansão do cultivo da cana-de-açúcar sobre a matéria orgânica do solo e seu resultado em emissão de CO_2 ou em sequestro de carbono. O total de 142 situações de campo foram avaliadas na região Centro Sul do Brasil, onde a cana-de-açúcar vem substituindo outros usos da terra gerando o total de 6318 amostras de solo que foram analisadas considerando as três principais conversões existentes para cana-de-açúcar no país: i) Cerrado; ii) Pastagens e iii) Áreas de cultivo anual. Os resultados obtidos indicam o decréscimo dos estoques de carbono dos solos quando o cultivo de cana-de-açúcar substitui o cerrado e áreas de pastagens, e promove o incremento quando áreas de culturas anuais são substituídas. Os fatores de mudança de uso da terra referente ao período de 20 anos após a conversão de cerrado para cana-de-açúcar referente às camadas 0-30 cm, 0-50 cm e 0-100 foram respectivamente 0,79 (±0,04), 0,86 (±0,04) e 0,94 (±0,04). Para a conversão de pastagens para o cultivo de cana-de-açúcar, os fatores de impacto de mudança de uso da terra foram 0,91 (±0,04), 0,94 (±0,04) e 0,98 (±0,04), e para a conversão de áreas de cultivo anual os fatores de impacto de mudança de uso da terra foram 1,20 (±0,18), 1,20 (±0,18) e 1,21 (±0,18). O período de compensação da dívida de carbono gerada foi estimado entre 3,5 a 6,3 anos considerando a substituição de cerrado, 1 a 2 anos para áreas convertidas de pastagens e zero para áreas oriundas de cultivo anual, onde não foi observada dívida de carbono. Espera-se que os resultados gerados por este trabalho de pesquisa possam subsidiar os tomadores de decisão como forma de desenvolver políticas apropriadas para a expansão do cultivo da cana de açúcar na região Centro Sul do Brasil promovendo desenvolvimento com baixo impacto ao meio ambiente.

Palavras-chave: Matéria orgânica do solo. Estoques de carbono. Mudança de uso da terra. Cana-de-açúcar. Solos. Brasil.

ABSTRACT

MELLO, F. F. C. **Soil carbon stock as result of land use change under sugarcane cultivation in South Central region of Brazil**. 2012. 102 p. Tese (Doutorado) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

Brazil figures as the major sugarcane producer in the world and as result of increasingly demand for sugar and ethanol about 4 millions of hectares were converted into sugarcane systems on last 10 years and others 6 millions of hectares are expected to be converted in next 10 to 20 years. This modification can increase greenhouse gas emissions as result of soil organic matter decomposition and lead to a carbon debt. The aim of this research paper was to perform the IPCC's Tier 2 approach to evaluate the impact of sugarcane expansion over the soil organic matter, and their results in CO_2 emissions or soil carbon sequestration. A total of 142 field situations were studied in South-Central Brazil where sugarcane substituted other land uses, providing 79 comparison pairs and 6,318 soil samples that were analyzed considering three major conversions to sugarcane: i) Cerrado (Brazilian savannah); ii) Pastures; iii) Annual Cropland (maize or soybean). Our results indicate the decrease of soil carbon stocks when sugarcane overcomes cerrado and pastures, and an increase when annual cropland is replaced. The land use change impact factors after 20 years of conversion from cerrado to sugarcane for 0-30 cm, 0-50 cm and 0-100 cm layers were respectively 0.79 (±0.04), 0.86 (±0.04) and 0.94 (±0.04). For sugarcane replacing pastures the impact factors were 0.91 (±0.04), 0.94 (±0.04) and 0.98 (±0.04), and for the conversion from annual agriculture impact factors were 1.20 (±0.18), 1.20 (±0.18) and 1.21 (±0.18). The repay time for the carbon debt was estimated in 3.5 to 6.3 years considering the substitution of cerrado, 1 to 2 years for areas coming from pastures and zero for areas coming from cropland, where no carbon debt was found. We expect that results of this research paper can subsidize appropriate policies for sugarcane expansion in South-Central Brazil, promoting development with a lower environmental impact.

Keywords: Soil organic matter. Carbon stocks. Land use change. Sugarcane. Soils. Brazil.

Sumário

1. INTRODUÇÃO 11

2. EXPANSÃO DO CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR NA REGIÃO CENTRO SUL DO BRASIL: AMOSTRAGENS PARA CONSTITUIÇÃO DE UMA BASE DE DADOS DE SOLOS 16

Resumo 16

2.1. Introdução 18

2.2. Desenvolvimento 20

2.2.1 Produção de cana-de-açúcar na região Centro Sul do Brasil 20

2.2.2 Fatores edafoclimáticos e o zoneamento agroecológico (ZAE) da cana-de-açúcar 22

2.2.3 Seleção de pares amostrais para avaliar a mudança de uso da terra de acordo com a metodologia proposta pelo IPCC 26

2.2.4 Amostragem de solos e procedimentos analíticos 27

2.2.5 Informações levantadas e construção da base de dados de solos para avaliação da MUT decorrente da produção de cana-de-açúcar na região Centro Sul do Brasil 29

2.3 Conclusões 34

Referências 35

3. DETERMINAÇÃO INDIRETA DA DENSIDADE DO SOLO SOB DIFERENTES USOS DA TERRA PELA UTILIZAÇÃO DE REGRESSÕES MÚLTIPLAS DO TIPO "STEPWISE" (RMS) 40

Resumo 40

Abstract 41

3.1 Introdução 42

3.2. Desenvolvimento 44

3.2.1 Material e Métodos 44

3.2.3 Resultados e discussão 45

3.2.3.1 Avaliação das informações existentes na base de dados de solos 45

3.2.3.2 Elaboração das equações de pedotransferência 48

3.3 Conclusões 57

Referências 58

4. O IMPACTO DA MUDANÇA DO USO DA TERRA SOBRE OS ESTOQUES DE CARBONO DOS SOLOS CULTIVADOS COM CANA-DE-AÇÚCAR NA REGIÃO CENTRO SUL DO BRASIL 63
Resumo 63
Abstract 64
4.1 Introdução 65
4.2 Desenvolvimento 67
4.2.1 Material e Métodos 67
4.2.1.1 Adoção da metodologia do IPCC para avaliação da mudança de estoques de C do solo decorrente da mudança de uso da terra 68
4.2.1.2 Seleção das áreas de estudo e formação de pares amostrais 68
4.2.1.3 Amostragem de solo 69
4.2.1.4 Determinação dos teores de carbono dos solos 69
4.2.1.5 Taxa de decaimento de carbono dos solos 70
4.2.1.6 Determinação da densidade do solo por meio de equações de pedotransferência 70
4.2.1.7 Determinação dos estoques de carbono dos solos 71
4.2.1.8 Correção dos estoques de carbono por massa equivalente 71
4.2.1.9 Geração de fatores de mudança de uso da terra 71
4.2.1.10 Período de compensação da dívida de carbono decorrente da mudança de uso da terra 73
4.2.2 Resultados 74
4.2.3 Discussão 78
4.3 Conclusões 81
Referências 82
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS 88
APÊNDICES 90

1. INTRODUÇÃO

O cultivo da cana-de-açúcar no Brasil teve seu início em 1532 ainda no período colonial. Passados quatro séculos o país desponta como maior produtor global de açúcar e etanol oriundo da cana-de-açúcar (MATTOS, 1942; FAOSTAT, 2012). A evolução do seu cultivo ocorreu de maneira mais intensa a partir da aprovação do decreto lei n° 76.593 de 14 de Novembro de 1975, que instituiu o "Programa Nacional do Álcool" (BRASIL, 2012).

Desde então, a produção nacional passou de cerca de 70 milhões de toneladas moídas durante a safra 1974/1975 para cerca de 700 milhões de toneladas na safra 2010/2011. A produção de etanol passou de 8 litros por tonelada de cana para cerca de 80 litros por tonelada e a área de produção passou de 2 milhões de hectares em 1975 para 9 milhões de hectares em 2010 (BRASIL, 2007; FAOSTAT, 2012).

Este aumento de produtividade foi resultado do investimento em tecnologia aplicada tanto no campo como na indústria. Destaca-se a introdução de variedades adequadas que resultaram em maiores produtividades no campo e o aumento de produtividade na etapa industrial, com a melhoria dos processos de fermentação e conversão do açúcar em álcool (BRASIL, 2007).

Outras iniciativas proporcionaram o aumento da eficiência do setor, como por exemplo, a utilização do bagaço da cana-de-açúcar para gerar eletricidade por meio de sua queima em caldeiras de biomassa. A evolução pela qual o setor sucroenergético (anteriormente denominado sucro-alcooleiro) passou durante os últimos 40 anos culminou para que a cana-de-açúcar se transformasse na principal fonte de energia renovável do Brasil, ultrapassando a energia hidráulica, originada de usinas hidroelétricas (BRASIL, 2011).

Esta transformação resultou em importantes benefícios ambientais, sociais e econômicos (WALTER et al., 2011). No ano de 2010 o país supriu 40% da necessidade de utilização de combustível de origem fóssil utilizando o etanol da cana-de-açúcar, resultando na diminuição de emissões de gases do efeito estufa (GEE) (BRASIL, 2011; CERRI et al., 2010). O referido setor gerou 4 milhões de empregos e movimentou R$ 56 bilhões, representando 1,5% do PIB brasileiro (NEVES; TROMBIN; CONSOLI, 2010).

No entanto, o uso de biocombustíveis como forma de promover redução na emissão de GEE foi objeto de intensa discussão do meio científico. Diversos cientistas apontaram que a expansão de culturas energéticas sobre áreas de vegetação nativa poderia resultar no aumento de emissão de GEE. Dependendo do potencial de redução de GEE de cada biocombustível

com relação ao combustível de origem fóssil, a conversão de sistemas nativos em produção de bioenergia poderia resultar em centenas de anos até que a emissão oriunda da mudança de uso da terra (MUT) pudesse ser compensada (FARGIONE et al., 2008; LANGE, 2011).

Neste aspecto é correto afirmar que o cultivo da cana-de-açúcar vem se expandindo no país desde a instauração do Pro-Álcool em 1975. O desenvolvimento da tecnologia *flex* adotada para a frota nacional de veículos leves resultou no aumento da demanda por etanol na última década e foi acompanhada pela expansão de cerca de 4 milhões de hectares de cana-de-açúcar (UNICA, 2012; FAOSTAT, 2012).

A MUT pode acarretar em emissões de GEE, principalmente de CO_2. Estas emissões são resultantes da queima da vegetação nativa, decomposição de material vegetal e oxidação da matéria orgânica do solo (CERRI et al., 2007; FEARNSIDE et al., 2009). Este fato é decorrente da mudança de aporte de material orgânico no sistema de produção, e pode ser alterado de maneira negativa, com diminuição dos estoques de carbono, ou de maneira positiva, com o incremento dos estoques de carbono (MAIA et al., 2009; 2010).

Desta forma, a expansão do cultivo de cana-de-açúcar poderia resultar em impactos ambientais maiores do que os benefícios gerados pelo uso do etanol caso venha a promover a substituição de sistemas nativos. Por outro lado, a substituição de áreas abandonadas ou degradadas poderia resultar em baixo impacto decorrente da MUT, promovendo ganhos ambientais com o plantio da cana-de-açúcar e utilização do etanol como combustível (FARGIONE et al., 2008; GOLDEMBERG; COELHO; GUARDABASSI, 2008).

Estudos recentes, embasados em dados gerados pelo projeto CANASAT desenvolvido pelo "Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE", indicam que a expansão do cultivo de cana-de-açúcar ocorre de maneira mais intensa sobre áreas de pastagens e de culturas anuais, principalmente no estado de São Paulo (RUDORFF et al., 2010; ADAMI et al., 2012) e no entanto pouco se sabe do efeito desta expansão sobre os estoques de carbono dos solos.

Desta forma, o principal objetivo deste trabalho de pesquisa foi determinar as alterações do estoque de carbono dos solos devido a MUT para o cultivo de cana-de-açúcar na região Centro Sul do Brasil. Para tanto optou-se pela utilização do *"2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories"*(IPCC, 2006) por ser a metodologia mais difundida e reconhecida pela comunidade científica na elaboração de inventários de emissão de GEE decorrentes dos processos de MUT. Para executar a referida metodologia foi necessária a elaboração de várias etapas, descritas nos três capítulos que esta tese apresenta.

O primeiro capítulo, intitulado *"EXPANSÃO DO CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR NA REGIÃO CENTRO SUL DO BRASIL: AMOSTRAGENS PARA CONSTITUIÇÃO DE*

UMA BASE DE DADOS DE SOLOS" teve por objetivo constituir uma base de dados de solos sob diferentes usos da terra em toda a região Centro Sul do país (área equivalente a 2,5 milhões de km^2). Considerando que pouco se conhece sobre os efeitos da expansão da cana-de-açúcar, esta etapa ganha importância à medida em que a elaboração de uma base de informações específica para avaliar o efeito da MUT é algo inédito para um setor tão importante quanto antigo no Brasil. Este capítulo está sendo preparado e será submetido para publicação no *Journal* "*Biofuels - Future Science"*.

O segundo capítulo, intitulado *"DETERMINAÇÃO INDIRETA DA DENSIDADE DO SOLO SOB DIFERENTES USOS DA TERRA PELA UTILIZAÇÃO DE REGRESSÕES MÚLTIPLAS DO TIPO "STEPWISE" (RMS)"* teve por objetivo avaliar as relações existentes entre a densidade dos solos cultivados sob diferentes usos da terra com outros atributos existentes na base de dados consistida, como teor de carbono e granulometria. Esta etapa foi desenvolvida uma vez que o cálculo dos estoques de carbono dos solos requer a informação densidade do solo. A avaliação das relações entre densidade do solo e atributos da base de dados permitiu a elaboração de equações de estimativa da densidade do solo, que podem ser utilizadas por outros grupos de pesquisa e outras bases de dados de solos que venham existir e que tenham por objetivo calcular estoques de carbono dos solos. Este capítulo foi preparado e submetido para publicação "*Soil Science Society of America Journal"*.

O terceiro capítulo da tese, intitulado *"O IMPACTO DA MUDANÇA DO USO DA TERRA SOBRE OS ESTOQUES DE CARBONO DOS SOLOS CULTIVADOS COM CANA-DE-AÇÚCAR NA REGIÃO CENTRO SUL DO BRASIL"* consistiu na avaliação do efeito da MUT sobre os estoques de carbono dos solos. O capítulo utilizou informações geradas pelos outros dois capítulos da tese de forma que fosse possível estabelecer comparações entre estoques de carbono sob áreas cultivadas com cana-de-açúcar e áreas denominadas referência, que foram áreas oriundas de pastagem, cultivos anuais e vegetação nativa. Este capítulo foi preparado e submetido para publicação no "*Proceedings of the National Academy of Sciences"*.

Os resultados gerados por este projeto de pesquisa poderão ser utilizados como base para outros estudos científicos que tenham como objetivo avaliar os impactos da expansão dos biocombustíveis no cenário nacional. Adicionalmente, espera-se que os resultados gerados por este conjunto de informações possam ser utilizados como subsídio aos tomadores de decisão e os auxilie a adotar medidas apropriadas à expansão do cultivo de cana-de-açúcar no país, de forma que o desenvolvimento desse importante setor para a sociedade brasileira seja atrelado ao baixo impacto ao meio ambiente.

Referências

ADAMI, M.; RUDORFF, B.F.T.; FREITAS, R.M.; AGUIAR, D.A.; SUGAWARA, L.M.; MELLO, M.P. Remote sensing time series to evaluate direct land use change of recent expanded sugarcane crop in Brazil. **Sustainability**, Basel, v.4, p.574-585, 2012.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Balanço nacional de cana-de-açúcar e agroenergia**. Brasília, DF: MAPA, Secretaria de Produção e Agroenergia, 2007.139 p.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética - EPE. **Balanço Energético Nacional 2011**: Ano base 2010. Rio de Janeiro: EPE, 2011. 266 p.

BRASIL. Senado Federal. **Decreto lei n° 76.593 de 14 de Novembro de 1975**.Disponível em: http://www6.senado.gov.br/legislacao/ListaPublicacoes.action?id=123069 Acesso em:10 nov. 2012.

CERRI, C.C.; BERNOUX, M.; MAIA, S.M.F.; CERRI, C.E.P.; COSTA JUNIOR, C.; FEIGL, B.J.; FRAZÃO, L.A.; MELLO, F.F.C.; GALDOS, M.V.; MOREIRA, C.S.; CARVALHO, J.L.N. Greenhouse gas mitigation options in Brazil for land-use change, livestock and agriculture. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 67, p. 102-116, 2010.

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

FAO. **FAOSTAT**. Rome, 2010. Disponível em: http://faostat.fao.org/Acesso em: 10 jan. 2012.

FARGIONE, J.; HILL, J.; TILMAN, D.; POLASKY, S.; HAWTHORNE, P. Land clearing and the biofuel carbon debt. **Science**, Washington, DC, v.319, p. 1235–1238, 2008.

FEARNSIDE, P.M.; RIGHI, C.A.; GRAÇA, P.M.L.A.; KEIZER, E.W.H.;CERRI, C.C.; NOGUEIRA, E.M.; BARBOSA, R.I. Biomass and greenhouse-gas emissions from land-use change in Brazil s Amazonian arc of deforestation: the states of Mato Grosso and Rondônia. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 258, p. 1968-1978, 2009.

GOLDEMBERG, J.; COELHO, S.T.; GUARDABASSI, P. The sustainability of ethanol production from sugarcane. **Energy Policy**, Guildford, v.36, p.2086-2097, 2008.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE.**Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Hayama, Kanagawa, Japan: Institute for Global Environment Strategies, 2006. v.4: Agriculture, forestry and other land use.

LANGE, M. The GHG balance of biofuels taking into account land use change. **Energy Policy**, Guildford, v.39, p.2373-2385, 2011.

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

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

MATTOS, A. R. **Açúcar e álcool no Brasil**. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 1942.

NEVES M.F.; TROMBIN, V.G.; CONSOLI, M.A. Measurement of sugar cane chain in Brazil. **International Food and Agribusiness Management Review**, Stanford, v.3, p.37-54, 2010.

RUDORFF, B.F.T.; AGUIAR, D.A.; SILVA, W.F.; SUGAWARA, L.M.; ADAMI, M.; MOREIRA, M.A. Studies on the rapid expansion of sugarcane for ethanol production in São Paulo State (Brazil) Using Landsat Data. **Remote Sensing**, Basel, v. 2, p. 1057-1076, 2010.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR.**UNICADATA**. Disponível em: http://www.unica.com.br. Acesso em: 10 out. 2012.

WALTER, A.; DOLZAN, P.; QUILODRAN, O.; OLIVEIRA, J.; SILVA, C.; PIACENTE, F.; SEGERSTEDT, A. Sustainability assessment of bio-ethanol production in Brazil considering land use change, GHG emissions and socio-economic aspects. **Energy Policy**, Guildford, v.39, p.5703–5716, 2011.

2. EXPANSÃO DO CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR NA REGIÃO CENTRO SUL DO BRASIL: AMOSTRAGENS PARA CONSTITUIÇÃO DE UMA BASE DE DADOS DE SOLOS

Resumo

Atualmente, existem algumas iniciativas para a criação de base de dados com informações de solos visando avaliar impactos da mudança de uso da terra sobre os estoques de carbono dos solos. No entanto, poucas informações existem para o setor sucroenergético, responsável por um PIB anual de R$ 56 bilhões, o que dificulta o desenvolvimento de políticas públicas adequadas ao setor e afeta processos de certificação do biocombustível. Desta forma, o principal objetivo deste trabalho foi promover amostragens de solo e avaliações em campo em diferentes usos da terra na região Centro Sul do Brasil com o intuito de formar uma base de dados de solos a fim de possibilitar a avaliação de aspectos ambientais relacionados a expansão do cultivo da cana-de-açúcar na região Centro Sul do Brasil. Como resultado 142 áreas foram amostradas, resultando em aproximadamente 6 mil amostras de solo que foram utilizadas para determinação de teores de carbono, densidade aparente e granulometria, informações bases para determinação de estoques de carbono dos solos e avaliações de inventários de emissão de gases do efeito estufa.

Palavras-chave: Cana-de-açúcar. Solos. Base de dados. Gases do efeito estufa. Mudança do uso da terra.

SUGARCANE EXPANSION IN SOUTH CENTRAL BRASIL: CONSISTING A SOIL DATABASE THROUGH SOIL SAMPLING

Abstract

Nowadays, there are many initiatives to provide soil database information as way to develop environmental studies regarding land use change and soil carbon stocks modifications. Therefore it's possible to emphasize that there are no information like this developed to sugarcane sector, which has an annual GDP of US$ 28 billion, and the absence of such information input barriers to promote biofuel certification and to develop public policies to bioenergy sector. Thus, the main objective of this research project was to develop a soil database to perform environmental studies in South Central Brazil. As result, 142 sites were sampled, providing almost 6 thousand samples, used to determine information like soil carbon content, bulk density and texture, basic information to evaluate soil carbon modification as result of land use change and to produce greenhouse gas inventories.

Key words: Sugarcane. Soils. Database. Greenhouse gas. Land use change.

2.1. Introdução

A cana-de-açúcar foi introduzida no Brasil no início do século XVI, durante o período colonial. Espécie de origem asiática do gênero *Saccharum L.*, foi trazida por Martim Afonso de Souza em 1532 para ser cultivada na capitania de São Vicente, onde foi implantado oficialmente em 1533 o primeiro engenho de açúcar, nomeado "São Jorge dos Erasmos" em área pertencente atualmente ao município de Santos, litoral do Estado de São Paulo (MATTOS, 1942).

Passados quase cinco séculos desde sua introdução, o Brasil responde por cerca de 40% da produção mundial de cana-de-açúcar, colhendo anualmente 700 milhões de toneladas que são produzidos em 9 milhões de hectares. Seguidos do Brasil destacam-se a produção da Índia com 300 milhões de toneladas cultivadas em pouco mais de 4 milhões de hectares e China, que produz 100 milhões de toneladas em 1,5 milhões de hectares. Estes três países representam pouco mais de 60% da produção mundial, desenvolvida em aproximadamente 100 países (FAOSTAT, 2012).

Apesar do açúcar ter sido o principal produto produzido a partir da cana-de-açúcar nos séculos passados, foi o etanol que impulsionou no Brasil a expansão do seu cultivo a partir de 1975, com a instituição do Programa "PROÁLCOOL" que visava diminuir a dependência do país sobre a utilização de combustíveis fósseis (MOREIRA; GOLDEMBERG, 1999).

Desde o início do PROÁLCOOL, a produção de etanol passou de 3 bilhões de litros em 1980 para aproximadamente 30 bilhões de litros em 2010. Este incremento foi resultado do aumento da produtividade em todos os setores, principalmente no aumento do Açúcar Total Recuperável (ATR), que passou de 105 kg ton^{-1} para 150 kg ton^{-1} durante o referido período. A produtividade no campo passou de 46 ton ha^{-1} em 1975 para 79 ton ha^{-1} em 2010 e a área de produção passou de 2 milhões de hectares entre 1975 e 1976 para 9 milhões de hectares em 2010, distribuídas na região Nordeste (10%) e na região Centro-Sul (90%) (BRASIL, 2007; FAOSTAT, 2012; UNICA, 2012).

Dentre os aspectos que tornam o Brasil competitivo na produção do etanol destacam-se o custo de produção abaixo de US$ 10,00 por GJ produzido e o fato de possuir uma estrutura flexível, que permite a utilização do etanol anidro, misturado a gasolina e também o etanol hidratado, utilizado nos veículos "Flex Fuel" que representam 43% da frota de veículos leves no país (GOLDEMBERG et al., 2004; COELHO et al., 2006; MORAES, 2011; UNICA, 2012).

A comercialização do etanol representa 57% do PIB estimado para o setor sucroenergético, equivalente a US$28 bilhões anuais, seguido pelo açúcar, com 37% do total, 1% advindo da bioeletricidade e 5% oriundos de outras receitas como certificados de redução de emissão de gases do efeito estufa que podem ser comercializados em bolsas de valores (NEVES; TROMBIN; CONSOLI, 2010).

Considerando o lado ambiental, o etanol produzido da cana-de-açúcar reduz a emissão de Gases do Efeito Estufa (GEE) em até 80% quando comparado a gasolina (SOARES et al., 2009) e apresenta um balanço energético favorável ao seu uso, produzindo entre 6 e 8 unidades de energia renovável para cada unidade de energia fóssil utilizada durante a produção do etanol, superior a qualquer outro biocombustível produzido em escala comercial (MACEDO et al., 2004; FAO, 2008; GALDOS et al., 2010).

Apesar dos fatores positivos apresentados, a expansão do cultivo de cana-de-açúcar, pode causar impactos negativos e ocasionar uma dívida de carbono caso a expansão ocorra sobre áreas de vegetação nativa (FARGIONE et al., 2008).

No Brasil apesar da Mudança de Uso da Terra - MUT ser responsável por dois terços das emissões totais de GEE como consequência do desmatamento de áreas nativas (BRASIL, 2004; CERRI et al., 2009), a expansão do cultivo da cana-de-açúcar tem priorizado áreas de cultivos agrícolas e pastagens (ADAMI et al., 2012), indicando que o impacto resultante da MUT pode ser menor do que o indicado por estudos (FARGIONE et al., 2008; LANGE, 2011) que avaliaram os efeitos da expansão da produção de biocombustíveis.

Nesse contexto, é importante destacar que existem metodologias consolidadas para efetuar a avaliação do impacto da MUT e determinar as emissões de GEE, como a proposta pelo "Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas - IPCC". A referida metodologia intitulada *"2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories"* permite determinar perdas ou ganhos de estoques de carbono na fitomassa (aérea ou subterrânea) e nos solos, presente na Matéria Orgânica do Solo (MOS), onde respectivamente estima-se existir 562 Pg (1 Pg = 10^{15} g) e 1576 Pg de carbono (ESWARAN et al., 1995; LAL, 2003).

Pelo fato do solo ser o meio onde o carbono está mais concentrado no ambiente terrestre excluídas as rochas calcárias, e pelo fato de ser suscetível a MUT (CERRI et al., 2007; MAIA et al., 2010), iniciativas globais surgiram com o intuito de obter informações sobre solos, e promover avaliações sobre o efeito da MUT e os resultados em termos de emissão de GEE (MILNE et al., 2007).

Exemplos de projetos elaborados pela "UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAM - UNEP" como o *Carbon Benefits Project* e o projeto *ECOFYS* desenvolvido

pelo "INTERNATIONAL SOIL REFERENCE AND INFORMATION CENTRE - ISRIC" podem ser importantes referências para gerar estimativas globais de emissão de CO_2 dos solos e auxiliar avaliações relacionadas aos processos de MUT (BATJES; BRIDGES, 1995; BATJES, 2011).

Apesar do setor sucroenergético contar com iniciativas para avaliar a expansão da cana-de-açúcar, como o projeto CANASAT desenvolvido pelo INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE, e o "Zoneamento Agroecológico do cultivo da cana de açúcar - ZAE" (MANZATTO et al., 2009) elaborado pela EMBRAPA com o intuito de encontrar áreas prioritárias para o cultivo da cana-de-açúcar, poucas informações existem sobre o resultado da expansão do seu cultivo sobre os estoques de carbono dos solos. Este tipo de avaliação requer amostragens específicas associadas a um histórico de produção da cultura, nem sempre existentes nos centros de produção de bioenergia e disponíveis à comunidade científica.

Desta forma, o objetivo principal deste trabalho de pesquisa foi promover amostragem de solos e o levantamento de histórico de MUT nas áreas de produção de cana-de-açúcar considerando o ZAE (MANZATTO et al., 2009), com o intuito de formar uma base de dados que possibilite avaliações ambientais sobre a expansão da cultura da cana-de-açúcar na região Centro Sul do Brasil.

2.2. Desenvolvimento

2.2.1 Produção de cana-de-açúcar na região Centro Sul do Brasil

A região produtora de cana-de-açúcar no Centro Sul do Brasil é delimitada por uma área que ocupa aproximadamente 30% do território nacional e é formada basicamente por oito estados além do Distrito Federal. A área total coberta por São Paulo, Rio de Janeiro, Espírito Santo, Paraná, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Minas Gerais, Goiás e Distrito Federal é de aproximadamente 2,5 milhões de km^2, equivalente ao território da Argentina (Figura 2.1). A referida região foi responsável pela produção de 550 milhões de toneladas de cana-de-açúcar distribuídas em 8,3 milhões de hectares em 2010 (UNICA, 2012), representando aproximadamente 90% da produção nacional (Tabela 2.1). Dentre os estados produtores, São Paulo é o que mais se destaca contribuindo com 58% da produção total, seguido dos estados

de Minas Gerais (8,8%), Goiás (7,5%), Paraná (7,0%), Mato Grosso do Sul (5,4%), Mato Grosso (2,2%), Espírito Santo (0,5%) e Rio de Janeiro (0,3%) (Tabela 2.1).

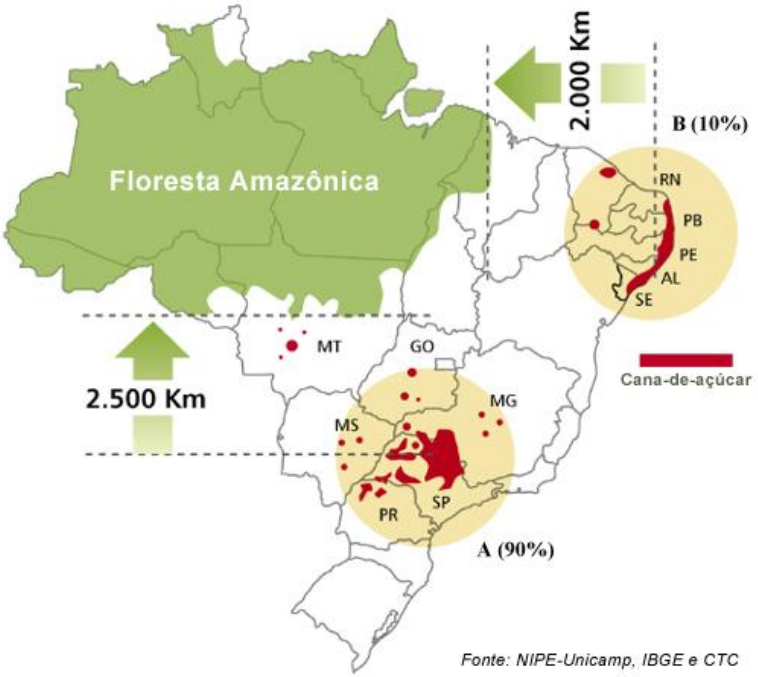


Figura 2.1 - Áreas de cultivo de cana-de-açúcar no Brasil. Em destaque: A; Centro Sul; B: Nordeste. Fonte: UNICA, 2012

Tabela 2.1 - Área cultivada e produção de cana-de-açúcar nos principais estados da região Centro Sul do Brasil na safra 2010/2011. Adaptado de UNICA, 2012

Estados	**Área**	**Produção**	**Açúcar**	**Etanol (x1000 m³)**		
	ha	***x1000 ton***	***x1000 ton***	**Anidro**	**Hidratado**	**Total**
Espírito Santo	77.447	3.525	90	99	88	187
Goiás	655.201	46.613	1.805	662	2.233	2.895
Mato Grosso	278.730	13.661	446	282	575	857
Mato Grosso do Sul	502.063	33.520	1.329	360	1.488	1.849
Minas Gerais	763.837	54.629	3.244	619	1.938	2.558
Paraná	667.949	43.321	3.022	272	1.348	1.619
Rio de Janeiro	100.105	2.093	118	0	61	61
São Paulo	5.303.342	359.503	23.446	5.119	10.236	15.354
Centro Sul	**8.348.674**	556.863	33.501	7.413	17.966	25.379
Brasil	**9.076.710***	**620.132**	**37.989**	**8.323**	**19.053**	**27.376**

*Estimativa FAO, 2012.

2.2.2 Fatores edafoclimáticos e o zoneamento agroecológico (ZAE) da cana-de-açúcar

Apesar da extensa área de cobertura, não são todas as áreas passíveis de cultivo da cana-de-açúcar na região Centro Sul do país. Fatores como temperatura, solos, topografia e precipitação adequados são essenciais para garantir sua produção. Com o intuito de determinar áreas prioritárias para a expansão do seu cultivo, a EMBRAPA lançou o "Zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar", onde áreas foram classificadas de acordo com sua aptidão edafoclimática. De acordo com o ZAE (MANZATTO et al., 2009), existem quatro categorias classificatórias para os fatores edáficos (Tabela 2.2) e cinco para os fatores climáticos (Tabela 2.3). A integração resultante desses fatores representa a classificação edáfica para o cultivo da cana-de-açúcar (Tabela 2.4) que foram consideradas para auxiliar a etapa de coleta de solos.

Tabela 2.2 - Categorias dos fatores edáficos do ZAE. Fonte: Manzatto et al. (2009)

Símbolo	Descrição
B	Áreas com aptidão edáfica boa
R	Áreas com aptidão edáfica regular
M	Áreas com aptidão edáfica marginal
IN	Áreas sem aptidão edáfica

Tabela 2.3 - Categorias dos fatores climáticos do ZAE. Fonte: Manzatto et al. (2009)

Clima	Descrição
A	Baixo Risco – sem limitação para o cultivo – área indicada Temperatura Média Anual > 19°C Índice de satisfação das necessidades de água (ISNA) > 0,6 Geada < 20% Deficiência Hídrica < 200 mm
B	Baixo Risco – irrigação de salvamento necessária – área indicada Temperatura Média Anual > 19°C Índice de satisfação das necessidades de água (ISNA) > 0,6 Geada < 20% Deficiência Hídrica entre 200 mm e 400 mm
C	Carência térmica ou alto risco de geada - área não indicada Temperatura Média Anual < 19°C ou Geada > 20% Índice de satisfação das necessidades de água (ISNA) > 0,6 Deficiência Hídrica entre 200 mm e 400 mm
D	Irrigação intensiva imprensidivel – área não indicada ISNA < 0,6 ou Deficiência Hídrica > 400 mm
E	Excesso de água com prejuízo para a maturação e colheita – área não indicada Período seco menor que 3 meses

Tabela 2.4 - Resultado da aptidão pedoclimática resultante do ZAE. Fonte: Manzatto et al. (2009)

Símbolo	Significado
B	Áreas com aptidão agrícola Boa
R	Áreas com aptidão agrícola Regular
MS	Áreas com aptidão agrícola Marginal por solo
ISC	Áreas Inaptas pela integração entre solo e clima
IC	Áreas Inaptas por clima, Carência térmica ou alto risco de geada
ID	Áreas Inaptas por clima: irrigação intensiva imprescindível
IE	Áreas Inaptas por clima: excesso de água com prejuízo para a maturação e colheita
IClS	Áreas Inaptas por clima e solo
IS	Áreas Inaptas por solo

Considerando a área total de 2,5 milhões de km^2 abrangida pelos estados de São Paulo, Rio de Janeiro, Espírito Santo, Paraná, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Minas Gerais, Goiás e Distrito Federal é possível destacar que apenas 1,02 milhões de km^2 (ou 41%) foram inclusas no ZAE. Este fato decorre da existência de áreas de proteção ambiental permanentes, como pantanal e parte da floresta amazônica, existentes em largas extensões nos estados do Paraná, Mato Grosso do Sul e Mato Grosso e ainda a Serra do Mar no estado de São Paulo. Descontadas áreas inaptas para o cultivo da cana-de-açúcar, em função de clima inadequado ou aspectos pedológicos desfavoráveis, existem aproximadamente 58 Mha aptos a sua produção, divididos em três categorias: i) Aptas Preferencial (AP) com 19 Mha, ii) Regular (R) com 36 Mha e iii) Marginal por Solo (MS) com 3 Mha, como indica a Figura 2.2 e a Tabela 2.5.

Em números absolutos (58 Mha), os principais estados aptos a produzir cana-de-açúcar seriam Goiás (22%), Minas Gerais (21%), Mato Grosso do Sul (19%), São Paulo (18%), Mato Grosso (12%), Paraná (7%), Espírito Santo (1%) e Rio de Janeiro (1%). Considerando apenas a categoria AP's (19 Mha), o cenário se modifica e os estados que mais se destacam são São Paulo (38,7%) e Mato Grosso do Sul (32,7%) seguidos de Paraná (14,0%), Minas Gerais (6,4%), Goiás (5,3%), Espírito Santo (1,6%), Rio de Janeiro (1,1%) e Mato Grosso (0,2%) (Tabela 2.5).

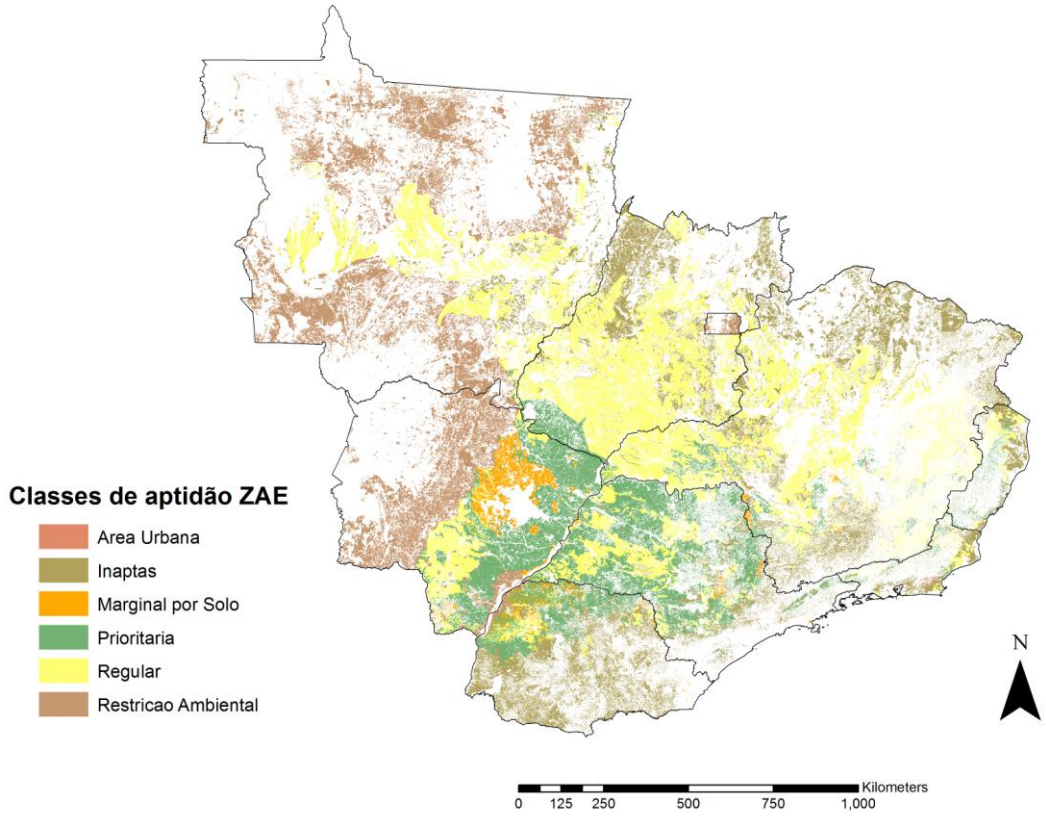


Figura 2.2 - Classes de aptidão de cultivo de cana-de-açúcar na região Centro Sul do Brasil. Fonte: Manzatto et al. (2009).

Tabela 2.5 - Áreas aptas (preferencial, regular e marginal) e inaptas para produção de cana-de-açúcar nos estados da região Centro-Sul do Brasil de acordo com classificação proposta pelo ZAE (2008). Fonte: Manzatto et al. (2009)

UF	Área ZAE (ha)			
	Apta Preferencial	**Regular**	**Marginal por Solo**	**Inaptas**
SP	7.344.781	3.219.194	111.600	744.915
MG	1.218.045	10.932.928	150.810	7.028.756
MS	6.200.927	2.491.502	2.164.472	6.805.323
MT	34.903	6.783.804	100	17.365.532
PR	2.645.709	800.853	594.835	5.416.557
RJ	20.7670	304.208	26.862	642.438
ES	303.172	387.245	0	763.619
GO	1.004.484	11.626.035	0	5.067.561
Centro Sul	**18.959.691**	**36.545.768**	**3.048.679**	**43.834.701**

Em relação aos tipos de solo é possível destacar a existência de 11 classes principais, conforme demonstram as Figuras 2.3 e 2.4. Os Latossolos representam a classe dominante, cobrindo 52% da área total, seguidos dos Argissolos, com 17% e Neossolos com 14%.

A soma dessas três principais classes correspondem a 83% das áreas existentes no ZAE (Manzatto et al., 2009) (Figura 2.4), que seguidos dos Cambissolos (7%), Nitossolos (3,8%) e Planossolos (1,6%), representam 95% do total.

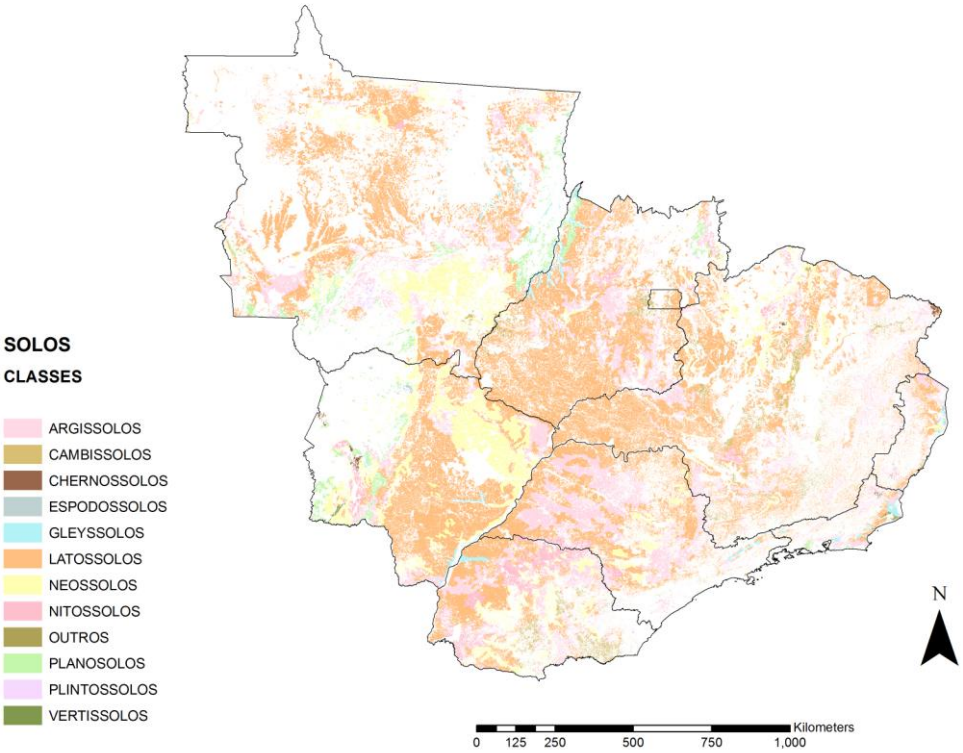


Figura 2.3 - Principais classes de solos da região Centro-Sul. Fonte: Manzatto et al. (2009)

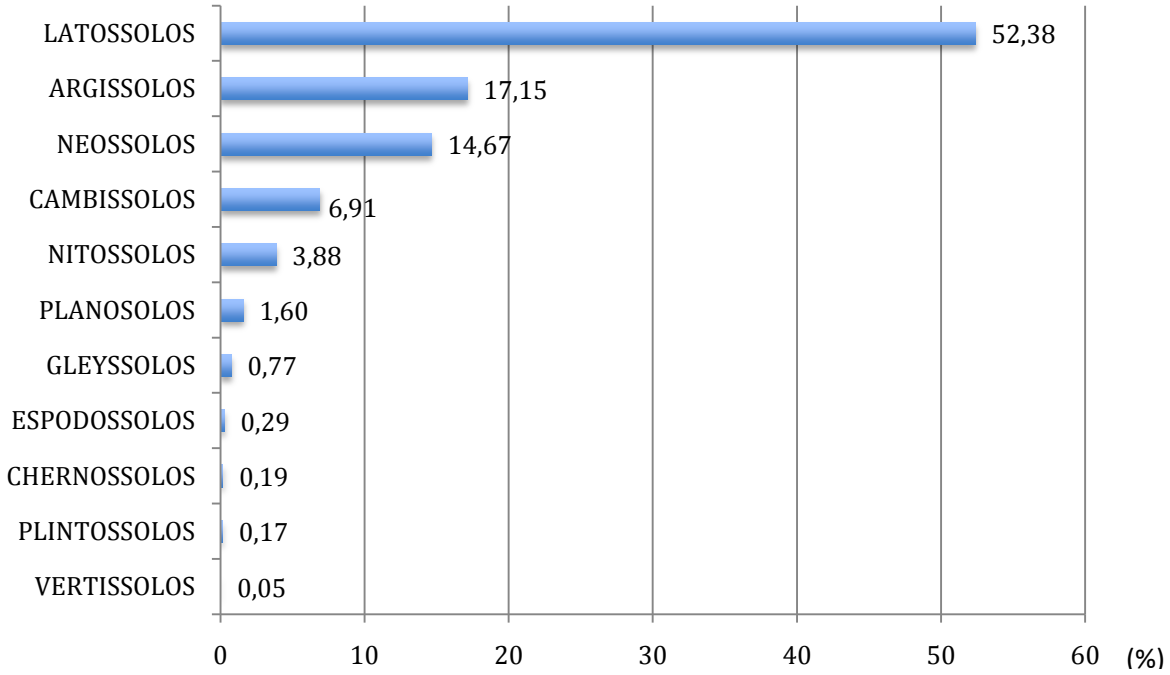


Figura 2.4 - Participação de classes de solo no ZAE (porcentagem). Fonte: Manzatto et al. (2009)

2.2.3 Seleção de pares amostrais para avaliar a mudança de uso da terra de acordo com a metodologia proposta pelo IPCC

As modificações dos estoques de C decorrentes da MUT podem ser observadas por meio de comparações entre pares amostrais, que especificamente neste estudo foram a cana-de-açúcar e o uso anterior ao seu cultivo. A metodologia adotada para tais avaliações foi a proposta pelo IPCC (2006), que apresenta três níveis hierárquicos denominados "*Tiers*" de avaliação do impacto da mudança do uso da terra e seus resultados em termos de emissão de CO_2 ou acúmulo de carbono nos diferentes "pools" considerados, como fitomassa aérea e subterrânea, além do solo. A medida que se eleva o *Tier*, mais informações são necessárias e mais precisa é a informação gerada (MAIA, 2009; MISHRA et al., 2012).

O desenvolvimento do *Tier* 1 pode ser realizado apenas com fatores *default*, fornecidos pelo *"2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories"* considerando diferentes tipos de clima ou solo. A execução do *Tier* 2, requer informações específicas, coletadas *in situ* de forma que as determinações possam representar a área ou região de estudo. O *Tier* 3 implica no monitoramento em longo prazo, ou na integração das informações específicas com modelos matemáticos aumentando a especificidade das informações encontradas. Em todos os casos, as modificações resultantes dos processos de MUT partem do pressuposto de que as mudanças dos estoques de Carbono Orgânico do Solo - COS nos ecossistemas ocorrem predominantemente a partir da troca entre a superfície terrestre e a atmosfera (IPCC, 2003; MAIA, 2009).

Conforme mencionado, o principal objetivo deste capítulo foi demonstrar como se realizou a formulação de uma base de dados de solos visando proceder avaliações dos efeitos da mudança de uso da terra de acordo com a metodologia proposta pelo IPCC (2006) para o cultivo da cana-de-açúcar na região Centro Sul do Brasil.

Para a realização de amostragens de solo, diversas etapas foram necessárias, como por exemplo entrevistas com profissionais atuantes no setor sucroenergético em diversos centros de produção de cana-de-açúcar. A partir da seleção de áreas de estudo foi possível proceder a amostragem de solos em diferentes usos da terra.

2.2.4 Amostragem de solos e procedimentos analíticos

A partir da seleção dos pares amostrais em diversos pontos da região Centro-Sul do Brasil, teve inicio a etapa de amostragem de solo, com inicio em fevereiro de 2011 e término em março de 2012. A etapa de amostragem de solo contemplou o delineamento apresentado pela Figura 2.5 e consistiu na abertura de 9 trincheiras por área selecionada, sendo 3 trincheiras até a profundidade de 100 cm com coletas nas camadas 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 40-50 cm, 70-80 cm e 90-100 cm e 6 mini-trincheiras com coletas nas camadas 0-10 cm, 10-20 cm e 20-30 cm, totalizando 36 amostras de solo por área de estudo.

Com o intuito de esclarecer questões secundárias sobre a incorporação do COS na cultura da cana-de-açúcar, em 80% das áreas estudadas foram realizadas amostragens de solo na linha e na entrelinha de cultivo para as trincheiras até a profundidade de 100 cm, totalizando 54 amostras de solo por área de estudo seguindo o esquema apresentado pela Figura 2.5.

A trincheira central foi selecionada para determinação granulométrica, para caracterizar a textura dos solos, e consistiu na separação das frações areia (2,00-0,05 mm) silte (0,05-0,002 mm) e argila (<0,002 mm) pelo método do densímetro utilizando como agente dispersante o Na-hexametafosfato (CAMARGO et al., 1986).

Desta forma, para cada área avaliada existiam informações a respeito do uso e tipo do solo, teores de carbono que foram determinados por combustão a seco (NELSON; SOMMERS, 1996), textura e densidade do solo coletadas em campo pelo método do anel volumétrico (BLAKE; HARTGE, 1986).

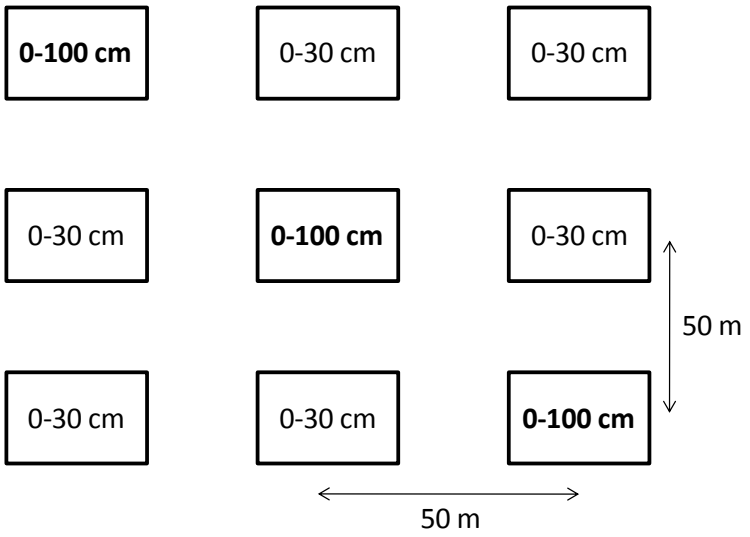


Figura 2.5 - Delineamento utilizado para amostragem de solo. Trincheiras até 30 cm de profundidade foram amostradas nas profundidades 0-10 cm, 10-20 cm e 20-30 cm. Trincheiras até 100 cm de profundidade foram amostradas nas profundidades 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm 40-50 cm, 70-80 cm e 90-100 cm

Adicionalmente foram coletadas amostras de densidade do solo pelo método do anel volumétrico (BLAKE; HARTGE, 1986) para permitir os cálculos dos estoques de carbono. Para tanto, foram coletadas amostras indeformadas para as camadas 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 40-50 cm, 70-80 cm e 90-100 cm nas trincheiras até 100 cm de profundidade. Da mesma forma que ocorreu a coleta de solos para determinação do COS, a densidade do solo foi coletada na linha e entrelinha de cultivo da cana-de-açúcar. A Figura 2.6 representa a abertura de trincheira de 100 cm de profundidade em uma área de estudo de pastagem, utilizada como referência da cana-de-açúcar para coletas de solos e determinação do COS e da densidade do solo.

Após a etapa de coleta, as amostras foram secas ao ar, destorroadas e peneiradas a 2 mm para proceder à análise. Foram determinadas a umidade do solo (%), o pH em água e KCl e teor de Carbono Orgânico do Solo (COS). As amostras destinadas à análise de COS foram moídas e passadas em peneiras de 100 mesh e o teor de COS total (%) foi determinado por combustão a seco no equipamento LECO® CN-2000 (NELSON; SOMMERS, 1996).

Figura 2.6 - Abertura de trincheira e coleta de amostras de solo para determinação de COS, densidade aparente e textura até 100 cm de profundidade

2.2.5 Informações levantadas e construção da base de dados de solos para avaliação da MUT decorrente da produção de cana-de-açúcar na região Centro Sul do Brasil

Conforme mencionado, a seleção de áreas para amostragem de solos foi estabelecida por meio de critérios como a presença de informações sobre o histórico de produção de cana-de-açúcar e do seu uso anterior, associadas à presença de áreas de referência situadas sob as mesmas condições edafoclimáticas das áreas cultivadas com cana-de-açúcar, para que o efeito

da mudança de uso da terra pudesse ser observado ao longo do tempo conforme indicado por inúmeros trabalhos (ALVAREZ et al., 2001; ZINN et al., 2005; MAIA, 2009; FRAZÃO et al., 2012). A Figura 2.7 apresenta exemplos de áreas que foram pré-selecionadas para amostragem de solos, indicando a presença das áreas de referência sob as mesmas condições de cultivo das áreas de cana-de-açúcar.

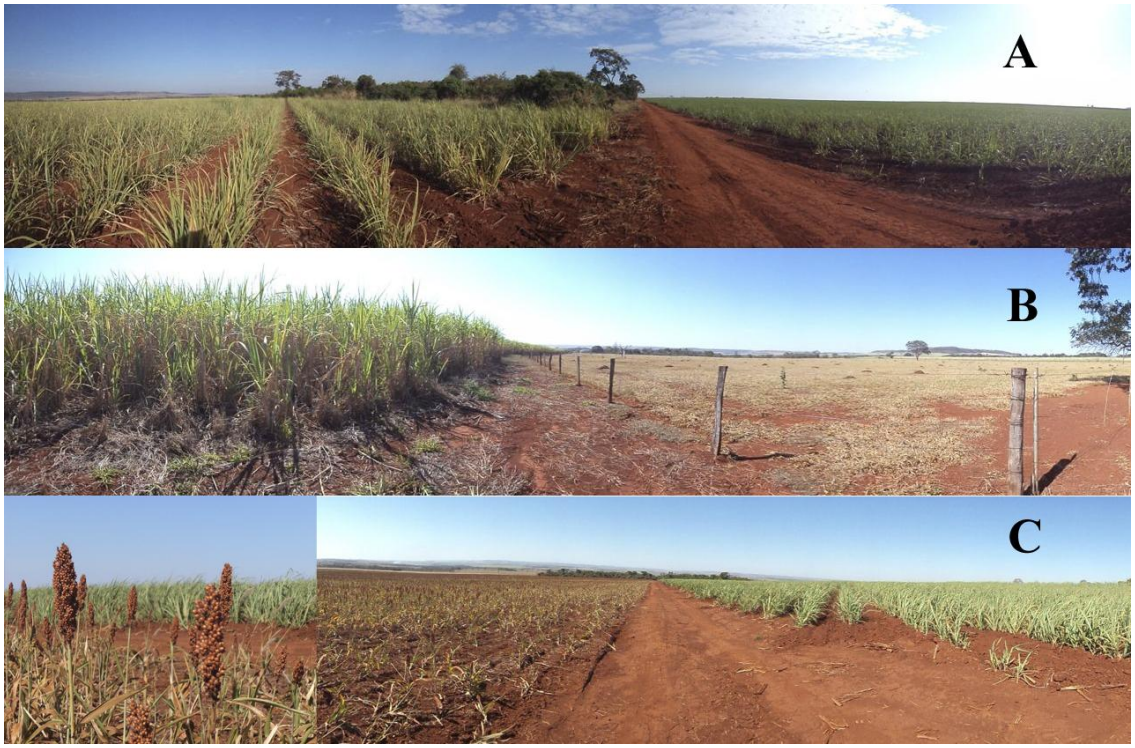


Figura 2.7 - Exemplificação de áreas convertidas para cana-de-açúcar pré-selecionadas para amostragem de solos na região centro sul do Brasil: A) conversão de cerrado; B) conversão de pastagens e C) conversão de culturas anuais, no detalhe área cultivada com *Sorghum*

Ao todo foram selecionadas 142 áreas de estudo (Apêndice A), distribuídas por 13 localidades na região Centro Sul do Brasil, apresentadas pela Figura 2.8, que totalizaram em 6.318 amostras de solo coletadas. Em decorrência da ausência de informações relacionadas ao histórico de MUT sobre áreas de produção, diversas usinas e associações de produtores não puderam ser amostradas. Para se atingir o número de áreas levantadas por este trabalho de pesquisa foram necessárias visitas a diversos centros produtores, que juntos apresentam cerca de 335.000 ha cultivados com cana-de-açúcar. A Tabela 2.6 indica a área aproximada de cada pólo de produção amostrado por este projeto de pesquisa, que juntos representam cerca de 4% da produção nacional de cana-de-açúcar.

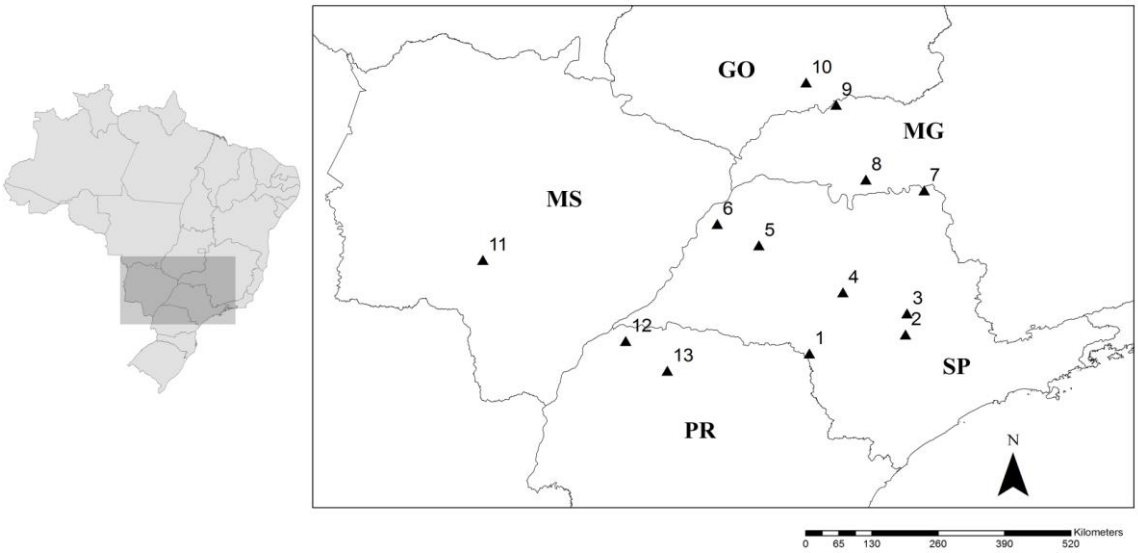


Figura 2.8 - Regiões produtores de cana-de-açúcar selecionadas para coleta de solos: [1-7]São Paulo (SP); [8-9]Minas Gerais (MG); [10]Goiás (GO); [11]Mato Grosso do Sul (MS); [12-13] Paraná (PR)

Tabela 2.6 - Produção e área estimada de cultivo de cana-de-açúcar em usinas ou associações de produtores selecionados para amostragem de solo

Município	**Estado**	**Produção ton ano^{-1}**	**Área estimada ha**
Piracicaba	SP	4.500.000	56.250
Ipaussu	SP	2.160.000	27.000
Igarapava	SP	2.880.000	36.000
Jaú	SP	1.980.000	24.750
Araçatuba	SP	1.476.000	18.450
Andradina	SP	2.988.000	37.350
Campo Florido	MG	3.000.000	40.000
Araporã	MG	1.800.000	16.000
Goiatuba	GO	2.200.000	31.000
Maracaju	MS	180.000	1.842
Terra Rica	PR	1.860.000	27.000
Iguatemi	PR	1.620.000	20.250
Total		**26.644.000**	**335.892**

As principais classes de solo amostradas foram Latossolos com 91 áreas coletadas seguidos de Neossolos, com 38 áreas e Nitossolos com 13 áreas (Tabela 2.7). A proporção das áreas coletadas foi de 67% Latossolos, 27% Neossolos e 9% Nitossolos, contemplando três das cinco principais classes de solo existentes na região Centro Sul apresentadas na Figura

2.4. Considerando o uso da terra, foram coletadas 79 áreas cultivadas sob cana-de-açúcar, 48 oriundas de pastagem, 10 de cultivos agrícolas e 5 de Cerrado.

Dentre as áreas cultivadas com cana-de-açúcar, 50 (63% do total) se apresentavam sobre Latossolos, 22 (28%) sobre Neossolos Quartzarênicos e 7 (9%) sobre Nitossolos. Com relação as áreas de pastagem, 31 delas (64%) se encontravam sobre Latossolos, 15 (31%) sobre Neossolos Quartzarênicos e 2 (5%) em Nitossolos. Dentre as áreas oriundas de agricultura, 6 (60%) se apresentavam sobre Latossolos e 4 (40%) sobre Nitossolos, enquanto nas áreas de Cerrado, 4 (80%) se apresentaram sobre Latossolos e 1 (20%) se apresentavam sobre Neossolo Quartzarênico.

Tabela 2.7 - Quantidade de áreas amostradas de acordo com o tipo de solo e uso da terra

Solos Tipo	**Áreas coletadas por uso**			
	Cana-de-açúcar	**Pastagem**	**Agricultura**	**Cerrado**
Latossolo Amarelo	9	9	0	0
Latossolo Vermelho	32	18	5	0
Latossolo Vermelho Amarelo	9	4	1	4
Neossolo Quartzarênico	22	15	0	1
Nitossolo	7	2	4	0
Total	**79**	**48**	**10**	**5**

Conforme demonstra a Tabela 2.7, o principal uso da terra amostrado foi a cana-de-açúcar, com 79 áreas, seguidos de áreas de Pastagem, 48 áreas, Agricultura, 10 áreas, e Vegetação Nativa, 5 áreas, totalizando 142 áreas amostradas (Apêndice A). Apesar da quantidade de áreas de referência (n=63) ser inferior ao número de áreas amostradas com cana-de-açúcar (n=79), a metodologia proposta pelo IPCC (2006) indica que as avaliações de MUT devem ser realizadas por meio da comparação de pares, permitindo que uma área de referência seja associada a mais de uma área de cana-de-açúcar (MAIA et al., 2009, 2010). Desta forma, uma possível comparação entre pares amostrais permitiria a avaliação de 79 condições de produção de cana-de-açúcar em diversos pontos da região Centro-Sul do país (Apêndice A).

A distribuição das áreas coletadas na região Centro Sul teve maior ênfase nos estados de São Paulo, com 58 áreas amostradas seguido de Minas Gerais, 45; Paraná, 16; Goiás, 15 e Mato Grosso do Sul, com 8 áreas amostradas (Tabela 2.8), e como consequência a formação de pares amostrais considerando a abordagem do IPCC (2006) também teve maior representação nos referidos estados.

Em São Paulo pôde-se formar 32 pares amostrais de áreas advindas de pastagem e que passaram a cultivar cana-de-açúcar. No Estado de Minas Gerais foi possível estabelecer 26 pares amostrais, seguidos de 9 em Goiás, 8 no Paraná e 4 no Mato Grosso do Sul (Tabela 2.8). É importante destacar que a maior parte dos dados levantados referem-se a MUT de pastagem para o cultivo de cana-de-açúcar, que totalizaram 60 dos 79 pares. Seguido encontra-se a conversão para de agricultura para cana-de-açúcar apresentando 14 pares e conversão de Cerrado para cana-de-açúcar formando 5 pares amostrados (Tabela 2.8).

Tabela 2.8 - Distribuição das áreas amostradas por estado e formação de pares amostrais por uso da terra e estado

Uso da terra	**Estados**				
	SP	**MG**	**GO**	**MS**	**PR**
cana-de-açúcar	32	26	9	4	8
pastagem	26	13	4	1	4
agricultura	0	2	1	3	4
vegetação nativa	0	4	1	0	0
Total	58	45	15	8	16
Pares					
pastagem	32	17	6	1	4
agricultura	0	5	2	3	4
vegetação nativa	0	4	1	0	0
Total	32	26	9	4	8

Com relação as áreas aptas ao cultivo da cana-de-açúcar estabelecidas pela ZAE (MANZATTO et al., 2009), o levantamento e coleta de solos apresentado por este capítulo inicial permitiu a amostragem de solos em 76 áreas cultivadas com cana-de-açúcar (do total de 79) em locais aptos ao seu cultivo e expansão (Apêndice A, Tabela 2.9). Apenas 3 áreas se encontraram em locais inaptos por apresentarem restrição climática devido a possibilidade de ocorrência de geadas. De acordo com a Tabela 2.9, o estado de São Paulo foi o que apresentou a maior quantidade de áreas prioritárias (sub-classificação de áreas aptas) a produção de cana-de-açúcar seguido do Paraná, com 6 áreas. Os demais estados apresentaram situações coletadas classificadas como aptas, porém com restrições, que podem ocorrer por condições climáticas e interferir na produção da cana-de-açúcar mas que não restringem o seu cultivo. É importante enfatizar que não foram coletadas amostras em áreas inviáveis ao cultivo de cana-de-açúcar, onde, por exemplo, pode ocorrer excesso de dias sem chuva

diminuindo produção de fitomassa e de açúcar (INMAN-BAMBER, 2004; INMAN-BAMBER; SMITH, 2005) ou locais onde o regime climático pode afetar a maturação da cana-de-açúcar e diminuir a produção de açúcar ou etanol (ROLZ; LEÓN, 2010).

Tabela 2.9 - Classificação das áreas amostradas de cana-de-açúcar de acordo com o ZAE (MANZATTO et al., 2009)

Aptidão	**ZAE**	**Estados**				
		SP	**MG**	**GO**	**MS**	**PR**
Aptas	Prioritária	24	0	0	0	6
	Regulares	2	26	9	4	2
Inaptas	Marginal por Solo	3	0	0	0	0
	Restrição climática	3	0	0	0	0

2.3 Conclusões

Avaliações sobre o efeito da MUT no cultivo de cana-de-açúcar tornam-se importantes a medida que avaliações como o balanço de emissão de GEE ganharam importância. No Brasil, a região Centro-Sul apresenta cerca de 90% da produção de cana-de-açúcar, e é a região onde a expansão pode ocorrer nas próximas décadas.

A amostragem de solos apresentada neste capítulo inicial considerou os principais aspectos determinantes na expansão do cultivo da cana-de-açúcar no Brasil, como a aptidão edafoclimática proposta pelo Zoneamento Agroecológico da cana-de-açúcar, elaborado pela EMBRAPA.

Adicionalmente, foi possível contemplar as principais classes de solos existentes na região Centro Sul do Brasil e os principais usos de solo que são convertidos para cana-de-açúcar, indicando excelente representatividade das áreas de coleta com relação a maneira como ocorre a expansão do cultivo da cana-de-açúcar no país.

Por fim é importante enfatizar que a formulação de uma base de dados de solos para avaliação da MUT com aproximadamente 6.000 amostras é um fato inovador para o setor sucroenergético e poderá esclarecer questões importantes atualmente associadas ao setor, como por exemplo, o cálculo da dívida de carbono do etanol, objeto principal deste trabalho de pesquisa e que será abordado em capítulo posterior.

Referências

ADAMI, M.; RUDORFF, B.F.T.; FREITAS, R.M.; AGUIAR, D.A.; SUGAWARA, L.M.; MELLO, M.P. Remote sensing time series to evaluate direct land use change of recent expanded sugarcane crop in Brazil. **Sustainability**, Basel, v.4, p.574-585, 2012.

ALVAREZ, R.; ALVAREZ, C.R.; LORENZO, G. Carbon dioxide fluxes following tillage from a mollisol in the Argentine Rolling Pampa. **European Journal of Soil Biology**, Montrouge, v. 37, p. 161-166, 2001.

BATJES, N.H. Soil organic carbon stocks under native vegetation – Revised estimates for use with the simple assessment option of the Carbon Benefits Project system. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v.142, p.365-373, 2011.

BATJES, N.H.; BRIDGES, E.M. World inventory of Soil Emission Potentials (WISE): geographic quantification of soil factors that control fluxes of greenhouse gases. **Studies in Environmental Science**, Amsterdam, v. 65, p.645-650, 1995.

BENITES, V.; MACHADO, P.O.L.A.; FIDALGO, E.C.C.; COELHO, M.R.; MADARI, B.E. Pedotransfer functions for estimating soil bulk density from existing soil survey reports in Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v.139, p. 90-97, 2007.

BERNOUX, M.; ARROUAYS, D.; CERRI, C.C.; VOLKOFF, B.; JOLIVET C. Bulk densities of Brazilian Amazon soils related to other soil properties, **Soil Science of Society of America Journal**, Madison, v. 62, p. 743-749, 1998.

BLAKE, G.R.; HARTGE, K H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. 2.ed. Madison: ASA, 1986. pt.1. p. 364-367. (Agronomy, 9).

BORDONAL R.O.; FIGUEIREDO E.B.;LA SCALA, N. Greenhouse gas balance due to the conversion of sugarcane areas from burned to green harvest, considering other conservationist management practices. **Global Change Biology Bioenergy**, Oxford, v.4, p.846-858, 2012.

BRASIL. Comitê Interministerial sobre Mudança do Clima. **Plano Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC).** Brasília, DF, 2008. 132p. Disponível em: http://www.forumclima.org.br/Acesso em: 10 nov. 2009.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. **Comunicação Nacional Inicial do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima**. Brasília, DF: Coordenação-Geral de Mudanças Globais de Clima, 2004. 74p.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética - EPE. **Balanço Energético Nacional 2011**: Ano base 2010. Rio de Janeiro: EPE, 2011. 266 p.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Balanço nacional de cana-de-açúcar e agroenergia.** Brasília, DF: MAPA, Secretaria de Produção e Agroenergia, 2007.139 p.

CAMARGO, A.O.; MONIZ, DE A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do IAC**. Campinas: Instituto Agronômico, 1986. 94 p. (Boletim Técnico, 106).

CARMO, J.B.; FILOSO, S.; ZOTELLI, L.; SOUZA NETO, E.R.; PITOMBO, L.M.; DUARTE NETO, P.J.; VARGAS, V.P.; ANDRADE, C.A.; GAVA, G.C.; ROSSETO, R.; CANTARELLA, H.; ELIA NETO, A.; MARTINELLI, L.A.Infield greenhouse gas emissions from sugarcane soils in Brazil: effects from synthetic and organic fertilizer application and crop trash accumulation. **Global Change Biology Bioenergy**, Oxford, v. 5, p. 1-14, 2012.

CARVALHO, J.L.N.; CERRI, C.C.; FEIGL, B.J.; PÍCCOLO, M.C.; GODINHO, V.P.; HERPIN, U.H.W. Changes of chemical properties in an oxisol after clearing of native Cerrado vegetation for agricultural use in Vilhena, Rondonia State, Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 96, p. 95-102, 2007.

CARVALHO, J.L.N.; CERRI, C.E.P.; FEIGL, B.J.; PÍCCOLO, M.C.; GODINHO, V.P.; CERRI, C.C. Carbon sequestration in agricultural soils in the Cerrado region of the Brazilian Amazon. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 103, p. 342-349, 2009.

CERRI, C.C.; BERNOUX, M.; MAIA, S.M.F.; CERRI, C.E.P.; COSTA JUNIOR, C.; FEIGL, B.J.; FRAZÃO, L.A.; MELLO, F.F.C.; GALDOS, M.V.; MOREIRA, C.S.; CARVALHO, J.L.N. Greenhouse gas mitigation options in Brazil for land-use change, livestock and agriculture. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 67, p. 102-116, 2010.

CERRI, C.C.; MAIA, S.M.F.; GALDOS, M.V.; CERRI, C.E.P.; FEIGL, B.J.; BERNOUX, M. Brazilian greenhouse gas emissions: the importance of agriculture and livestock. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 66, p. 831-843, 2009.

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

CERRI, C.E.P.; PAUSTIAN, K.; BERNOUX, M.; VICTORIA, R.L.; MELILLO, J.M.; CERRI, C.C. Modeling changes in soil organic matter in Amazon forest to pasture conversion with the Century model. **Global Change Biology**, Oxford, v. 10, p.815-832, 2004.

COELHO, S.T.; GOLDEMBERG, J.; LUCON, O.; GUARDABASSI, P. Brazilian sugarcane ethanol: lessons learned. **Energy for Sustainable Development**, Amsterdam, v. 10, n. 2, p. 26-39, 2006.

ESWARAN, H.; VAN DEN BERG, E.; REICH, P.; KIMBLE, J. Global soil carbon resources. In: LAL, R.; KIMBLE, J.; LEVINE, E.; STEWART, B.A.(Ed.). **Soil and global change**.Boca Raton:CRC Press, 1995.p.27-43.

FAO. **The State of Food and Agriculture - BIOFUELS**: prospects, risks and opportunities. Rome, 2008. 128p.

FAO. **FAOSTAT**. Rome, 2010. Disponível em: http://faostat.fao.org/ Acesso em: 10 jan. 2012.

FARGIONE, J.; HILL, J.; TILMAN, D.; POLASKY, S.; HAWTHORNE, P. Land clearing and the biofuel carbon debt. **Science**, Washington, DC, v.319, p. 1235–1238, 2008.

FEARNSIDE, P.M.; RIGHI, C.A.; GRAÇA, P.M.L.A.; KEIZER, E.W.H.;CERRI, C.C.; NOGUEIRA, E.M.; BARBOSA, R.I. Biomass and greenhouse-gas emissions from land-use change in Brazil s Amazonian arc of deforestation: the states of Mato Grosso and Rondônia. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 258, p. 1968-1978, 2009.

FOLEY, J.A.;RAMANKUTTY, N.; BRAUMAN, K.A.; CASSIDY, E.S.;GERBER, J.S.;JOHNSTON,M.; MUELLER, N.D.; O'CONNELL, C.; RAY, D.K.; WEST, P.C.; BALZER, C.; BENNETT, E.M.; CARPENTER, S.R.; HILL, J.; MONFREDA, C.;POLASKY,S.;ROCKSTRÖM, J.;SHEEHAN, J.;SIEBERT, S.;TILMAN, D.;ZAKS,D.P.M. Solutions for a cultivated planet. **Nature**, London, v. 478, p. 337-342, 2011.

FRAZÃO, L.A., PAUSTIAN, K., CERRI, C.E.P., CERRI, C.C. Soil carbon stocks and changes after oil palm introduction in the Brazilian Amazon. **Global Change Biology Bioenergy**, Oxford, 2012. DOI: 10.1111/j.1757-1707.2012.01196.x.

GALDOS, M.V.; CERRI, C.C.; LAL, R.; BERNOUX, M.; FEIGL, B.; CERRI, C.E.P. Net greenhouse gas fluxes in Brazilian Ethanol Production Systems. **Global Change Biology Bioenergy**, Oxford, v. 2, p. 37-44, 2010.

GALFORD, G.; MELLILO, J.M.; KICKLIGHTER, D.; CRONIN, T.; CERRI, C.E.P.; MUSTARD, J.;CERRI, C.C. Greenhouse gas emissions from alternative futures of deforestation and agricultural management in the southern Amazon. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA**, Washington, DC, v. 107, p. 19649-19654, 2010.

GOLDEMBERG, J.; COELHO, S.T.; NASTARI, P.M.; LUCON, O. Ethanol learning curve - the Brazilian experience (short communication). **Biomass and Bioenergy**, Amsterdam, v.26, p.301-304, 2004.

INMAN-BAMBER, N.G. Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.89, n. 1, p.107–122, 2004.

INMAN-BAMBER, N.G., SMITH, D.M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.92, n. 2-3, p.185–202, 2005.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.** Hayama, Kanagawa, Japan: Institute for Global Environment Strategies, 2006. v. 4: Agriculture, forestry and other land use.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Good practice guidance for land use, land-use change and forestry**. Hayama, Kanagawa, Japan: Institute for Global Environment Strategies, 2003. 623p.

LAL, R. Global potential of soil carbon sequestration to mitigate the greenhouse effect. **Critical Reviews in Plant Sciences**, Boca Raton, v.22, p. 151-184, 2003.

LANGE, M. The GHG balance of biofuels taking into account land use change. **Energy Policy**,Guildford, v.39, p.2373-2385, 2011.

LAPOLA, D.M.; SCHALDACH, R.; ALCAMO, J.; BONDEAU, A.; KOCH, J.; KOELKING, C.; PRIESS, J.A. Indirect land-use changes can overcome carbon savings from biofuels in Brazil. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA**, Washington, DC, v. 107, p. 3388-3393, 2010.

MAIA, S.M.F. **Estimativa das emissões de carbono do solo devido às mudanças de uso da terra em Rondônia e Mato Grosso**. 2009. 161p. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

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

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

MANZATTO, C.V.; ASSAD, E.D.; BACCA, J.F.M.; ZARONE, M.J.; PEREIRA, S.E.M. **Zoneamento agroecológico da cana-de-açucar**. Expandir a produção, preservar a vida, garantir o futuro. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009. 55 p. (Documentos, 110).

MARTINELLI, L.A.; OMETTO, B.; HENRY, J.P.; FILOSO, S.; VICTORIA, R.L. Contextualizing ethanol avoided carbon emissions in Brazil. **Global Change Biology Bioenergy**, Oxford, v. 2, n. 3, p.152-156, 2010.

MATTOS, A. R. **Açúcar e álcool no Brasil**. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 1942.

METAY, A.; OLIVER, R.; SCOPEL, E.; DOUZET, J.M.; MOREIRA, J.A.A.; MARAUX, F.; FEIGL, B.; FELLER, C. N_2O and CH_4 emissions from soils under conventional and no-till management practices in Goiânia (Cerrados, Brazil). **Geoderma**, Amsterdam, v. 141, p.78-88, 2007.

MILNE, E.; Al ADAMAT, R.; BATJES, N.H.; BERNOUX, M.; BHATTACHAYYA, T.; CERRI, C.C.; CERRI, C.E.P.; COLEMAN, K.; EASTER, M.; FALLOON, P.; FELLER, C.; GICHERU, P.; KAMONI, P.; KILLIAN, K.; PAL, D.K.; PAUSTIAN, K.; POLSON, D.S.; RAWAJFIH, Z.; SESSAY, M.; WILLIAMS, S.; WOKABI, S. National and sub-national assessments of soil organic carbon stocks and changes: The GEFSOC modelling system. **Agriculture Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v.122, p.3–12, 2007.

MISHRA, U.; TORN, M.S.; MASSANET, E.; OGLE, S.M. Improving regional soil carbon inventories: Combining the IPCC carbon inventory method with regression kriging. **Geoderma**, Amsterdam, v.189-190, p.288-295, 2012.

MORAES, J.F.L.; CERRI, C.C.; MELILLO, J.M.; KICKLIGHTER, D.; NEILL, C.; SKOLE, D.; STEUDLER, P.A. Soil carbon stocks of the Brazilian Amazon basin. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 59, p. 244-247, 1995.

MORAES, M.A.F.D. Perspective: lessons from Brazil, **Nature**, London, v. 474, p.S25-S25, 2011.

MOREIRA, J.R.; GOLDEMBERG, J. The alcohol program. **Energy Policy**, Guildford, v.27, p. 229-245, 1999.

NASSAR, A.M.; RUDORFF, B.F.T.; ANTONIAZZI, L.B.; AGUIAR, D.A.; BACCHI, M.R.P.; ADAMI, M.Prospects of the sugarcane expansion in Brazil: impacts on direct and indirect land use changes. In: ZUURBIER, P.; VAN DE VOOREN, J. (Org.). **Sugarcane ethanol**: contributions to climate change mitigation and the environment. 1. ed. Wageningen: Wageningen Academic Publishers, 2008. v. 1, p. 63-93.

NELSON, D.W.; SOMMERS, L.E. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: SPARKS, D.L.; PAGA, A.L.; HELMKE, P.A.; LOEPPERT, R.H.; SOLTANPOUR, P.N.; TABATABAI, M.A.; JOHNSTON, C.T.; SUMMER, M.E. (Ed.).**Methods of soil analysis**: Chemical methods. Part 3. Madison: SSSA, 1996. p.961-1010.

NEVES M.F.; TROMBIN, V.G.; CONSOLI, M.A. Measurement of sugar cane chain in Brazil. **International Food and Agribusiness Management Review**, Stanford, v.3, p.37-54, 2010.

OGLE, S.M.; BREIDT, F.J.; EASTER, M.; WILLIAMS, S.; KILLIAN, K.; PAUSTIAN, K. Scale and uncertainty in modeled soil organic carbon stock changes for US croplands using a process-based model. **Global Change Biology**, Oxford, v.16, p.801–822, 2010.

RIGHI, C.A.; GRAÇA, P.M.L.A.; CERRI, C.C.; FEIGL, B.J.; FEARNSIDE, P.M. Burning efficiency and charcoal formation in a fire after mechanized clearing at Feliz Natal, Mato Grosso. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 258, p. 2535-2546, 2009.

ROLZ, C.; LEÓN, R. Ethanol fermentation from sugarcane at different maturities. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v.33, p.333–337, 2011.

SIQUEIRA NETO, M.; SCOPEL, E.; CORBEELS, M.; CARDOSO, A.N.; DOUZET, J.M.; FELLER, C.; PICCOLO, M.C.;CERRI, C.C.; BERNOUX, M. Soil carbon stocks under no-tillage mulch-based cropping systems in the Brazilian Cerrado: an on-farm synchronic assessment. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 110, p. 187-195, 2010.

SOARES, L.H.B.; ALVES, B.J.R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R.M. **Mitigação das emissões de gases de efeito estufa pelo uso de etanol da cana-de-açúcar produzido no Brasil**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2009. 14 p. (Circular Técnica, 29).

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR.**UNICADATA**. São Paulo: ÚNICA. Disponível em: http://www.unica.com.br. Acesso em: 10 out. 2012.

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

3. DETERMINAÇÃO INDIRETA DA DENSIDADE DO SOLO SOB DIFERENTES USOS DA TERRA PELA UTILIZAÇÃO DE REGRESSÕES MÚLTIPLAS DO TIPO "STEPWISE" (RMS)

Resumo

A medida de densidade do solo (D_{AS}) diretamente no campo com amostras coletadas é uma atividade não rotineira e de difícil obtenção. Neste contexto é possível elucidar que diversos autores conseguiram determinar com precisão a D_{AS} por meio de suas relações com outros atributos de solo utilizando Regressões Múltiplas "Stepwise" (RMS). Desta firma, o principal objetivo deste capítulo foi gerar equações para estimativa da D_{AS}, por meio de outros atributos de solo. Para tanto, foi utilizada uma base de dados contendo 706 amostras com informações relacionadas a aspectos físico-químicos de solos pertencentes a três classes e situados sob quatro usos da terra que foram avaliadas em três níveis: i) por tipo de solo; ii) por uso da terra e iii) por tipo de solo e uso da terra. Os resultados obtidos pela primeira estimativa apresentaram equações com elevado grau de correlação entre atributos do solo e a D_{AS} para Latossolos (R^2 = 0,77) e na segunda estimativa para três dos quatro tipos de uso da terra avaliados (variação do R^2 = 0,41 a 0,84). Com a segregação da base de dados em tipos de solos e usos da terra foram obtidos resultados aceitáveis para a classe dos Latossolos (variação do R^2 = 0,60 a 0,82) sob todos usos da terra. Para Neossolos e Nitossolos foi possível notar que as RMS permitiram a elaboração de equações mais eficientes à medida em que o manejo intrínseco ao uso da terra diminuiu de intensidade. Desta forma, os melhores resultados foram obtidos para áreas não cultivadas, sob vegetação nativa (variação do R^2 = 0,76 a 1,00), e as que foram menos eficientes para determinação da D_{AS} foram aquelas atreladas ao cultivo de culturas anuais e semi-perenes (variação do R^2 = 0,06 a 0,26). Espera-se que as equações desenvolvidas por este trabalho de pesquisa possam ser utilizadas por outros pesquisadores e projetos de pesquisa que tenham como objetivo calcular mudanças de estoques de carbono orgânico do solo decorrentes de mudança de uso da terra.

Palavras-chave: Regressões múltiplas. Densidade do solo. Uso da terra. Solos.

INDIRECT ESTIMATE OF SOIL BULK DENSITY UNDER DIFFERENT LAND USES USING STEPWISE MULTIPLE REGRESSIONS (SMR)

Abstract

Soil bulk density (D_b) can be measured with soil sampling, but these proceedings are not considered for routine measurements and are laborious to do in fieldwork. Several studies show that is possible to obtain D_b investigating correlations with other soil attributes using multiple regressions stepwise type. The aim of this chapter was to estimate D_b using SMR to derive equations, known as pedotransfer functions. To achieve that, a soil database including chemical and physical information of 706 soil samples belonged to three soil classes and four land uses was used, and SMR were performed considering three evaluation levels: i) by soil type ii) by land use type and iii) by soil type and land use. Results generated by the first method presented functions for Oxisols with high correlation levels (R^2 = 0.77) considering soil attributes and D_b. Second method showed high correlations for three of four land uses evaluated (R^2 range = 0.41 to 0.84). Splitting the soil database was possible to derive specific functions with high correlation levels for Oxisols (R^2 range = 0.60 to 0.82). To Nitisols and Arenosols it was possible to find that better functions were developed as the soil management, intrinsic to the evaluated land use diminished the impact level. Thus, the best results found were related to not cultivated areas, which is native vegetation (R^2 range = 0.76 to 1.00), and the functions that less explained the D_b variation were related to annual and semi-perenial cropping (R^2 range = 0.06 to 0.26) We expect that results generated by this research paper could be used by other scientists in research projects as way to evaluate SOC stocks modifications resulted from land use change.

Key words: Multiple regressions. Soil bulk density. Land use. Soils.

3.1 Introdução

O ambiente terrestre contém cerca de 2.868 Pg de carbono (C) dos quais 1576 Pg C estão situados no primeiro metro de profundidade dos solos, 562 Pg C estão estocados na vegetação e 730 Pg C permanecem na atmosfera na forma de gases (IPCC, 2003). Modificações no ambiente terrestre podem alterar os estoques de C nestes compartimentos ocasionando emissão de gases do efeito estufa (GEE), de onde se destaca principalmente o dióxido de carbono (CO_2). No Brasil, as maiores fontes de emissão do CO_2 são resultantes de processos de mudança de uso da terra, com a derrubada e queima da vegetação nativa e a decomposição de material vegetal e da matéria orgânica dos solos como apontam diversos trabalhos científicos (CERRI et al., 2007; FEARNSIDE et al., 2009; RIGHI et al., 2009; CERRI et al., 2009; TEIXEIRA et al., 2011; SIQUEIRA NETO et al., 2011).

A determinação das emissões de CO_2 dos solos pode ser realizada por metodologias de quantificação direta ou indireta. O procedimento para determinação direta usualmente requer a instalação de câmaras estáticas sobre o solo, de onde amostras de gases são coletadas em diferentes intervalos de tempo com o uso de seringas para então ser analisadas em laboratório (STEUDLER et al., 1989; GARCIA-MONTIEL et al., 2004; SIQUEIRA NETO et al., 2011). Apesar da possibilidade de determinar as emissões de CO_2 no momento da coleta, esta metodologia requer um número muito elevado de medidas para avaliar as emissões acumuladas, relacionadas ao tempo decorrido da mudança de uso da terra.

A estimativa indireta se baseia na diferença entre estoques de carbono orgânico do solo (COS) de um determinado uso da terra ao longo do tempo. Para tanto, é necessário que o estudo avalie cronossequências, onde áreas de um mesmo uso da terra sob condições semelhantes de clima, solo e manejo possam ser comparadas ao apresentam diferentes períodos de conversão. Desta forma, a diferença entre os estoques de COS no tempo final e inicial são consideradas as emissões líquidas do processo de mudança de uso da terra, podendo ser negativo, indicando emissão de CO_2, ou positivo, indicando sequestro de carbono dos solos (MORAES et al., 1995; ALVAREZ et al., 2001; ZINN et al., 2005; MAIA et al., 2009; FRAZÃO et al., 2012).

Por sua vez, o cálculo do estoque do COS é uma função do teor de COS, da espessura da camada e da densidade aparente do solo (D_{AS}). Esta última informação nem sempre é acessível na literatura, além de ser trabalhosa de ser obtida no campo (CARVALHO et al., 2009; SIQUEIRA NETO et al., 2010; FRAZÃO et al., 2012).

Existem diversas metodologias para determinar as relações entre a D_{AS} e outros atributos do solo, permitindo gerar "equações de pedotransferência". Destacam-se o uso de metodologias como árvores classificatórias de regressão (PACHEPSKY; RAWLS, 2003), regressões lineares mistas (SUUSTER et al., 2011), espectroscopia utilizando a faixa do infra-vermelho próximo (MOREIRA et al., 2009), tomografia computadorizada (PEDROTTI et al., 2005) e Regressões Múltiplas do tipo "Stepwise" (RMS), que podem ser aplicadas em áreas de clima temperado ou tropical (BERNOUX et al., 1998a; PACHEPSKY; RAWLS, 2003; BENITES et al., 2007; BRAHIN; BERNOUX; GALALLI, 2012).

Considerando RMS, um dos primeiros trabalhos demonstrando o método e a eficiência para desenvolver equações de pedotransferência em solos tropicais foi o de Bernoux et al. (1998a), onde os autores conseguiram correlacionar a D_{AS} com a textura, o tipo de solo e os teores de COS, gerando equações que explicaram até 79% da variação existente na D_{AS}.

Seguindo a mesma metodologia proposta por Bernoux et al. (1998a), Benites et al. (2007) utilizaram uma base de dados de solos do RADAM com 1002 amostras para determinar equações de pedotransferência, apresentando resultados que explicavam até 71% da variação existente na D_{AS}. No entanto, os referidos autores utilizaram 8 atributos de solos (de 17 existentes) para atingir a eficiência máxima das RMS, o que limita a utilização das equações por outros grupos de pesquisa e diferentes bases de dados de solos caso falte algum dos atributos utilizados nas RMS.

Neste aspecto é possível elucidar que poucas bases de informações apresentam dados sobre diferentes usos da terra, e a maior parte dos trabalhos científicos existentes desenvolvem equações de pedotransferência focando variações sobre classes de solo, textura ou horizontes de origem em áreas sob vegetação nativa (BERNOUX et al., 1998a; PACHEPSKY; RAWLS, 2003; SUUSTER et al., 2011; BRAHIN; BERNOUX; GALALLI, 2012).

Por outro lado, o desenvolvimento de equações específicas para diferentes usos da terra poderia auxiliar avaliações de mudanças de estoques de carbono resultantes da expansão de atividades agrícolas e sua consequente emissão de GEE ou potencial sequestro de carbono dos solos (CARVALHO et al., 2009; GALFORD et al., 2010), como por exemplo a recente expansão do cultivo da cana-de-açúcar sobre áreas de culturas anuais e pastagens, situação que ocorre atualmente no Brasil (RUDORFF et al., 2010; ADAMI et al., 2012)

De acordo com a FAO a expansão do cultivo de cana-de-açúcar aumentou em 4 milhões de hectares nos últimos 10 anos (FAO, 2012) e a avaliação das mudanças de estoques de COS poderiam esclarecer questões levantadas recentemente por artigos

científicos, como por exemplo, as relações entre mudança de uso da terra e a dívida de carbono na produção de biocombustível (FARGIONE et al., 2008; FAO, 2008; LAPOLA et al., 2010).

Desta forma, o presente capítulo teve por principal objetivo gerar equações de pedotransferência sob diferentes usos da terra por meio de regressões múltiplas do tipo "stepwise". Espera-se que os resultados gerados possam ser utilizados por outros pesquisadores e projetos de pesquisa que realizem estudos sobre mudanças dos estoques de COS sem que exista necessidade de realizar coletas específicas para determinação da D_{AS}.

3.2. Desenvolvimento

3.2.1 Material e Métodos

Para efetuar as regressões múltiplas do tipo stepwise foram utilizadas informações oriundas de uma base de dados abrangendo diferentes usos da terra, apresentada no capítulo 1. A referida base apresentava informações levantadas em 142 áreas de estudos contemplando quatro usos da terra na região Centro Sul do Brasil: i) cana-de-açúcar; ii) pastagem; iii) culturas anuais (agricultura) e iv) vegetação nativa (Apêndice A).

Para cada área avaliada existiam informações a respeito do uso e tipo do solo, teores de carbono que foram determinados por combustão a seco (NELSON; SOMMERS, 1996), densidade do solo coletadas em campo pelo método do anel volumétrico (BLAKE; HARTGE, 1986) e granulometria, que consistiu na separação das frações areia (2,00-0,05 mm), silte (0,05-0,002 mm) e argila (<0,002 mm) pelo método do densímetro utilizando como agente dispersante o Na-hexametafosfato (CAMARGO et al., 1986).

Do total de 6318 amostras existentes, apenas parte foi utilizada para o desenvolvimento de equações de pedotransferência, uma vez que a textura do solo foi determinada em apenas uma trincheira por área avaliada. Foram considerados *outliers* as amostras nas quais a subtração entre os valores estimados dos observados resultaram no valor maior ou menor a 2,5 **δ** (desvio padrão), mas estas só foram excluídas quando o procedimento resultou no aumento significativo do R^2 ajustado, procedimento semelhante ao realizado por Benites et al. (2007) para geração de equações de pedotransfrência por RMS. Desta forma, o total de 706 amostras de solo foi selecionado para o desenvolvimento das equações, das quais 411 eram áreas de cana-de-açúcar, 205 de pastagem, 47 de agricultura, e 43 de vegetação nativa.

A fim de obter a melhor equação para estimativa da D_{AS} foi realizada uma regressão para indicar quais atributos apresentavam interferência nos dados ao nível de significância de $p<0,0001$ utilizando o software STATISTICA 8.0 (STATSOFT,1999). A partir da verificação da influência do uso da terra e dos tipos de solo, as RMS foram aplicadas de três maneiras.

Na primeira estimativa, denominada geral, os dados foram testados sem que houvesse diferenciação por uso da terra e foram agrupados por tipo de solo. As equações foram geradas considerando apenas os atributos significativos ao nível de $p<0,0001$, disponíveis na base de dados (COS, argila, areia e profundidade final). Nos casos onde os atributos não foram significativos ao nível adotado as equações foram geradas apenas utilizando atributos que promoveram o incremento do R^2 ajustado, procedimento que foi adotado nas demais regressões.

Para a realização da segunda estimativa os dados foram agrupados de acordo com o uso da terra sem diferenciação de classe de solos. Este procedimento foi realizado com o intuito de segregar a base de dados sob diferentes classes de manejo de solos que são intrínsecos ao seu uso e poderiam refletir nas relações entre a D_{AS} e os atributos de solo presentes na base de dados. Desta forma, a base foi dividida em quatro classes: i) anuais (agricultura); ii) semi-perenes (cana-de-açúcar); iii) perenes (pastagem) e iv) áreas não cultivadas (vegetação nativa).

A terceira e última avaliação consistiu na subdivisão da base de dados considerando as principais classes de solo e uso da terra. Os resultados foram avaliados relacionando a eficiência da equação gerada considerando o R^2 ajustado, que foram comparados com resultados obtidos por outros trabalhos científicos (BERNOUX et al., 1998a; BENITES et al., 2007; MOREIRA et al., 2009; SUUSTER et al., 2011; BRAHIN; BERNOUX; GALALLI, 2012).

3.2.3 Resultados e discussão

3.2.3.1 Avaliação das informações existentes na base de dados de solos

A base de dados utilizada apresentou maior quantidade de áreas sob Latossolos, representando 66% do total dos dados, seguidos dos Neossolos Quartzarênicos com 25% de participação e dos Nitossolos, apresentando 9% dos dados da base de informações (Tabela 3.1). Apesar do maior número de observações ser referentes a Latossolos, a proporção entre as três classes observadas se assemelha a distribuição de solos existente na região Centro Sul do

Brasil contemplada pelo zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar (MANZATTO et al., 2009), formato que foi adotado para a construção da base de dados de solos.

Com relação à cobertura de diferentes usos da terra, a maior quantidade de observações foi de áreas advindas do cultivo de cana-de-açúcar, representando 58% dos dados disponíveis, seguidos de áreas de pastagem, com 29%, e então de áreas oriundas de agricultura e de vegetação nativa, com respectivamente 7% e 6% de representação na base de dados para Latossolos (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 - Amostras de solo disponíveis na base de dados por tipo de solo e uso da terra

Uso do solo	**Observações**					
	Latossolos		**Neossolos**		**Nitossolos**	
	n	**%**	n	**%**	n	**%**
Cana-de-açúcar	271	58	104	59	36	55
Pastagem	132	29	66	38	7	11
Agricultura	27	6	0	0	20	30
Vegetação Nativa	34	7	6	3	3	4
Total	464	100	176	100	66	100

A variação dos atributos físicos e químicos avaliados ocorreu nos diferentes usos da terra, o que era esperado uma vez que as amostras representavam áreas de diversas localidades distribuídas em uma região de 2,5 milhões de km^2. Especificamente, a D_{AS} apresentou médias distintas e foram mais elevadas em áreas de cana-de-açúcar (1,33 g cm^{-3}) e de pastagem (1,30 g cm^{-3}) quando comparadas com áreas de agricultura (1,13 g cm^{-3}) e vegetação nativa (1,10 g cm^{-3}). Tal comportamento pode ser resultado da diferença granulométrica entre as referidas áreas que apresentam dois padrões de textura. As áreas de cana-de-açúcar e de pastagem apresentaram maiores teores de areia do que de argila enquanto o comportamento oposto foi observado nas áreas de agricultura e vegetação nativa (Tabela 3.2).

Estes resultados são coerentes e corroboram com outros estudos, indicando que quanto maior a fração granulométrica do solo maior sua densidade. Este fato é decorrente do maior volume de macroporos encontrados em solos arenosos quando comparados aos solos argilosos, os tornando mais suscetíveis a compactação (CARTER, 1990; CAVALIERI et al., 2009) que podem ocorrer nas pastagens devido ao pisoteio dos animais (MARTÍNEZ;

ZINCK, 2004; KURZ; O'REILLY; TUNNEY, 2006) e nas áreas de cana-de-açúcar devido ao uso de máquinas agrícolas (BRAUNACK; McGARRY, 2006; BRAUNACK; ARVIDSSON; HÅKANSSON, 2006; SILVA et al., 2009).

Tabela 3.2 - Estatística descritiva da base de dados utilizada para geração das equações de pedotransferência considerando os diferentes usos da terra avaliados

Uso	Obs.	Atributo	Unidade	Estatística descritiva							
				Mínimo	Média	Máximo	DP	Q1	Q2	IQR	MAD
CA	411	COS	g kg^{-1}	0,1	1,0	3,7	0,7	0,5	1,4	0,9	0,4
		D_{AS}	g cm^{-3}	0,7	1,3	1,9	0,3	1,1	1,6	0,5	0,2
		Areia	g kg^{-1}	0,0	54,4	96,1	29,3	22,7	80,8	58,2	20,6
		Argila	g kg^{-1}	0,0	31,3	77,3	21,6	12,5	53,3	40,7	15,8
		Silte	g kg^{-1}	0,0	14,1	58,2	10,7	6,2	20,3	14,1	6,2
PA	205	COS	g kg^{-1}	0,1	1,1	3,6	0,8	0,5	1,5	1,0	0,5
		D_{AS}	g cm^{-3}	0,7	1,3	2,0	0,3	1,0	1,6	0,6	0,2
		Areia	g kg^{-1}	12,5	55,4	96,9	28,5	25,3	80,9	55,6	20,9
		Argila	g kg^{-1}	0,0	31,1	70,6	22,0	10,1	53,1	42,9	15,8
		Silte	g kg^{-1}	0,0	13,5	57,4	9,2	6,8	20,0	13,2	6,3
AG	47	COS	g kg^{-1}	0,3	1,2	2,9	0,7	0,7	1,6	0,9	0,4
		D_{AS}	g cm^{-3}	0,7	1,1	1,6	0,2	1,0	1,3	0,3	0,2
		Areia	g kg^{-1}	5,0	23,4	79,9	21,2	8,2	30,5	22,3	6,9
		Argila	g kg^{-1}	17,6	54,5	78,1	16,2	46,9	67,1	20,2	9,4
		Silte	g kg^{-1}	2,5	22,1	43,6	8,5	18,9	27,0	8,1	3,9
VN	43	COS	g kg^{-1}	0,3	1,5	6,7	1,2	0,9	2,0	1,2	0,5
		D_{AS}	g cm^{-3}	0,8	1,1	1,5	0,2	1,0	1,4	0,4	0,1
		Areia	g kg^{-1}	12,6	38,7	84,9	24,9	17,0	63,2	46,2	11,9
		Argila	g kg^{-1}	10,2	44,1	76,4	20,2	25,9	61,3	35,4	13,4
		Silte	g kg^{-1}	1,3	17,2	49,0	9,9	10,6	23,0	12,4	5,9
Todos	706	COS	g kg^{-1}	0,1	1,1	6,7	0,8	0,5	1,5	1,0	0,4
		D_{AS}	g cm^{-3}	0,7	1,3	2,0	0,3	1,0	1,6	0,5	0,3
		Areia	g kg^{-1}	0,0	51,6	96,9	29,6	22,0	79,7	57,6	28,7
		Argila	g kg^{-1}	0,0	33,5	78,1	22,2	12,5	55,6	43,0	20,2
		Silte	g kg^{-1}	0,0	14,7	58,2	10,3	6,8	21,1	14,3	6,8

CA = cana-de-açúcar; PA = pastagem; AG = agricultura; VN = vegetação nativa; Obs. = número de observações; COS = carbono orgânico do solo; D_{AS} = densidade aparente do solo; D.P. = desvio padrão; Q1 = 1° quartil (25%); Q2 = 2° quartil (75%); IQR = distância entre quartis; MAD = desvio médio absoluto.

3.2.3.2 Elaboração das equações de pedotransferência

Os resultados das RMS realizadas sobre todos os solos existentes na base de dados permitiu o desenvolvimento de uma equação geral e de uma equação para cada tipo de solo, que são apresentadas na Tabela 3.3. A equação desenvolvida com o uso da base de dados completa apresentou boa correlação com os atributos profundidade final da camada de solo (PF), carbono orgânico do solo (COS), areia (S) e argila (C), explicando a variação da D_{AS} em 77%, valor superior ao encontrado por Benites et al. (2007) e Moreira et al. (2009) para solos tropicais. Os referidos atributos são mencionados em diversos trabalhos científicos como interferentes na D_{AS} indicando que os resultados observados são coerentes com a literatura (CARTER, 1990; ROTH, 1997; DÍAZ-ZORITA, 2000; DEXTER, 2004; REYNOLDS et al., 2008).

A correlação com os atributos do solo se manteve elevada quando as RMS foram aplicadas sobre os Latossolos (R^2 ajustado = 0,78), mas não quando foram aplicadas sobre os dados de Neossolos ou Nitossolos, onde a regressão conseguiu explicar respectivamente 14% e 27% da variação encontrada na D_{AS} (Tabela 3.3). Este fato poderia estar atrelado ao maior número de observações dos Latossolos quando comparados aos demais solos. No entanto, existem evidências de que é possível encontrar boas correlações com baixo número de observações, como obtidas por Suuster et al. (2009) para "Solonchaks" (n= 33; R^2 = 0,99).

Por outro lado, a baixa correlação observada com o uso das RMS poderia ser resultado da ausência da informação de uso da terra nesta etapa de avaliação, que mostrou ser significativa ($p<0,0001$) para os dados contidos na base de dados. Portanto, a segregação da referida base em diferentes classes de uso da terra poderia permitir a avaliação de fatores que poderiam afetar a densidade do solo, como por exemplo mudanças nas propriedades físico-químicas dos solos, ou ainda manejos adotados em cada tipo de uso da terra, conforme apontado em diversos estudos (MARTÍNEZ; ZINCK, 2004; KURZ; O'REILLY; TUNNEY, 2006; BRAUNACK; ARVIDSSON; HÅKANSSON, 2006; CARVALHO et al., 2007; SILVA et al., 2009; SIQUEIRA NETO et al., 2010).

Tabela 3.3 - Equações de pedotransferência derivadas por classes de solo

Solo	n	Equação de determinação da D_{AS}	R^2 Adj.	S.E.
Todos	706	1,28-0,001698*PF-0,076566*COS+0,005274*S-0,002711*C	0,77	0,14
Latossolos	464	1,258701-0,002220*PF-0,074691*COS+0,005968*S -0,002466*C	0,78	0,13
Neossolos	176	1,210599+0,004163*S-0,000792*PF+0,003683*COS	0,14	0,10
Nitossolos	66	1,663735-0,007890*C-0,080737*COS	0,27	0,18

n = número de observações; Adj. = ajustado; S.E.: erro padrão da estimativa. S = areia; C = Argila; COS = Carbono orgânico do solo; PF = Profundidade final da amostra, em centímetros (cm).

Desta forma, foi realizada uma segunda estimativa para a elaboração de equações de pedotransferência considerando os diferentes usos da terra e a base de dados foi dividida em áreas cultivadas anualmente (agricultura), áreas que se apresentavam sobre manejo semi-perene (cana-de-açúcar), perene (pastagem) e áreas não cultivadas (vegetação nativa).

Os resultados das regressões indicaram boas correlações com os atributos existentes na base de dados para três dos quatro usos avaliados. Para cana-de-açúcar e vegetação nativa, as equações de pedotransferência resultantes das RMS explicaram a variação da D_{AS} em 75% e 76% respectivamente (Tabela 3.4), valor semelhante ao obtido pela equação geral apresentada na Tabela 3.3.

Para as áreas de pastagem houve um incremento nos valores observados, e a equação explicou até 84% da variação existente na D_{AS} considerando apenas três atributos de solo areia, carbono e profundidade final, resultado considerado satisfatório já que apresentou erro de 12% (Tabela 3.4), semelhante aos erro obtido por Benites et al. (2007) e inferiores aos obtidos por Brahin et al. (2009) cuja melhor estimativa apresentou erro de 15%.

Para o uso agricultura, a regressão não teve o mesmo efeito e explicou apenas 41% da variação da D_{AS} apresentando resultado inferior ao obtido para os demais usos da terra (Figura 3.1). Confrontando as informações de solo e uso da terra (Tabela 3.1), foi possível notar que nos três usos para as quais a RMS apresentaram elevadas correlações, a maior parte dos solos constituintes pertenciam à classe dos Latossolos, enquanto nas áreas de agricultura a proporção foi de 57% de Latossolos e 43% de Nitossolos, cuja estimativa inicial havia demonstrado que as RMS explicaram apenas 27% da variação encontrada na D_{AS} e que poderia estar interferindo no resultado da regressão de maneira negativa.

É importante ressaltar que os mesmos atributos que influíram na D_{AS} na equação geral também se apresentaram interferentes quando as RMS foram aplicadas sobre os usos da terra

avaliados, indicando coerência com resultados observados na literatura (CARTER, 1990; ROTH, 1997; DÍAZ-ZORITA, 2000; DEXTER, 2004; REYNOLDS et al., 2008).

Foi possível notar a formação de dois grupos de D_{AS} quando os dados observados foram confrontados com os dados preditos (Figura 3.1), que podem ser explicados pela variação encontrada na base de dados, principalmente referente à granulometria.

Os dados apresentados na Tabela 3.2 indicam que para os quatro usos da terra avaliados houve variação significativa entre os quartis inicial (Q1) e final (Q2). Considerando o atributo areia, que foi significativo em todas as RMS ($p<0,0001$), a variação entre quartis (IQR) para áreas cultivadas com cana-de-açúcar foi de 58%, para pastagem, 55%, para agricultura, 22% e para áreas de vegetação nativa, 46%. Esta variação indica que em cada uso da terra os tipos de solos existentes apresentam diferentes classes de textura, que por consequência podem resultar em solos com maior ou menor D_{AS}, fato que corrobora com diversos trabalhos científicos (ROTH, 1997; NHANTUMBE; CAMBULO, 2005; KELLER; HÅKANSSON, 2010).

Tabela 3.4 - Equações de pedotransferência derivadas por usos da terra

Uso da terra	n	Equação de determinação da D_{AS}	R^2 Adj.	S.E.
cana-de-açúcar	411	1,120581+0,007036*S -0,002004*PF-0,074956*COS	0,75	0,14
pastagem	205	1,01657 + 0,008094*S - 0,079682*COS-0,001527*PF	0,84	0,12
agricultura	47	0,974889+0,006522*S	0,41	0,16
vegetação nativa	43	0,819057+0,008242*S	0,76	0,11

n = número de observações; Adj. = ajustado; S.E.: erro padrão da estimativa. S = areia; C = Argila; COS = Carbono orgânico do solo; PF = Profundidade final da amostra, em centímetros (cm).

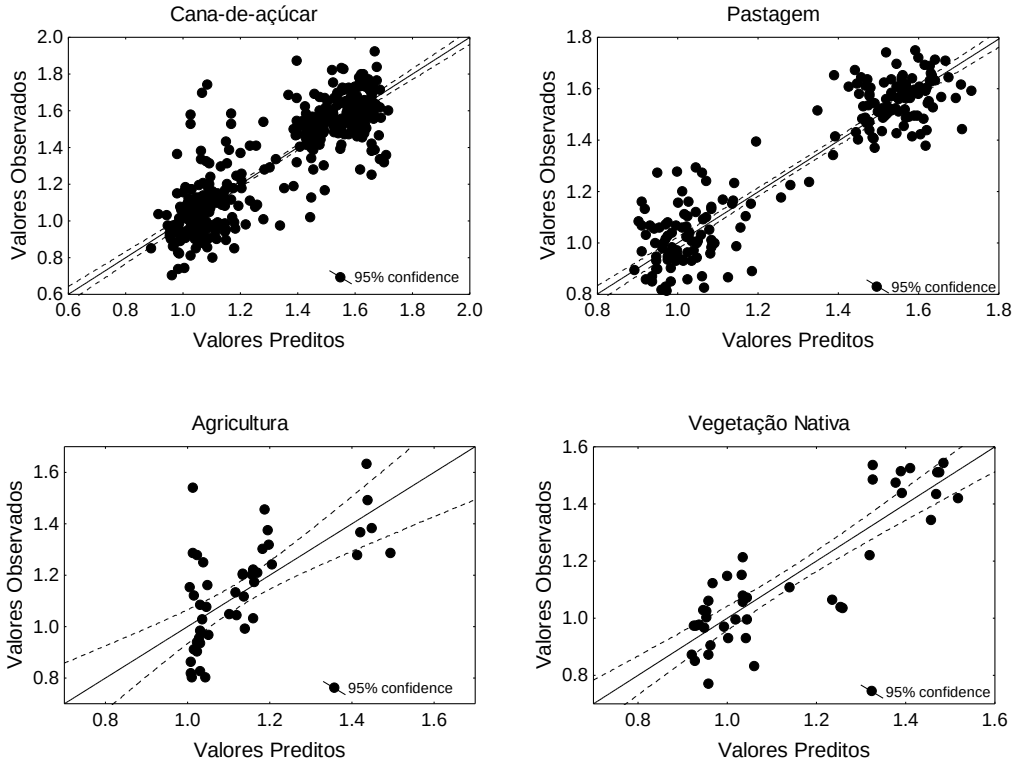


Figura 3.1 - Valores observados e preditos de densidade de solo obtidos por meio de RMS para diferentes usos da terra

Adicionalmente, foi possível determinar o erro embutido na equação gerada por meio das RMS. A Figura 3.2 apresenta a curva normal resultante do erro padrão das estimativas de D_{AS} para cada uso da terra avaliado. Para as áreas de cana-de-açúcar, foi possível observar erros que variaram de -0,30 a +0,50, resultando no erro de até 38% quando considerada a média de 1,3 g dm^{-3} de D_{AS} (Tabela 3.2). No entanto cerca de 77% dos dados apresentaram desvio de ±0,10, correspondendo a 7% de erro embutido.

Para as áreas de pastagem foi observado desvio de -0,30 a +0,40, refletindo no erro máximo de 31%. Da mesma forma que os dados de cana-de-açúcar, cerca de 72% dos dados apresentaram desvio de ±0,10, o que corresponderia aos mesmos 7% de erro embutido na estimativa de D_{AS}. Para áreas de agricultura foram observados desvios de -0,25 a +0,30, o que representaria em erro de 31%, porém 90% das estimativas de D_{AS} apresentaram erro embutido de apenas 12%. Para as áreas de vegetação nativa, o desvio observado foi de -0,25 a +0,30 o que corresponderia ao erro máximo 18%. Estes resultados foram considerados satisfatórios e se apresentaram próximos aos erros de até 15% obtidos por Benites et al. (2007).

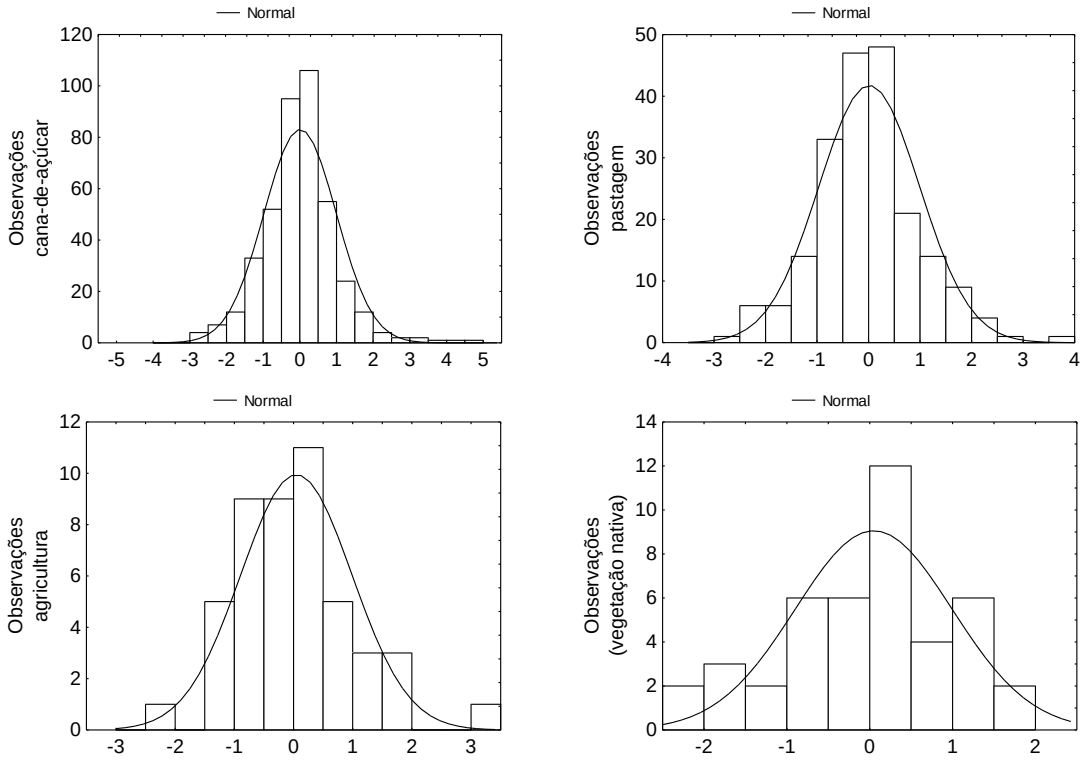


Figura 3.2 - Erro padrão entre dados observados e preditos para D_{AS} sob diferentes usos da terra

Assim, como forma de evidenciar o efeito do uso da terra sobre a D_{AS}, foi realizada uma terceira aplicação das RSM, e para tanto, a base de dados foi dividida por classe de solo e uso da terra. Os resultados são apresentados na Tabela 3.5 e indicaram variação nas respostas obtidas por meio das RMS para os diferentes usos da terra e classes de solo.

Para o uso cana-de-açúcar em áreas de Latossolos, as RMS geraram uma equação que explicou até 78% da variação da D_{AS} (Tabela 3.5, Figura 3.3), superior ao obtido para Nitossolos (R^2 = 0,25) e Neossolos (R^2 = 0,06), que se mantiveram semelhantes aos resultados obtidos pelas estimativas gerais por classe de solo.

Para as áreas de pastagens, foi possível evidenciar a melhora da resposta das RMS quando comparados aos resultados obtidos pela estimativa geral. A segregação da base de dados em diferentes classes de solo permitiu determinar equações específicas para os três solos estudados com eficiência variadas (Tabela 3.5, Figura 3).

Para os Latossolos, as equações de pedotransferência conseguiram explicar até 82% das variações presentes na D_{As}, valor superior aos obtidos por meio das estimativas gerais e por uso da terra observados para áreas de cana-de-açúcar. Houve melhora nas respostas para

Nitossolos, onde as RMS responderam em até 59% da interferência dos atributos existentes na base de dados. Para áreas de Neossolos, os resultados obtidos foram semelhantes aos obtidos pela estimativa geral, e considerados insatisfatórios para determinar com eficiência a D_{AS}.

Assim como observado nas áreas de cana-de-açúcar e de pastagens, as áreas de agricultura apresentaram resposta com elevado grau de correlação para áreas de Latossolos (R^2 = 0,60) e baixa correlação para áreas de Nitossolos (R^2 = 0,25) conforme apresenta a Tabela 3.5 e a Figura 3.3. Estes valores se mantiveram semelhantes aos obtidos pela equação geral, mas conseguiram explicar melhor as variações da D_{AS} para a classe dos Latossolos sob agricultura quando comparados com as equações geradas apenas por uso da terra (Tabela 3.4). O padrão inverso foi observado para as áreas de Nitossolos, cuja equação gerada apresentou eficiência semelhante aquelas obtidas pela estimativa inicial (Tabela 3.3), mas inferiores aos obtidos pela segunda estimativa.

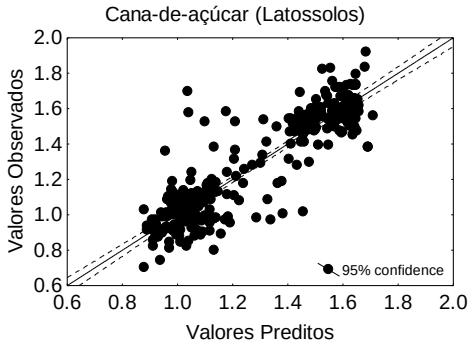
As RMS aplicadas às áreas de vegetação nativa demonstraram boas correlações entre a D_{AS} e os diferentes atributos presentes na base de dados de solos para as três classes de solo avaliadas. De maneira oposta à observada nos demais usos da terra, as equações geradas para os Latossolos apresentaram a menor eficiência (R^2 = 0,66) quando comparadas as equações derivadas para Neossolos (R^2 = 0,76) e Nitossolos (R^2 = 1,00). Neste caso, as melhores respostas obtidas foram acompanhadas do menor número de observações, e a resposta mais eficiente dos modelos gerados poderia ser reflexo de que as amostras utilizadas nas RMS pertençam a uma mesma região de estudo, diminuindo a variabilidade existente na base de dados.

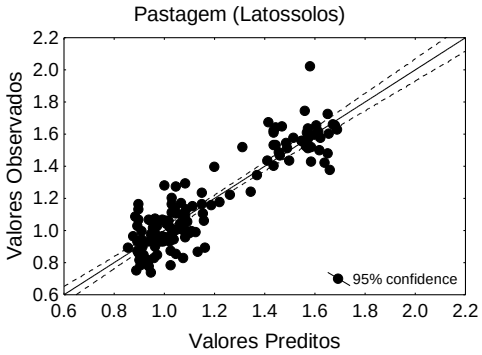
De maneira geral, as RMS aplicadas a base de dados de solos indicaram boas correlações entre os Latossolos e os atributos existentes na base de dados de solos. A segregação da base de dados considerando apenas os usos da terra, apesar de apresentar boas correlações para cana-de-açúcar (R^2 = 0,75), pastagens (R^2 = 0,84) e áreas de vegetação nativa (R^2 = 0,76), indicaram resposta semelhante aquelas observadas por meio das estimativas gerais considerando apenas as classes de solos. Este fato poderia ser um indicativo de que a maior proporção de áreas existentes da classe de Latossolos nos diferentes usos da terra poderiam refletir no elevado grau de correlação obtido pelo uso das RMS confrontando a D_{AS} com os atributos do solo, e poderia ser confirmado avaliando as baixas correlações observadas para áreas de agricultura (R^2 = 0,41) onde os dados representavam amostras de Latossolos (57%) e Nitossolos (43%) e considerando que as equações geradas para a classe dos Nitossolos não se apresentaram tão eficientes como as geradas para os Latossolos.

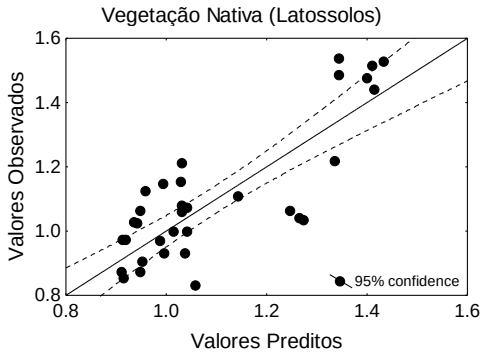
Tabela 3.5 - Equações de pedotransferência derivadas por uso da terra e classes de solo

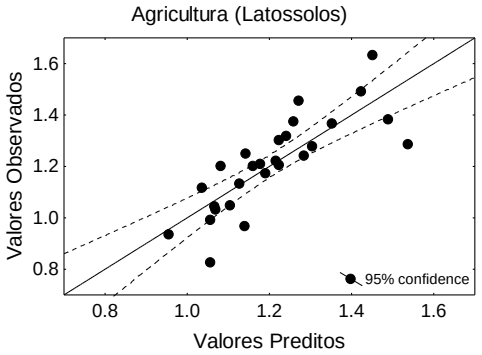
Uso da terra	Solo	n	Equação de determinação da D_{AS}	R^2Adj.	S.E.
Cana-de-açúcar	Latossolos	271	0,914660+0,009094*S-0,001502*PF	0,78	0,14
	Neossolos	104	1,301700+0,003118*S	0,06	0,12
	Nitossolos	36	1,538548-0,007573*C	0,25	0,19
Pastagem	Latossolos	132	1,142073+0,007707*S-0,002712*PF-0,351277*COS	0,82	0,12
	Neossolos	66	1,089579+0,005610*S	0,15	0,08
	Nitossolos	7	0,783066+0,252945*COS	0,59	0,09
Agricultura	Latossolos	27	1,238520-0,002167*C-0,001764*PF+0.004448*S	0,60	0,11
	Nitossolos	20	0,595794-0,005427*PF+0,155998*COS	0,26	0,18
Veg. nativa	Latossolos	34	0,799966+0,008841*S	0,66	0,12
	Neossolos	6	3,774203-0,005347*PF-0,022975*S-0,365432*COS	0,76	0,04
	Nitossolos	3	2,054658-0,292440*COS-0,040950*S	1,00	0,00

n = número de observações; Adj. = ajustado; S.E.: erro padrão da estimativa. S = areia; C = Argila; COS = Carbono orgânico do solo; PF = Profundidade final da amostra, em centímetros (cm).









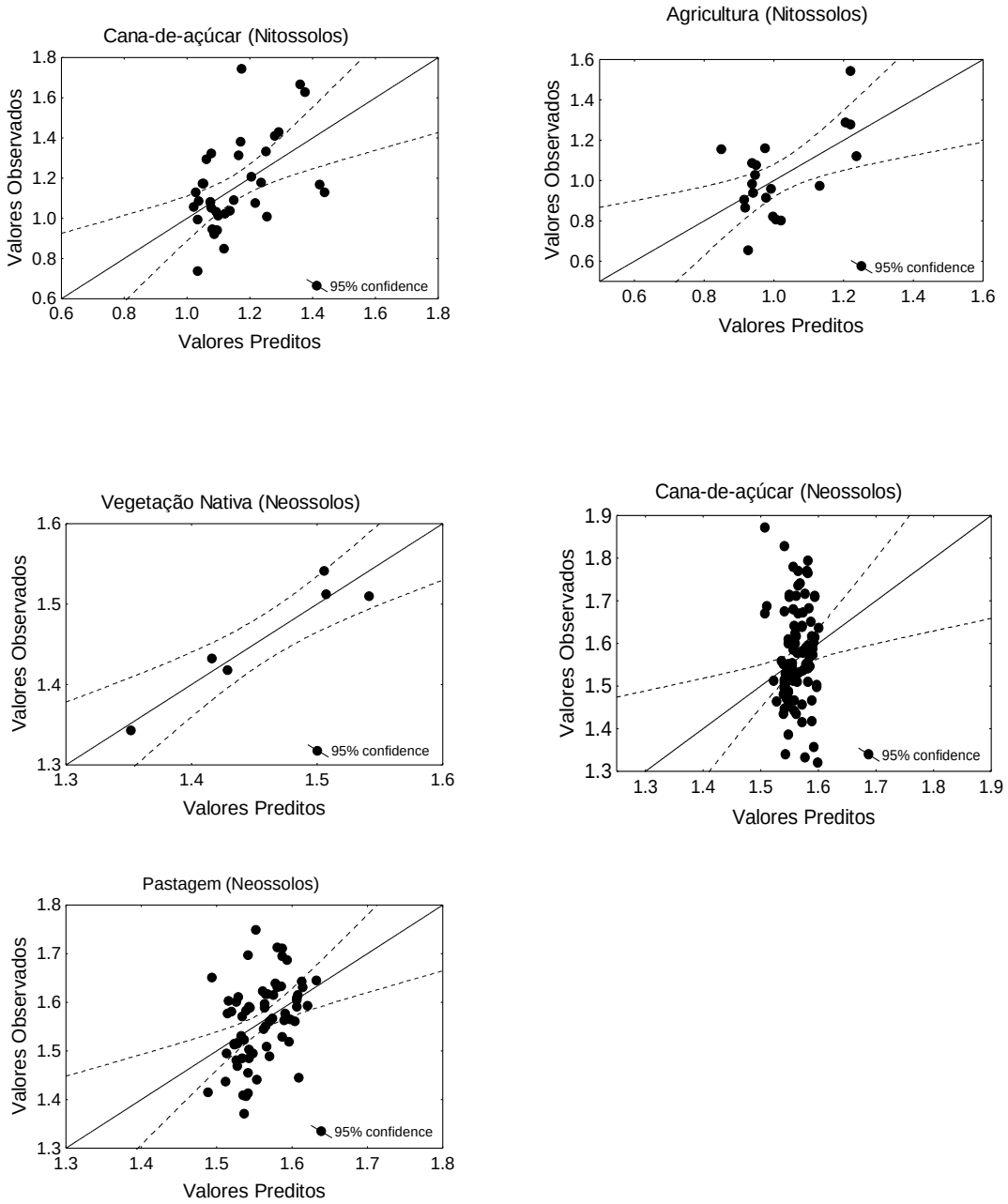


Figura 3.3 - Valores observados e preditos de densidade de solo obtidos por meio de RMS para diferentes usos de da terra sob diferentes classes de solos

Por outro lado, a segregação da base de dados em classes de solos e de usos da terra permitiu identificar padrões diferenciados de resposta. Para todos os usos da terra, houve boa correlação dos atributos existentes na base dados com a D_{AS} para as áreas de Latossolos e a resposta das RMS explicaram de 66% até 84% da variação existente na D_{AS}. Tais resultados mostraram-se satisfatórios uma vez que foram acompanhados de erros de estimativa variando de 11% a 14% (Tabela 3.5, Figura 3.3), semelhantes aos observados por Bernoux et al. (1998a), Benites et al. (2007) e Moreira et al. (2009), onde as bases de dados avaliadas continham grande participação de *Oxisols.*

Para os Neossolos, as correlações observadas pelo uso das RMS sobre os atributos do solo aumentaram a medida em que ocorreu diminuição de intensidade do manejo do solo intrínseco do uso da terra. Desta forma, os dados associados as áreas semi-perenes (cana-de-açúcar) apresentaram equações que responderam apenas a 6% da variação observada na densidade do solo, enquanto 26% puderam ser explicadas nas áreas cultivadas com culturas perenes (pastagem) e 76% nas área não cultivadas, referentes a vegetação nativa, apresentando erros de estimativas variando de 4% a 8% entre os três usos da terra avaliados (Tabela 3.5, Figura 3.3).

O mesmo padrão de comportamento foi observado para a classe dos Nitossolos (Tabela 3.5, Figura 3.3), onde as RMS conseguiram explicar a variação da D_{AS} de maneira menos eficiente em atividades de cultivos anuais (R^2 = 0,25) e semi-perenes (R^2 = 0,26), e de maneira mais eficiente para áreas perenes (R^2 = 0,59) e áreas não cultivadas (R^2 = 1,00).

Estes resultados poderiam ser evidências de que a interferência do manejo do solo intrínseco ao uso da terra poderia influir em aspectos físicos dos solos (e.g. diminuição do volume de macroporos), resultando em maior variabilidade dos dados e resultando na baixa correlação observada por meio das RMS. Neste caso, existem evidências científicas de que a D_{AS} é afetada no cultivo de cana-de-açúcar pelo uso de máquinas agrícolas (BRAUNACK; McGARRY, 2006; BRAUNACK; ARVIDSSON; HÅKANSSON, 2006; SILVA et al., 2009) e nas pastagens devido ao pisoteio dos animais (MARTÍNEZ; ZINCK, 2004; KURZ; O'REILLY; TUNNEY, 2006).

Considerando as três avaliações realizadas é possível enfatizar que os atributos areia, argila, COS e profundidade final foram fatores interferentes na D_{AS}, pois afetam a estrutura física do solo. A presença de areia e argila podem afetar a porosidade, acarretando em maior ou menor aeração do solo, que por sua vez afeta a D_{AS} (CARTER, 1999; REYNOLDS et al., 2002; 2008). Da mesma forma, o teor do COS está relacionado a fração mais fina do solo (argila) e maiores teores de COS são geralmente acompanhados de maior volume de microporosidade que tendem a diminuir a D_{AS}, conforme apontam inúmeros trabalhos científicos (EKWUE, 1990; ARVIDSSON, 1995; DÍAZ-ZORITA; GROSSO, 2000; DEXTER, 2004). O efeito da profundidade do solo sobre a D_{AS} pode ser resultante de características físicas que são modificadas pela presença de raízes, cujo volume diminui com a profundidade (DEXTER, 2003) ou pela diminuição dos teores de COS (BERNOUX et al., 1998b), que podem afetar formação de porosidade e aeração na sub-superfície do solo, e promover a diferenciação entre a D_{AS} das camadas superiores das camadas inferiores, conforme observado por Roth (1997).

3.3 Conclusões

A avaliação abordada por este capítulo permitiu a elaboração de equações de estimativa da D_{AS} por meio da utilização de RMS em diferentes níveis. De maneira geral, foi possível determinar equações que poderão ser utilizadas de maneira eficiente para estimar a D_{AS}, e consequentemente poderá auxiliar na efetuação de cálculos de estoques de carbono dos solos, principal objetivo deste trabalho de pesquisa e que será abordado em capítulo posterior.

De maneira específica, foi possível elaborar equações gerais, considerando apenas as principais classes de solo existentes na base de dados, específicas por uso da terra, considerando as quatro diferentes classes de uso da terra e ainda, a estimativa considerando classes de uso da terra e tipos de solo, de forma que as estimativas contemplassem todos os aspectos que se correlacionavam com a D_{AS}.

É possível indicar que as equações geradas apresentaram resultados satisfatórios e explicaram a variação da D_{AS} nos diferentes usos da terra e em diferentes classes de solo. Neste aspecto é correto afirmar que considerando classes de solos, as estimativas geradas para a classe dos Latossolos apresentaram melhores resultados do que os gerados para as demais classes de solos.

A segregação da base de dados em diferentes usos da terra resultaram em RMS que explicaram de maneira eficiente a variação da D_{AS} para três dos quatro usos avaliados, com eficiência semelhantes aos obtidos pelas regressões gerais. No entanto, a segregação da base de dados em classes de solos e de uso da terra permitiu a avaliação específica dos usos avaliados.

Foi observado que para áreas não cultivadas (sob vegetação nativa) as RMS explicaram a D_{AS} com elevado grau de correlação para todas as classes de solo avaliadas. Para os demais usos houve diferenciação nos resultados encontrados e foi possível observar a melhora das respostas das RMS para Neossolos e Nitossolos à medida que o manejo intrínseco ao uso da terra diminuía de intensidade.

Finalmente, é relevante destacar que o desenvolvimento das equações de pedotransferência foi realizado com atributos de solo que são amplamente encontrados em trabalhos científicos, como dados de granulometria, COS e a profundidade da amostra, o que permite sua utilização por outros grupos de pesquisa.

Referências

ADAMI, M.; RUDORFF, B.F.T.; FREITAS, R.M.; AGUIAR, D.A.; SUGAWARA, L.M.; MELLO, M.P. Remote sensing time series to evaluate direct land use change of recent expanded sugarcane crop in Brazil. **Sustainability**, Basel, v.4, p.574-585, 2012.

ALVAREZ, R.; ALVAREZ, C.R.; LORENZO, G. Carbon dioxide fluxes following tillage from a mollisol in the Argentine Rolling Pampa. **European Journal of Soil Biology**,Montrouge, v. 37, p. 161-166, 2001.

ARVIDSSON, J. Influence of soil texture and organic matter content on bulk density, air content, compression index and crop yield in field and laboratory compression experiments. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.49, n. 1, p.159-170, 1998.

BENITES, V.; MACHADO, P.O.L.A.; FIDALGO, E.C.C.; COELHO, M.R.; MADARI, B.E. Pedotransfer functions for estimating soil bulk density from existing soil survey reports in Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v.139, p. 90-97, 2007.

BERNOUX, M.; ARROUAYS, D.; CERRI, C.C.; VOLKOFF, B.; JOLIVET C. Bulk densities of Brazilian Amazon soils related to other soil properties, **Soil Science of Society of America Journal**, Madison, v. 62, p. 743-749, 1998a.

BERNOUX, M.; ARROUAYS, D.; CERRI, C.C.; BOURENNANE, H. Modeling vertical distribution of carbon in oxisols of the Western Brazilian Amazon (Rondônia). **Soil Science**, New Brunswick, v. 163, n.1, p. 941-951, 1998b.

BLAKE, G.R.; HARTGE, K H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed**.). Methods of soil analysis**. 2.ed. Madison: ASA, 1986. pt.1. p. 364-367. (Agronomy, 9).

BRAHIN, N.; BERNOUX, M.; GALALLI, T. Pedotransfer functions to estimate soil bulk density for Northern Africa: Tunisia case. **Journal of Arid Environments**, London, v.81, p.77-83, 2012.

BRAUNACK, M.V.; McGARRY, D. Traffic control and tillage strategies for harvesting and planting of sugarcane (*Saccharum officinarum*) in Australia. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.89, n. 1, p.86-102, 2006.

CAMARGO, A.O.; MONIZ, DE A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do IAC**. Campinas: Instituto Agronômico, 1986. 94 p. (Boletim Técnico, 106).

CARTER, M.R. Relationship of strength properties to bulk density and macroporosity in cultivated loamy sand to loam soils. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.15, p.257-268, 1990.

CARVALHO, J.L.N.; CERRI, C.C.; FEIGL, B.J.; PÍCCOLO, M.C.; GODINHO, V.P.; HERPIN, U.H.W. Changes of chemical properties in an oxisol after clearing of native Cerrado vegetation for agricultural use in Vilhena, Rondonia State, Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 96, p. 95-102, 2007.

CARVALHO, J.L.N.; CERRI, C.E.P.; FEIGL, B.J.; PÍCCOLO, M.C.; GODINHO, V.P.; CERRI, C.C. Carbon sequestration in agricultural soils in the Cerrado region of the Brazilian Amazon. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 103, p. 342-349, 2009.

CAVALIERI, K.M.V.; SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; LEÃO, T.P.L.; DEXTER, A.R.;HÅKANSSON, I. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a Rhodic Ferrasol in Paraná, Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.101, p.158-164, 2009.

CERRI, C.C.; BERNOUX, M.; MAIA, S.M.F.; CERRI, C.E.P.; COSTA JUNIOR, C.; FEIGL, B.J.; FRAZÃO, L.A.; MELLO, F.F.C.; GALDOS, M.V.; MOREIRA, C.S.; CARVALHO, J.L.N. Greenhouse gas mitigation options in Brazil for land-use change, livestock and agriculture. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 67, p. 102-116, 2010.

CERRI, C.C.; MAIA, S.M.F.; GALDOS, M.V.; CERRI, C.E.P.; FEIGL, B.J.; BERNOUX, M. Brazilian greenhouse gas emissions: the importance of agriculture and livestock. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 66, p. 831-843, 2009.

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

CERRI, C.E.P.; PAUSTIAN, K.; BERNOUX, M.; VICTORIA, R.L.; MELILLO, J.M.; CERRI, C.C. Modeling changes in soil organic matter in Amazon forest to pasture conversion with the Century model. **Global Change Biology**, Oxford, v. 10, p.815-832, 2004.

DEXTER, A.R. Soil physical quality Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, Amsterdam, v.120, p. 201-214, 2004.

DÍAZ-ZORITA, M.; GROSSO, G.A. Effect of soil texture, organic carbon and water retention on the compactability of soils from the Argentinean pampas. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.54, p.121-126, 2000.

ESWARAN, H.; VAN DEN BERG, E.; REICH, P.; KIMBLE, J. Global soil carbon resources. In: LAL R.; KIMBLE J.; LEVINE E.; STEWART B.A. (Ed.). **Soil and global change**. Boca Raton: CRC Press, 1995.p.27-43.

EKWUE, E.I. Organic matter effects on soil strength properties. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.16, p.289-297, 1990.

FAO. **The State of Food and Agriculture - BIOFUELS**: prospects, risks and opportunities. Rome, 2008. 128 p.

FAO. **FAOSTAT**. Rome, 2010. Disponível em: http://faostat.fao.org/Acesso em: 10 jan. 2012.

FARGIONE, J.; HILL, J.; TILMAN, D.; POLASKY, S.; HAWTHORNE, P. Land clearing and the biofuel carbon debt. **Science**, Washington, DC, v.319, p. 1235–1238, 2008.

FEARNSIDE, P.M.; RIGHI, C.A.; GRAÇA, P.M.L.A.; KEIZER, E.W.H.;CERRI, C.C.; NOGUEIRA, E.M.; BARBOSA, R.I. Biomass and greenhouse-gas emissions from land-use change in Brazil s Amazonian arc of deforestation: the states of Mato Grosso and Rondônia. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 258, p. 1968-1978, 2009.

FOLEY, J.A.; RAMANKUTTY, N.; BRAUMAN, K.A.; CASSIDY, E.S.;GERBER, J.S.;JOHNSTON,M.; MUELLER, N.D.; O'CONNELL, C.; RAY, D.K.; WEST, P.C.; BALZER, C.; BENNETT, E.M.; CARPENTER, S.R.; HILL, J.; MONFREDA, C.; POLASKY,S.; ROCKSTRÖM, J.; SHEEHAN, J.; SIEBERT, S.;TILMAN, D.; ZAKS, D.P.M. Solutions for a cultivated planet. **Nature**, London, v. 478, p. 337-342, 2011.

FRAZÃO, L.A., PAUSTIAN, K., CERRI, C.E.P., CERRI, C.C. Soil carbon stocks and changes after oil palm introduction in the Brazilian Amazon. **Global Change Biology Bioenergy**, Oxford, 2012. DOI: 10.1111/j.1757-1707.2012.01196.x.

GALFORD, G.; MELLILO, J.M.; KICKLIGHTER, D.; CRONIN, T.; CERRI, C.E.P.; MUSTARD, J.;CERRI, C.C. Greenhouse gas emissions from alternative futures of deforestation and agricultural management in the southern Amazon. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA**, Washington, DC, v. 107, p. 19649-19654, 2010.

GARCIA-MONTIEL, D.D.; MELILLO, J.M.; STEUDLER, P.A.; TIAN, H.; NEILL, C.; KICKLIGHTER, D.W.; FEIGL, B.J.; PICCOLO, M.C.; CERRI, C.C. Emissions of N2O and CO2 from Terra Firme forests in Rondônia, Brazil. **Ecological Applications**, Washington, DC, v. 14, p. 214-220, 2004.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.** Hayama, Kanagawa, Japan: Institute for Global Environment Strategies, 2006. v. 4: Agriculture, forestry and other land use.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Good practice guidance for land use, land-use change and forestry.** Hayama, Kanagawa, Japan: Institute for Global Environment Strategies, 2003. 623p.

KELLER, T.; HÅKANSSON, I. Estimation of reference bulk density from soil particle size distribution and soil organic matter content. **Geoderma**, Amsterdam, v.154, p. 398-406, 2010.

KURZ, I.; O'REILLY, C.D.; TUNNEY, H. Impact of cattle on soil physical properties and nutrient concentrations in overland flow from pasture in Ireland. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v.113,n. 1–4, p. 378–390, 2006.

LAL, R. Global potential of soil carbon sequestration to mitigate the greenhouse effect. **Critical Reviews in Plant Sciences**, Boca Raton, v. 22, p. 151-184, 2003.

LAPOLA, D.M.; SCHALDACH, R.; ALCAMO, J.; BONDEAU, A.; KOCH, J.; KOELKING, C.; PRIESS, J.A. Indirect land-use changes can overcome carbon savings from biofuels in Brazil. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA**, Washington, DC, v. 107, p. 3388-3393, 2010.

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

MANZATTO, C.V.; ASSAD, E.D.; BACCA, J.F.M.; ZARONE, M.J.; PEREIRA, S.E.M. **Zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar**. Expandir a produção, preservar a vida, garantir o futuro. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009. 55 p. (Documentos, 110).

MARTÍNEZ, L.J.; ZINCK, J.A. Temporal variation of soil compaction and deterioration of soil quality in pasture areas of Colombian Amazonia. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.75, n. 1, p.3-18, 2004.

MORAES, J.F.L.; CERRI, C.C.; MELILLO, J.M.; KICKLIGHTER, D.; NEILL, C.; SKOLE, D.; STEUDLER, P.A. Soil carbon stocks of the Brazilian Amazon basin. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 59, p. 244-247, 1995.

MOREIRA, C.S.; BRUNET, D.; VERNEYRE, L.; SA, S.; GALDOS, M.V.; CERRI, C.C.; BERNOUX, M. Near infrared spectroscopy for soil bulk density assessment. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 60, p. 785-791, 2009.

NHANTUMBO, A.; CAMBULE, A. Bulk density by Proctor test as a function of texture for agricultural soils in Maputo province of Mozambique. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.87, p.231-239, 2006.

NELSON, D.W.; SOMMERS, L.E. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: SPARKS, D.L.; PAGA, A.L.; HELMKE, P.A.; LOEPPERT, R.H.; SOLTANPOUR, P.N.; TABATABAI, M.A.; JOHNSTON, C.T.; SUMMER, M.E. (Ed.).**Methods of soil analysis: Chemical methods**. Part 3. Madison: SSSA, 1996. p.961-1010.

PACHEPSKY, Y.A.; RAWLS, W.J. Soil structure and pedotransfer functions. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.54, p. 443-451, 2003.

PEDROTTI, A.; PAULETTO, E.A.; CRESTAMA, S.; HOLANDA, F.S.R.; CRUVINEL, P.E.; VAZ, C.M.P. Evaluation of bulk density of Albaqualf soil under different tillage systems using the volumetric ring and computerized tomography methods. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.80, p.115-123, 2005.

REYNOLDS, W.D.; BOWMAN, B.T.; DRURY, C.F.; TAN, C.S.; LU, X. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. **Geoderma**, Amsterdam, v.110, p.131-146, 2002.

REYNOLDS, W.D.; DRURY, C.F.; YANG, X.M.; TAN, C.S. Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions. **Geoderma**, Amsterdam, v.146, p.466-474, 2008.

RIGHI, C.A.; GRAÇA, P.M.L.A.; CERRI, C.C.; FEIGL, B.J.; FEARNSIDE, P.M. Burning efficiency and charcoal formation in a fire after mechanized clearing at Feliz Natal, Mato Grosso. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 258, p. 2535-2546, 2009.

ROTH, C.H. Bulb: density of surface crusts: depth functions and relationships to texture. **Catena**, Amsterdam, v.29, p.223-237, 1997.

RUDORFF, B.F.T.; AGUIAR, D.A.; SILVA, W.F.; SUGAWARA, L.M.; ADAMI, M.; MOREIRA, M.A. Studies on the rapid expansion of sugarcane for ethanol production in São Paulo State (Brazil) Using Landsat Data. **Remote Sensing**, Basel, v. 2, p. 1057-1076, 2010.

SILVA, R.B.; LANÇAS, K.P.; MIRANDA, E.E.V.; SILVA, F.A.M.; BAIO, F.H.R. Estimation and evaluation of dynamic properties as indicators of changes on soil structure in sugarcane fields of Sao Paulo State – Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.103,n. 2, p.265-270, 2009.

STATSOFT. **STATISTICA for Windows**. StatSoft, Tulsa, OK, 1999.

STEUDLER, P.A.; BOWDEN, R.D.; MELILLO, J.M.; ABER, J.D. Influence of nitrogen fertilization on methane uptake in temperate forest soils. **Nature**, London, v.341, p.314-315, 1989.

SIQUEIRA NETO, M.; SCOPEL, E.; CORBEELS, M.; CARDOSO, A.N.; DOUZET, J.M.; FELLER, C.; PICCOLO, M.C.;CERRI, C.C.; BERNOUX, M. Soil carbon stocks under no-tillage mulch-based cropping systems in the Brazilian Cerrado: an on-farm synchronic assessment. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 110, p. 187-195, 2010.

SIQUEIRA NETO, M.; PICCOLO, M.C.; COSTA JUNIOR, C.; CERRI, C.C.; BERNOUX, M. Emissão de gases do efeito estufa em diferentes usos da terra no bioma Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 63-72, 2011.

SUUSTER, E.; RITZ, C.; ROOSTALU, H.; REINTAM, E.; KÕLLI, R.; ASTOVER, A. Soil bulk density pedotransfer functions of the humus horizon in arable soils.**Geoderma**, Amsterdam, v.163, p. 74-82, 2011.

TEIXEIRA, D.D.B.; PANOSSO, A.R.; CERRI, C.E.P.; PEREIRA, G.T.; LA SCALA JUNIOR, N. Soil CO2 emissions estimated by different interpolation techniques. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 345, p.187-194, 2011.

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

4. O IMPACTO DA MUDANÇA DO USO DA TERRA SOBRE OS ESTOQUES DE CARBONO DOS SOLOS CULTIVADOS COM CANA-DE-AÇÚCAR NA REGIÃO CENTRO SUL DO BRASIL

Resumo

O Brasil se destaca como o maior produtor de cana-de-açúcar do planeta. Como resultado do aumento da demanda de açúcar e etanol, cerca de 4 milhões de hectares foram convertidos em áreas de cana-de-açúcar nos últimos 10 anos. Estima-se que outros 6 milhões de hectares serão convertidos nos próximos 10 a 20 anos para suprir a demanda nacional de derivados da cana-de-açúcar. Diversos trabalhos científicos apontam que a dinâmica do processo de mudança do uso da terra pode levar a redução ou ao sequestro de carbono pelos solos. Desta forma, o principal objetivo deste trabalho de pesquisa foi avaliar o impacto causado pela expansão do cultivo da cana-de-açúcar sobre a variação da quantidade de carbono do solo e seu resultado em perda ou em sequestro de carbono. O total de 79 pares amostrais oriundos de 142 situações de campo foram avaliados na região Centro Sul do Brasil, onde a cana-de-açúcar vem substituindo outros usos da terra. Para efetuar a avaliação foram utilizados os resultados analíticos de 6318 amostras de solo coletadas considerando três tipos de conversões existentes para cana-de-açúcar no país: i) Cerrado; ii) Pastagens e iii) Áreas de cultivo anual. Os resultados obtidos indicam o decréscimo dos estoques de carbono dos solos quando o cultivo de cana-de-açúcar ocorre sobre áreas de cerrado ou de pastagens e promove o incremento quando áreas de culturas anuais são substituídas. Os fatores de mudança de uso da terra referente ao período de 20 anos após a conversão de cerrado para cana-de-açúcar para as camadas 0-30 cm, 0-50 cm e 0-100 foram respectivamente 0,79 (±0,04), 0,86 (±0,04) e 0,94 (±0,04). Para a conversão de pastagens para o cultivo de cana-de-açúcar, os fatores de mudança de uso da terra foram 0,91 (±0,04), 0,94 (±0,04) e 0,98 (±0,04), e para a conversão de áreas de cultivo anual os fatores de mudança de uso da terra foram 1,20 (±0,18), 1,20 (±0,18) e 1,21 (±0,18). O período de compensação da dívida de carbono gerada foi estimado entre 3,5 a 6,3 anos considerando a substituição de cerrado, 1 a 2 anos para áreas convertidas de pastagens e zero para áreas oriundas de cultivo anual, onde não foi observada dívida de carbono. Espera-se que os resultados gerados por este trabalho de pesquisa possam subsidiar os tomadores de decisão como forma de desenvolver políticas apropriadas para a expansão do cultivo da cana-de-açúcar na região Centro Sul do Brasil promovendo desenvolvimento com baixo impacto ao meio ambiente.

Palavras-chave: Matéria orgânica do solo. Estoques de carbono. Mudança de uso da terra. Cana-de-açúcar. Solos. Brasil.

THE EFFECT OF LAND USE CHANGE ON SOIL CARBON STOCKS IN SUGARCANE FIELDS IN SOUTH CENTRAL BRAZIL

Abstract

Brazil figures as the major sugarcane producer in the world and as result of increasingly demand for sugar and ethanol about 4 millions of hectares were converted into sugarcane systems on last 10 years and others 6 millions of hectares are expected to be converted in next 10 to 20 years. This modification can increase greenhouse gas emissions as result of soil organic matter decomposition and lead to a carbon debt. The aim of this research paper was to perform the Tier 2 methodology proposed by Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC (2006) to evaluate the impact of sugarcane expansion over the soil organic matter, and their results in CO_2 emissions or soil carbon sequestration. A total of 79 comparison pairs, resulted from 142 field situations observed were studied in South Central Brazil where sugarcane substituted other land uses. To perform IPCC's methodology were used 6,318 soil samples that were analyzed considering three major conversions to sugarcane: i) Cerrado (Brazilian savannah); ii) Pastures; iii) Annual Cropland (maize or soybean). Our results indicate the decrease of soil carbon stocks when sugarcane overcomes cerrado and pastures, and an increase when annual cropland is replaced. The Land Use Change (LUC) factors after 20 years of conversion from cerrado to sugarcane for 0-30 cm, 0-50 cm and 0-100 cm layers were respectively 0.79 (±0.04), 0.86 (±0.04) and 0.94 (±0.04). For sugarcane replacing pastures the LUC factors were 0.91 (±0.04), 0.94 (±0.04) and 0.98 (±0.04), and for the conversion from annual agriculture the LUC factors were 1.20 (±0.18), 1.20 (±0.18) and 1.21 (±0.18). The repay time for the carbon debt was estimated in 3.5 to 6.3 years considering the substitution from cerrado, 1 to 2 years for areas coming from pastures and zero for areas coming from cropland, where no carbon debt was found. We expect that results from this research paper could subsidize decision makers to generate appropriate policies for sugarcane expansion in South Central Brazil, promoting development with a lower environmental impact.

Keywords: Soil organic matter. Carbon stocks. Land use change. Sugarcane. Soils. Brazil.

4.1 Introdução

O desenvolvimento econômico mundial tem sido acompanhado pelo aumento da demanda energética por parte de diferentes setores da sociedade (BRASIL, 2011). O atual paradigma de desenvolvimento preconiza o crescimento econômico com o mínimo impacto ao meio ambiente (FOLEY et al., 2011), fato que desencadeou a busca por novas fontes de energia que sejam alternativas aos combustíveis fósseis.

As culturas energéticas têm se expandido de forma significativa no Brasil. Entre os anos 2000 e 2011 cerca de quatro milhões de hectares de cana-de-açúcar foram incorporados ao atual sistema de produção, totalizando nove milhões de ha cultivados em 2012 (ADAMI et al., 2012; FAOSTAT, 2012). Esta expansão transformou a cana-de-açúcar na principal fonte de energia renovável do país, responsável por 19 % do total fornecido em 2010, superior aos 14 % provindos das usinas hidroelétricas (BRASIL, 2011).

O aspecto que torna a cana-de-açúcar uma cultura importante sob o ponto de vista energético é o balanço positivo que existe ao longo de sua cadeia de produção. Para cada unidade de energia fóssil aplicada em sua cadeia, entre seis e oito unidades de energia renovável são geradas (MACEDO et al., 2008; GALDOS et al., 2010). Este ganho energético é cerca de quatro vezes superior ao produzido pela cadeia de etanol de milho nos EUA e duas a três vezes maior que a proporção de energia gerada pelo biodiesel de soja no Brasil, que apresentam relações energéticas de 2:1 e 3:1, respectivamente (FAO, 2008).

Com relação ao balanço das emissões de gases do efeito estufa (GEE) a cana-de-açúcar demonstra reduções de até 80% quando comparada aos combustíveis fósseis (SOARES et al., 2009). Estima-se que a emissão de 232 Mg CO_2 tenham sido evitadas no Brasil entre 2005 e 2009 devido ao consumo de energia oriunda da cana-de-açúcar, tanto na forma de etanol como na forma de energia elétrica, produzida pelas usinas durante o processo de co-geração e destinada ao mercado doméstico brasileiro (CERRI et al., 2010).

Diversos fatores podem interferir no balanço de emissões de GEE na produção da cana-de-açúcar. Entretanto, a mudança do uso da terra (em inglês “Land Use Change”, ou LUC) tem se destacado, e vem sendo intensamente debatida nos principais meios científicos (FARGIONE et al., 2008; GIBBS et al., 2008; FAO, 2008; LAPOLA et al., 2010; LANGE, 2011; WALTER et al., 2011).

No Brasil, cerca de dois terços das emissões totais de GEE são originados pelo desmatamento e mudança do uso da terra (BRASIL 2004; CERRI et al., 2009). Os processos de derrubada e queima da vegetação nativa visando a implantação de sistemas agrícolas ou

pastoris ocasionam a liberação de GEE para a atmosfera, principalmente nas formas de CO_2, CH_4 e N_2O (FEARNSIDE et al., 2009; RIGHI et al., 2009; MAIA et al., 2009). Inversamente, a utilização de práticas conservacionistas que acarretam no acúmulo de matéria orgânica nos solos (MOS) dos agrossistemas pode ocasionar, ao longo do tempo, o incremento dos estoques de carbono dos solos (SIX et al., 2004; MAIA et al., 2010).

Ao se incorporar as emissões derivadas diretamente do LUC no balanço de emissões do sistema de produção da cana-de-açúcar, esta pode passar de um agente mitigador para um agente emissor de GEE (FARGIONE et al., 2008, GIBBS et al., 2008). Fargione et al. (2008) denominaram como “dívida de carbono” a diferença existente entre as emissões decorrentes do processo de LUC, necessárias para implantação de culturas energéticas, com as mitigações de GEE proporcionadas pelos usos dos biocombustíveis com relação aos combustíveis fósseis.

Por outro lado, a substituição de áreas com baixo estoques de carbono ou em processo de degradação poderiam ser destinadas ao cultivo de espécies energéticas, resultando num período curto de pagamento da dívida de carbono ou mesmo nulo. Este fato poderia ser desencadeado adotando práticas de manejo adequadas, promovendo a manutenção da matéria orgânica do solo resultantes do aporte de fitomassa aérea e subterrânea que poderiam resultar no incremento dos estoques de carbono dos solos e enaltecendo o papel de agente mitigador do agrossistema cana-de-açúcar (LAL, 2003; TILMAN; HILL; LEHMAN, 2006; MAIA et al., 2009; LANGE, 2011; BORDONAL et al., 2012).

A produção de cana-de-açúcar esta mais concentrada na região Centro Sul do país, responsável por cerca de 90% da produção em 2011. O estado que mais se destaca na referida região é São Paulo, representando cerca de 60% do total de cana-de-açúcar produzido (UNICA, 2012). Por ser o estado que apresenta maior produção, São Paulo também é o maior centro de expansão do cultivo de cana-de-açúcar por se apresentar próximo do polo consumidor e possuir logística de produção apropriada.

De acordo com o projeto CANASAT, desenvolvido pelo "Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE", 58% dos 3 milhões de hectares de expansão entre 2005 e 2009 ocorreram em São Paulo (SP); 12,6% em Minas Gerais (MG); 10,8% em Goiás (GO); 9,5% no Paraná (PR); 5,6% no Mato Grosso do Sul (MS) e 3,5% no Mato Grosso (MT).

Com relação aos usos da terra que foram substituídos pelo cultivo da cana-de-açúcar, de acordo com a "Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB", 95% da expansão ocorreram sobre áreas de pastagens (67%), culturas anuais (23%) e áreas de citros (5%) durante a safra 2007/2008. A expansão de cana-de-açúcar sobre áreas de vegetação nativa

ocorreram nos estados de MT, MS e MG, porém representaram apenas 1,5% do total expandido entre 2007/2008 (NASSAR et al., 2008; CONAB, 2009).

Previsões para 2018 indicam que o montante de 6 milhões de hectares serão convertidos para atender as demandas de etanol e eletricidade (BRASIL, 2008) e cerca de metade desta expansão ocorrerá no estado de São Paulo. A cana-de-açúcar vem ocupando áreas oriundas de pastagens (70%) e de culturas anuais (25%), incluindo áreas dedicadas ao cultivo de grãos. (NASSAR et al., 2008; RUDORFF et al., 2010; ADAMI et al., 2012).

Desta forma, o presente capítulo teve por principal objetivo investigar as modificações nos estoques de carbono dos solos resultantes da mudança de uso da terra para o cultivo de cana-de-açúcar na região Centro Sul do Brasil. Para proceder a referida avaliação, 142 áreas de estudo foram selecionadas, resultando na formação de 79 pares amostrais e 6318 amostras de solo considerando três tipos de conversão existentes para o cultivo de cana-de-açúcar: i) vegetação nativa; ii) culturas anuais e iii) pastagens.

4.2 Desenvolvimento

4.2.1 Material e Métodos

Para se atingir aos objetivos propostos por este capítulo foi adotada a metodologia para elaboração de inventários de emissão de GEE proposta pelo "Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas - IPCC" das Nações Unidas denominado "*2006 Guidelines for National Greenhouse gas Inventories*".

A adoção pela referida norma ocorreu por se tratar de uma metodologia consolidada e amplamente utilizada em trabalhos científicos. As etapas necessárias para elaboração de uma base de dados visando determinar a mudança de estoques de carbono dos solos decorrentes da expansão do cultivo da cana-de-açúcar foram abordadas de maneira mais ampla no capítulo 1. No entanto alguns tópicos serão retomados para facilitar a compreensão da execução deste trabalho de pesquisa.

4.2.1.1 Adoção da metodologia do IPCC para avaliação da mudança de estoques de C do solo decorrente da mudança de uso da terra

A referida metodologia considera a mudança de estoques de carbono em diferentes compartimentos do ambiente terrestre, como fitomassa (aérea e radicular), liteira e matéria orgânica do solo. Existem três diferentes níveis para proceder às estimativas de mudança de estoques de carbono, denominados "*Tiers*". O *Tier1* pode ser executado utilizando valores referência apresentados pela própria metodologia.

A execução do *Tier2* requer o uso de informações específicas para o sistema avaliado ao passo que o *Tier 3* implica no uso de modelos matemáticos associado a longos períodos de avaliação, com medições ou monitoramento. Conforme mencionado, este capítulo consistiu na execução do *Tier 2* para estimar a quantidade de carbono removida ou incorporada nos solos da região Centro Sul do Brasil decorrentes da expansão do cultivo da cana-de-açúcar.

4.2.1.2 Seleção das áreas de estudo e formação de pares amostrais

Para a seleção das áreas de estudo e consequente formação de pares amostrais foram realizadas entrevistas com profissionais do setor sucroenergético. A seleção de áreas de estudo foi embasada na presença de duas informações necessárias para a execução deste trabalho de pesquisa: i) existência do histórico de mudança de uso da terra e ii) existência de áreas referência (pastagens, culturas anuais ou vegetação nativa) com condições geomorfológicas similares as áreas cultivadas com cana-de-açúcar como topogafia, tipo e textura do solo dentre outras.

Como resultado, 142 áreas de estudo foram selecionadas (Apêndice A) sendo 79 áreas cultivadas com cana-de-açúcar, 48 com pastagens, 10 com cultivo anual e 5 sob vegetação nativa, que neste caso foram áreas de Cerrado. É importante enfatizar que a área total coberta pelos centros de produção de açúcar e etanol considerados somavam aproximadamente 335.000 hectares cultivados com cana-de-açúcar, área que representa cerca de 4% da produção nacional.

4.2.1.3 Amostragem de solo

A amostragem de solo consistiu na coleta de nove trincheiras distribuídas por um delineamento amostral de 3x3 distribuída em cada área de estudo contemplando a distância de 100 m por 100 m, totalizando 1 hectare. Em seis trincheiras, amostras de solos foram coletadas considerando as camadas 0-10 cm, 10-20 cm e 20-30 cm. Nas outras três trincheiras, a amostragem consistiu na coleta de solos nas camadas 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 40-50 cm, 70-80 cm e 90-100 cm.

De forma a evitar uma possível diferenciação entre estoques de carbono nas áreas cultivadas com cana-de-açúcar em função do posicionamento da cultura, as trincheiras destinadas à amostragem de solos até a profundidade de 100 cm contemplaram a coleta de solos e densidade nas linhas e entre-linhas de cultivo.

Esta abordagem foi realizada em 67 das 79 áreas amostradas com cana-de-açúcar totalizando 54 amostras de solo por área coletada (ao invés de 36) que foram utilizadas para determinar os estoques de carbono dos solos. O total de 6318 amostras foram coletadas e utilizadas para determinar o impacto da expansão da cana-de-açúcar na região Centro Sul do Brasil no estoque de carbono dos solos.

4.2.1.4 Determinação dos teores de carbono dos solos

As amostras de solo foram secas ao ar, destorroadas, passadas em peneiras de 2 mm e posteriormente moídas e peneiradas em malhas de 100 mesh para determinação dos teores de carbono. O carbono total foi determinado pelo método de combustão a seco (NELSON; SOMMERS, 1996), utilizando o analisador LECO® CN-2000 (forno abastecido com puro oxigênio e temperatura de 1350° C).

Este método determina o carbono total do solo que é composto por material orgânico e inorgânico. Nos solos brasileiros, a maior parte do carbono inorgânico é pequena, desta forma, o carbono total determinado é composto basicamente por carbono orgânico. Esta metodologia de determinação dos teores de carbono dos solos é reconhecida internacionalmente e foi utilizada em inúmeros trabalhos científicos (CARVALHO et al., 2009; MAIA et al., 2009; 2010; SIQUEIRA NETO et al., 2010; FRAZÃO et al., 2012).

4.2.1.5 Taxa de decaimento de carbono dos solos

De forma que fosse possível determinar os estoques de carbono dos solos até a profundidade de 100 cm, foi necessário estimar o teor de carbono nas camadas faltantes até 100 cm de profundidade (30-40 cm, 50-60 cm, 60-70 cm e 80-90 cm). Depois de efetuado o cálculo das médias dos teores de carbono obtido nas trincheiras amostradas para cada área de estudo foi realizada uma regressão para determinar a taxa de decaimento do teor de carbono dos solos para as camadas faltantes. A precisão destas regressões foi medida pelo R^2 da equação e são apresentadas nos Apêndices B e C.

4.2.1.6 Determinação da densidade do solo por meio de equações de pedotransferência

A base de solos apresentava informações de granulometria para uma trincheira por área, além do teor de carbono e densidade do solo. Foram aplicadas regressões múltiplas do tipo "stepwise" de forma que fosse possível utilizar outros atributos presentes na base de dados para determinar a densidade do solo, metodologia adotada com eficiência por inúmeros autores para solos tropicais (BERNOUX et al., 1998; BENITES et al., 2007). O resultado desta regressão é uma equação denominada "equação de pedotransferência" que pode ser utilizada para estimar a D_{AS} utilizando outros atributos. Para o desenvolvimento deste capítulo foram adotadas as equações elaboradas por uso da terra. São apresentadas a seguir as equações utilizadas para estimativa de densidade do solo para áreas de cana-de-açúcar (eq. 1); pastagens (eq. 2); culturas anuais (eq. 3) e vegetação nativa (eq. 4).

$$1{,}120581+0{,}007036 \times S - 0{,}002004 \times PF - 0{,}074956 \times COS \quad (1)$$

$$1{,}016570 + 0{,}008094 \times S - 0{,}079682 \times COS - 0{,}001527 \times PF \quad (2)$$

$$0{,}974889+0{,}006522 \times S \quad (3)$$

$$0{,}819057+0{,}008242 \times S \quad (4)$$

Onde: S = teor de areia (g kg^{-1}); COS = teor de carbono orgânico do solo (%) e PF = profundidade final (cm).

4.2.1.7 Determinação dos estoques de carbono dos solos

Diversos estudos que tratam sobre a dinâmica da matéria orgânica dos solos apresentam resultados como teor de COS e não na forma de estoques. A avaliação por estoques é mais útil, pois permite a comparação entre áreas e avaliar ganho ou perda líquida de carbono nos solos ao longo do tempo.

O cálculo do estoque de carbono foi determinado em Mg ha^{-1} efetuado a multiplicação do teor de COS (%) pela densidade do solo (g cm^{-3}) e profundidade da camada (m). É importante enfatizar que os estoques de carbono foram determinados para todas as camadas, incluindo as camadas faltantes que puderam ter seus estoques determinados com a utilização do teor de carbono obtido pela regressão de determinação da taxa de decaimento do carbono do solo e da densidade obtida por meio da utilização das equações de pedotransferência.

4.2.1.8 Correção dos estoques de carbono por massa equivalente

Considerando que os estoques de carbono dos solos são determinados utilizando a informação densidade do solo e esta é suscetível a fatores como tráfego de veículos no campo, (BRAUNACK; McGARRY, 2006; SILVA et al., 2009) e pisoteio de animais (MARTÍNEZ; ZINCK, 2004; KURZ; O'REILLY; TUNNEY, 2006), foi necessário realizar a correção dos estoques considerando a massa equivalente de solo (ELLERT; BETTANY, 1996; MORAES et al., 1996). Desta forma, cada área cultivada com cana-de-açúcar pode ser comparada de acordo com a referência específica.

4.2.1.9 Geração de fatores de mudança de uso da terra

Para obter os fatores de mudança de uso da terra (F_{MUT}), a base de informações contendo os estoques de carbono para cada camada de solo foi analisada utilizando um modelo de regressão de efeitos aleatórios mistos (MAIA et al., 2009). A variável resposta é a razão entre os estoques de carbono dos solos das áreas de cana-de-açúcar (Mg ha^{-1}) sobre as áreas de referência.

Efeitos fixos foram utilizados para avaliar o efeito dos tipos de solo, profundidade e período após a mudança de uso da terra sobre os estoques de carbono dos solos. O tipo de solo foi considerado como indicador variável, que podem ser denominados "*dummy variables*".

O método adotado incluiu as recomendações do IPCC (2006) para classificação de textura do solo e a base de dados foi dividida em duas classes: i) solos arenosos, contendo teores ≥70% de areia e <8% de argila e ii) solos argilosos, que foram todas as amostras não inclusas na primeira classe.

As variáveis aleatórias foram utilizadas para avaliar efeitos de múltiplas medições quando considerada uma mesma área de estudo. Neste caso foram consideradas variáveis aleatórias os estados brasileiros, municípios e as fazendas onde se encontravam as áreas amostradas. Este procedimento parte do pressuposto de que o local de estudo é uma variável comum a todas as observações existentes em uma mesma fazenda, mesmo considerando diferentes profundidades e idades pós mudança de uso da terra.

Esta avaliação permite observar correlações existentes entre áreas que se situam em uma mesma propriedade diferenciando-as das demais. Da mesma forma, estados e municípios também foram considerados como variáveis aleatórias, para que as áreas pertencentes a um mesmo município ou estado pudesse ser avaliada de maneira independente (OGLE et al., 2005; MAIA et al., 2009, 2010).

Para que fosse possível utilizar os dados por camada de solo, foram adotados procedimentos descritos por Ogle et al. (2004) onde são formados dois regressores (X1 e X2) referentes a camada superior e inferior da camada de solo baseados em uma função quadrática, considerando que o impacto sobre o COS diminui de acordo com a profundidade do solo. Assim, a proporção de estoque de carbono de uma camada de solo é resultante de uma integral formada a partir da camada superior e inferior obtida através da função quadrática dividida pela espessura da camada avaliada. A função quadrática foi integrada utilizando as equações a seguir:

$$X1 = \frac{(L^2 - U^2)}{2 \times (L - U)} \qquad (5)$$

$$X2 = \frac{(L^3 - U^3)}{3 \times (L - U)} \qquad (6)$$

onde: L (cm) representa a espessura da camada inferior e U (cm) a camada superior. Este método permite a incorporação de áreas coletadas com camadas variáveis sem perder informações como a agregação ou interpolação de uma profundidade padrão

Os F_{MUT} foram derivados de maneira consistente com a metodologia do IPCC (2006) e para tanto, os resultados finais foram ajustados para a camada 0-30 cm de profundidade considerando um período de 20 anos após a mudança de uso da terra. Entretanto, como forma de obter informação mais concisas, os fatores foram derivados para as camadas 0-50 cm e 0-100 cm, considerando período de tempo equivalentes a 5, 10, 15 e 20 anos.

Estes intervalos de tempo foram adotados considerando as etapas de reforma que o agrossistema cana-de-açúcar passa a cada período de cinco anos, quando os solos são preparados, fertilizantes incorporados e novas gemas são plantadas (MACEDO; LEAL; AZEVEDO, 2004). A incerteza associada aos resultados gerados é indicada pelo desvio padrão apresentado pelos F_{MUT}, que podem ser utilizados para elaboração de funções de probabilidade para inventários de emissão de GEE (OGLE et al., 2003). Para desenvolvimento destas etapas foi utilizado o software SPLUS 8.0 (Insightful Corporation, Seattle, WA).

4.2.1.10 Período de compensação da dívida de carbono decorrente da mudança de uso da terra

A média dos estoques de carbono dos solos foi obtida para áreas de pastagens, cultivos anuais e de vegetação nativa, os valores observados para cada área de estudo. Os F_{MUT} elaborados por este trabalho de pesquisa foram aplicados para os diferentes usos da terra considerando as camadas 0-30 cm, 0-50 cm e 0-100 cm. Os resultados foram obtidos em Mg CO_2 ha^{-1}, e quando negativos, indicaram a diminuição dos estoques de carbono dos solos e portanto emissão de CO_2, enquanto o resultado positivo indicou sequestro de carbono pelos solos. Para determinar o período de compensação da dívida de carbono, foi adotado o *offset* do etanol de 9,8 Mg CO_2 ha^{-1} ano^{-1} (FARGIONE et al., 2008). O período de compensação foi obtido pela razão entre a dívida de carbono e o offset do etanol, expresso em anos.

4.2.2 Resultados

Os resultados apresentados por este capítulo incluem 79 pares amostrais (CP) distribuídos ao longo de 13 municípios distribuídos pela região Centro Sul do Brasil. A maior parte dos CP's representam áreas onde a cana-de-açúcar substituiu áreas de pastagens (60 CP's), seguidas de áreas oriundas de cultivo anual (14 CP's) e vegetação nativa (5 CP's). Os estoques de carbono obtidos em cada área avaliada para as camadas 0-30 cm, 0-50 cm e 0-100 cm são apresentados no Apêndice D. A média dos estoques de carbono dos solos utilizados como referência, a estimativa da dívida ou sequestro de carbono e o período de compensação são apresentados na Tabela 4.1.

Os F_{MUT} obtidos para conversão do cerrado para cana-de-açúcar foram de 0,79 (±0,04), 0,86 (±0,04) e 0,94 (±0,04) para as camadas 0-30 cm, 0-50 cm e 0-100 cm respectivamente (Figura 4.1; Apêndice E). Estas modificações representam a dívida de carbono de 62,3 Mg CO_2 ha^{-1}, emitidos das camadas 0-30 e 34,9 Mg CO_2 ha^{-1} oriundos da camada 0-100 cm, quando a cana-de-açúcar substitui áreas de cerrado, considerando as médias dos estoques de carbono das áreas apresentadas no Apêndice D.

Tabela 4.1 - Dívida de carbono, potencial de sequestro de carbono e período de compensação do carbono do solo resultante da mudança de uso da terra no agrossistema cana-de-açúcar na região Centro Sul do Brasil

Uso da terra convertido	**Camada de solo** (cm)	**Estoque de Carbono**[α] (Mg ha^{-1})	**Fator de Impacto** (20 anos)	**Dívida de Carbono** (Mg CO_2 ha^{-1})	**Sequestro de Carbono** (Mg CO_2 ha^{-1})	**Período de Compensação**[β] (anos)
Pastagem	0-30	57,36	0,91	18,89	0,00	1,94
	0-50	82,43	0,94	18,10	0,00	1,87
	0-100	125,93	0,98	9,22	0,00	0,96
Cerrado	0-30	81,01	0,79	62,26	0,00	6,29
	0-50	110,15	0,86	56,44	0,00	5,70
	0-100	158,70	0,94	34,85	0,00	3,49
Culturas	0-30	55,81	1,20	0,00	40,85	0,00
Anuais	0-50	78,74	1,20	0,00	57,63	0,00
	0-100	117,98	1,21	0,00	90,68	0,00

[α]Médias dos estoques de carbono do solo apresentada no Apêndice D
[β]Considerando o *offset* do etanol 9,8 Mg CO_2 ha^{-1} ano^{-1} (FARGIONE et al., 2008).

A razão obtida entre os estoques de carbono observados nas áreas de cana-de-açúcar quando comparadas com as áreas de cerrado indicam a diminuição dos estoques de carbono em todos os cinco casos observados quando se considerou a profundidade 0-30 cm, e em quatro casos quando as camadas observadas foram de 0-50 cm e de 0-100 cm (Figura 4.2).

Para a mudança de uso de pastagem para cana-de-açúcar, os F_{MUT} para as camadas 0-30 cm, 0-50 cm e 0-100 cm foram respectivamente 0,93 (±0,04), 0,96 (±0,04) e 1,00 (±0,04) após o período de 5 anos e 0,91 (±0,04), 0,94 (±0,04) e 0,98 (±0,04) após o período de 20 anos (Figura 4.1; Apêndice E). A dívida de carbono foi estimada em 18,9 Mg CO_2 ha^{-1} considerando a camada 0-30 cm e 9,2 Mg CO_2 ha^{-1} para a camada 0-100 cm após o período de 20 anos, baseando-se nas médias dos estoques de carbono dos solos, levando ao período de 1 a 2 anos para compensação das emissões de GEE oriundas da referida conversão (Tabela 4.1).

A razão obtida entre os estoques de carbono observados nas áreas de cana-de-açúcar quando comparadas com as áreas de pastagens indicam o decréscimo na maior parte das CP's observadas. Este resultado foi observado em 43 das 60 CP's (ou 72%) considerando a camada 0-30 cm, em 40 CP's (ou 67%) para a camada 0-50 cm e em 36 CP's (ou 60%) quando considerada a camada 0-100 cm (Figura 4.2).

A situação oposta foi observada em áreas onde a cana-de-açúcar substituiu o cultivo de culturas anuais. Os F_{MUT} para as camadas 0-30 cm, 0-50 cm e 0-100 cm observados foram respectivamente 1,09 (±0,12), 1,09 (±0,12) e 1,10 (±0,12) após o período de 5 anos de conversão das áreas e 1,20 (±0,18), 1,20 (±0,18) e 1,21 (±0,18) após o período de 20 anos desde que ocorreu a mudança de uso da terra para o cultivo de cana-de-açúcar, indicando sequestro de carbono dos solos (Figura 4.1; Apêndice E).

A razão obtida entre os estoques de carbono observados nas áreas de cana-de-açúcar quando comparadas com as áreas de cultivo anual considerando as profundidades 0-30 cm e 0-50 cm demonstraram que em 8 das 14 CP's (ou 57%) o estoque de carbono dos solos diminuiu quando comparado com as áreas cultivadas anualmente. Considerando a camada 0-100 cm, 50% dos casos observados indicaram mesmo comportamento ao passo que nos outros 50% os estoques de carbono dos solos apresentaram incremento após o processo de mudança de uso da terra (Figura 4.2).

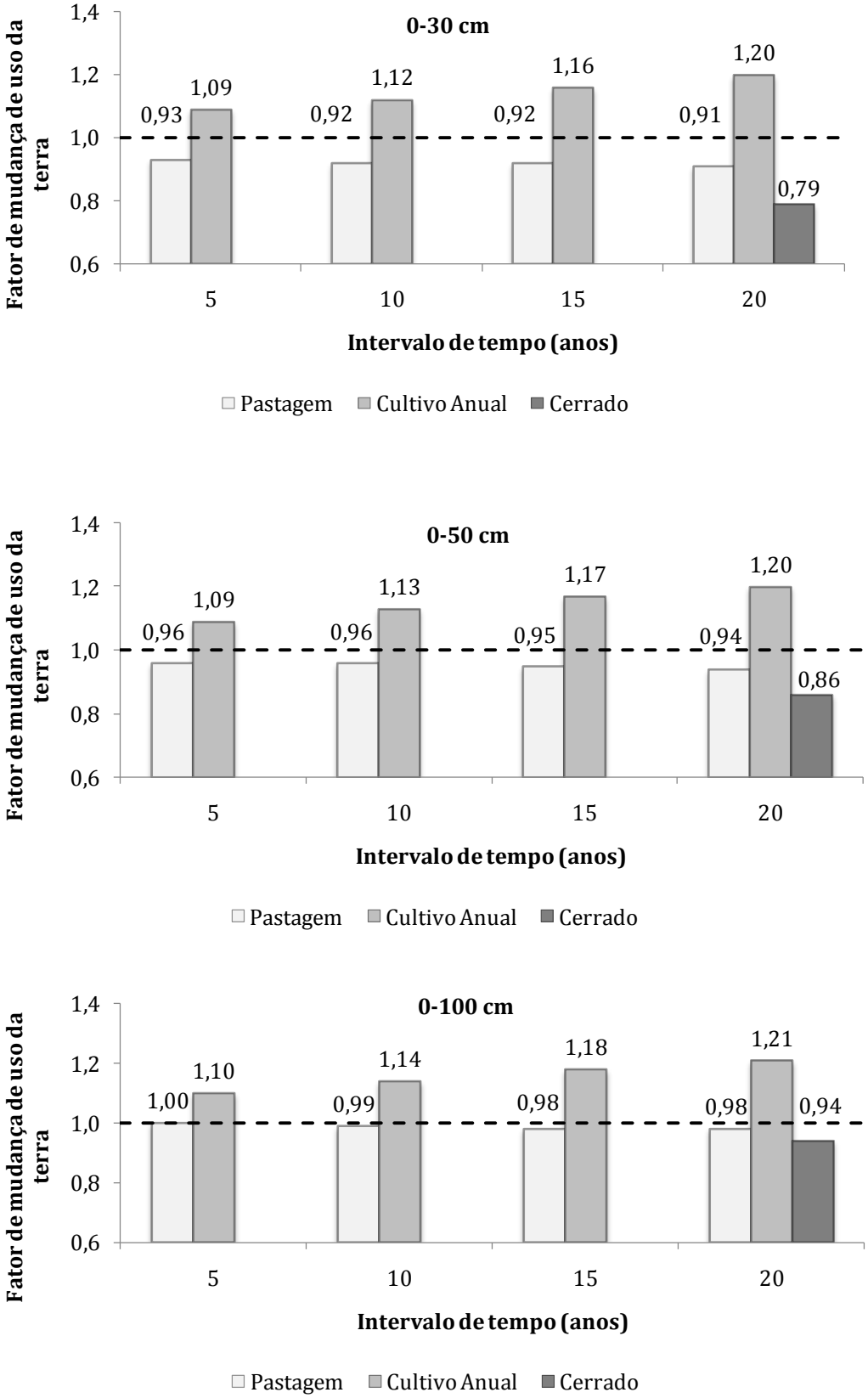


Figura 4.1 - Fatores de mudança de uso da terra para as camadas 0-30 cm, 0-50 cm, 0-100 cm considerando diferentes usos da terra convertidos para cana-de-açúcar

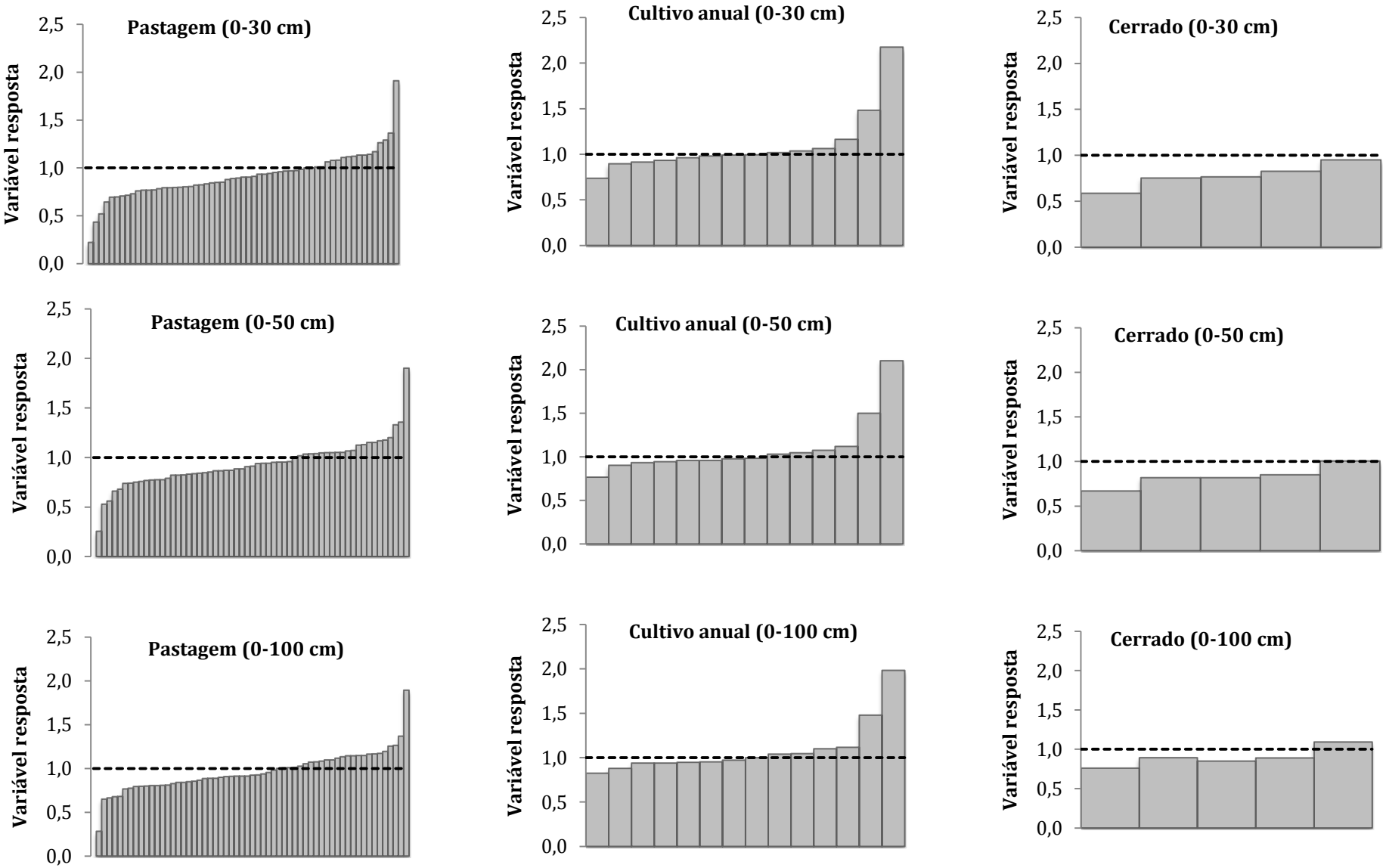


Figura 4.2 - Variável resposta - relação dos estoques de carbono do solo entre as áreas de cana-de-açúcar e áreas referência (observações: pastagem = 60; cultivo anual = 14; cerrado = 5)

4.2.3 Discussão

Historicamente, a mudança de uso da terra decorrente do desmatamento é a maior fonte de emissão de GEE no Brasil (GALFORD et al., 2010) e representaram 52% das emissões no ano de 2005 (CERRI et al., 2009). Neste caso, as emissões de carbono na forma de CO_2 são oriundas da derrubada e queima da vegetação nativa (RIGHI et al., 2009; FEARNSIDE et al., 2009) e da decomposição da matéria orgânica do solo (LAL, 2003) processo que se inicia acentuadamente após a mudança de uso da terra.

A inclusão das referidas emissões no cálculo do balanço de GEE do biocombustível poderia resultar num longo período de compensação (LANGE, 2011) até que o etanol promova a mitigação do GEE quando comparados ao uso dos combustíveis fósseis. Estudos científicos apontam que o período de compensação das emissões oriundas da mudança de uso da terra situa-se entre 0 e 17 anos, variando de acordo com o tipo de área convertida para cultivo de cana-de-açúcar e uso do etanol (FARGIONE et al., 2008; LAPOLA et al., 2010).

Os dados apresentados neste capítulo indicam que a substituição do cerrado por áreas cultivadas com cana-de-açúcar promoveu a diminuição dos estoques de carbono em todas as profundidades avaliadas. Foram observadas diminuições de até 21% dos estoques de carbono dos solos considerando a camada 0-30 cm, o que é compatível com reduções associadas a camadas superficiais, estimada entre 13 e 30% (FARGIONE et al., 2008; GALDOS, 2007).

Quando foram consideradas camadas mais profundas de solo, os estoques de carbono diminuíram em 14% (0-50 cm) e 4% (0-100 cm) inferindo que a diminuição é mais intensa nas camadas superiores (0-30 cm) e as camadas mais profundas podem manter elevada quantidade de matéria orgânica do solo. Tais diminuições são semelhantes às observadas em conversões de floresta para pastagens em regiões da Amazônia brasileira, como apontam Fearnside e Barbosa (1998) onde foram observadas diminuições de 16% para a camada 0-20 cm e de 8,4% para a camada 20-100 cm, indicando a avaliação de camadas mais profundas pode minimizar o efeito da mudança de uso da terra.

Após o período de 20 anos, a dívida de carbono resultante da conversão Cerrado para cana-de-açúcar foi equivalente à 34 e 62 Mg CO_2 ha^{-1}. Considerando o *offset* do etanol de 9,8 Mg CO_2 ha^{-1} ano^{-1} (FARGIONE et al., 2008) seriam necessários o período de 3,5 a 6,3 anos para compensar as emissões de CO_2 do solo oriundas do processo de mudança de uso da terra, diminuindo quando camadas mais profundas de solo são consideradas. Apesar deste ser um período aparentemente curto de compensação é importante enfatizar que apenas o compartimento solo foi considerado.

Incluindo as emissões decorrentes das reduções nos estoques de biomassa, estimada em 9,7 Mg CO_2 ha^{-1} para parte aérea e 67,2 Mg CO_2 ha^{-1} para raízes em áreas de Cerrado (GRACE et al., 2006), o período de compensação das emissões resultantes da mudança de uso da terra seria de 12,5 a 15,3 anos, semelhantes ao obtido por Fargione et al. (2008) considerando a conversão de Cerrado para cana-de-açúcar.

É importante enfatizar que além da diminuição dos estoques de carbono dos solos resultante do desmatamento, existem evidências de que a substituição de áreas de vegetação nativa por áreas com finalidade agrícola ou pecuária podem resultar na diminuição e até mesmo na extinção da biodiversidade (RANGEL, 2012), cuja manutenção é importante para promover o funcionamento de serviços de ecossistemas (ISBELL et al., 2011; DAVIDSON et al., 2012) e um importante passo para atingir a sustentabilidade (FOLEY et al., 2011).

A substituição de pastagens para cana-de-açúcar resultou no decréscimo dos estoques de carbono dos solos, fato que pode ser explicado pela maior quantidade de matéria orgânica do solo que as pastagens podem manter quando comparadas às áreas de cana-de-açúcar, em alguns casos apresentando estoques próximos aos observados em áreas de vegetação nativa (Apêndice D).

Os F_{MUT} obtidos demonstram que após o período de 20 anos após a conversão, os estoques de carbono dos solos reduziram 9% para a camada 0-30 cm e 4% para a camada 0-100 cm, fato que pode ser explicado pela diferença entre os manejos de campo adotado em ambos sistemas de produção.

Áreas cultivadas com cana-de-açúcar passam por um processo completo de reforma a cada período de 4 a 5 anos (MACEDO; LEAL; AZEVEDO, 2004), com preparo do solo, aplicação de fertilizantes e plantio de novas gemas. Considerando a camada 0-10 cm de profundidade dos solos cultivados com cana-de-açúcar, emissões de até 3,5 Mg CO_2 ha^{-1} foram observadas durante a etapa de preparo (SILVA-OLAYA, 2010) enquanto áreas de pastagens podem permanecer por longos períodos de tempo sem que o revolvimento do solo seja promovido.

Adicionalmente, pastagens podem aumentar a produtividade controlando o pastejo dos animais e erradicando plantas daninhas, em alguns casos através do uso do fogo. Técnicas como estas foram observadas na região sudoeste da Amazônia em áreas de transição entre o Cerrado e Floresta Amazônica, resultando em aumento nos estoques de carbono dos solos sob pastagens entre 19% e 24% quando comparadas com áreas de vegetação nativa (MAIA et al., 2009), enaltecendo a diferença entre estes sistemas de produção.

Com relação à mudança dos estoques de carbono considerando diferentes profundidade do solo, o mesmo comportamento foi observado em áreas convertidas de pastagens e de Cerrado. Camadas mais profundas resultaram em maiores estoques de carbono do solo e menor período de compensação das emissões oriundas da mudança de uso da terra, estimada em 2 anos quando considerada a camada 0-30 cm e 1 ano para acamada 0-100 cm.

O IPCC (2006) sugere que o montante de 29,4 Mg CO_2 ha^{-1} são emitidos após a conversão de pastagens em regiões de clima tropical úmido em decorrência da diminuição de biomassa aérea e radicular. Estes valores aumentariam em cerca de 3 anos o período de compensação das emissões iniciais, resultando no total de 4 a 5 anos para compensar as emissões resultantes da mudança de uso da terra, período mais longo do que observado por outros autores, onde nenhuma dívida de carbono foi observada (FARGIONE et al., 2008 LAPOLA et al., 2010).

De maneira oposta ao que foi discutido para as conversões oriundas de vegetação nativa e de pastagens, a conversão de áreas de cultivo anual para cana-de-açúcar resultou no acúmulo de 41 Mg CO_2 ha^{-1}na camada 0-30 cm e de 91 Mg CO_2 ha^{-1}na camada 0-100 cm (Tabela 4.1).

Existem diversas atividades que poderiam resultar no incremento do estoque de carbono dos solos neste tipo de conversão. A adoção do manejo convencional de cultivo visando a produção de culturas anuais resulta na ocorrência de preparo do solo de maneira mais frequente do que em áreas de cana-de-açúcar, geralmente a cada 5 anos (MACEDO; LEAL; AZEVEDO, 2004), e poderiam levar a diminuição dos estoques de carbono dos solos, como observado em diversos estudos relacionados a intensificação de atividades agrícolas (ZINN et al., 2005; MAIA et al., 2010).

Por outro lado, caso o manejo de plantio direto seja adotado para as áreas de culturas anuais, deixando de promover o revolvimento do solo, o acúmulo de carbono proporcionado por este tipo de manejo conservacionista poderia ser menor do que o incremento proporcionado pela cana-de-açúcar. Este fato poderia ser explicado por evidências de que não existe diferença no acúmulo de carbono para a camada 0-100 cm de solo proporcionado pela adoção do plantio direto quando comparado ao cultivo convencional conforme observado por Luo et al. (2010).

Outro fator que pode ser interferente é a quantidade de raíz produzida pela cana-de-açúcar quando comparada com culturas anuais. De acordo com a FAO (2008), a produtividade média de fitomassa aérea de cana-de-açúcar é estimada em 73,5 Mg ha^{-1}, superior a produção do milho, 9,4 Mg ha^{-1}, e da soja, 2,4 Mg ha^{-1}.

Adotando a relação "raíz-parte aérea" de 0,45 para cana-de-açúcar (SMITH et al., 2005) e de 1,6 para o milho (adaptado de pastagens, IPCC 2006) seria possível concluir que a cana-de-açúcar produz maior quantidade de raízes do que culturas anuais. Este fato poderia contribuir para manutenção dos estoques de carbono dos solos ao longo do tempo em níveis mais elevados do que em áreas de cultivo anual, como ocorre em pastagens com pouca entrada de fertilizantes e elevada diversidade (TILMAN; HILL; LEHMAN, 2006).

Entretanto, é correto enfatizar que poucos pares amostrais foram observados sob este tipo de conversão (n=14, Tabela 4.1) e resultaram em um maior desvio padrão dos F_{MUT} gerados quando comparados com os outros tipos de conversão avaliados (Apêndice E), o que poderia resultar na subestimativa ou superestimativa do acúmulo de carbono do solo.

4.3 Conclusões

Os resultados gerados indicaram que a conversão de áreas de Cerrado e pastagens para cana-de-açúcar resultou no decréscimo do estoque de carbono dos solos enquanto a substituição de áreas de culturas anuais (soja e milho) resultou no acúmulo de carbono do solo. O período de compensação da dívida de carbono foi estimado entre 12 e 15 anos para conversão do Cerrado e para 4 a 5 anos para conversão de pastagens.

Foi observado que a diminuição dos estoques de carbono dos solos comparando-se cana-de-açúcar e sua respectiva referência foram menores na camada 0-100 cm do que a diminuição apresentada pela camada 0-30 cm, o que pode ser um indicativo de que avaliações até 30 cm de profundidade podem não ser suficientes para avaliar os efeitos causados pela mudança de uso da terra sobre os estoques de carbono dos solos e camadas mais profundas, como 100 cm, deveriam ser consideradas para avaliações com este objetivo.

Por fim, é importante enfatizar que a maior parte dos dados apresentados neste capítulo tratavam de áreas cultivadas sob manejo de queima da palha da cana-de-açúcar. A adoção do manejo sem queima, prevista para atingir 100% das áreas com declividade até 12% deverá ocorrer até 2014. Desta forma, é possível que as áreas cultivadas com cana-de-açúcar possam promover a mitigação dos GEE caso a expansão do cultivo ocorra sobre áreas de pastagens (62%) e de cultivo anual (38%), cenário esperado para ocorrer durante a próxima década.

Referências

ADAMI, M.; RUDORFF, B.F.T.; FREITAS, R.M.; AGUIAR, D.A.; SUGAWARA, L.M.; MELLO, M.P. Remote sensing time series to evaluate direct land use change of recent expanded sugarcane crop in Brazil. **Sustainability**, Basel, v.4, p.574-585, 2012.

BENITES, V.; MACHADO, P.O.L.A.; FIDALGO, E.C.C.; COELHO, M.R.; MADARI, B.E. Pedotransfer functions for estimating soil bulk density from existing soil survey reports in Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v.139, p. 90-97, 2007.

BERNOUX, M.; ARROUAYS, D.; CERRI, C.C.; VOLKOFF, B.; JOLIVET C. Bulk densities of Brazilian Amazon soils related to other soil properties, **Soil Science of Society of America Journal**, Madison, v. 62, p. 743-749, 1998.

BLAKE, G.R.; HARTGE, K H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. 2.ed. Madison: ASA, 1986. pt.1. p. 364-367. (Agronomy, 9).

BORDONAL, R.O.; FIGUEIREDO, E.B.;LA SCALA, N. Greenhouse gas balance due to the conversion of sugarcane areas from burned to green harvest, considering other conservationist management practices. **Global Change Biology Bioenergy**, Oxford, v.4, p.846-858, 2012.

BRASIL. Comitê Interministerial sobre Mudança do Clima. **Plano Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC).** Brasília, DF, 2008. 132p. Disponível em: http://www.forumclima.org.br/Acesso em: 10 nov. 2009.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. **Comunicação Nacional Inicial do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima**. Brasília, DF: Coordenação-Geral de Mudanças Globais de Clima, 2004. 74 p.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética - EPE. **Balanço Energético Nacional 2011**: Ano base 2010. Rio de Janeiro: EPE, 2011. 266 p.

BRAUNACK, M.V.; McGARRY, D. Traffic control and tillage strategies for harvesting and planting of sugarcane (*Saccharum officinarum*) in Australia. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.89, n. 1, p.86-102, 2006.

CARVALHO, J.L.N.; CERRI, C.E.P.; FEIGL, B.J.; PÍCCOLO, M.C.; GODINHO, V.P.; CERRI, C.C. Carbon sequestration in agricultural soils in the Cerrado region of the Brazilian Amazon. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 103, p. 342-349, 2009.

CERRI,C.C.;GALDOS, M.V.; MAIA, S.M.F.; BERNOUX, M.; FEIGL, B.J.; POWLSON, D.; CERRI, C.E.P.Effect of sugarcane harvesting systems on soil carbon stocks in Brazil: an examination of existing data. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 62, n. 1, p. 23–28, 2011.

CERRI, C.C.; BERNOUX, M.; MAIA, S.M.F.; CERRI, C.E.P.; COSTA JUNIOR, C.; FEIGL, B.J.; FRAZÃO, L.A.; MELLO, F.F.C.; GALDOS, M.V.; MOREIRA, C.S.; CARVALHO, J.L.N. Greenhouse gas mitigation options in Brazil for land-use change, livestock and agriculture. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 67, p. 102-116, 2010.

CERRI, C.C.; MAIA, S.M.F.; GALDOS, M.V.; CERRI, C.E.P.; FEIGL, B.J.; BERNOUX, M. Brazilian greenhouse gas emissions: the importance of agriculture and livestock. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 66, p. 831-843, 2009.

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

CERRI, C.E.P.; PAUSTIAN, K.; BERNOUX, M.; VICTORIA, R.L.; MELILLO, J.M.; CERRI, C.C. Modeling changes in soil organic matter in Amazon forest to pasture conversion with the Century model. **Global Change Biology**, Oxford, v. 10, p.815-832, 2004.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento de safra brasileira**: cana-de-açúcar, primeiro levantamento, abril/2009. Companhia Nacional de Abastecimento. Brasília, DF:CONAB, 2009.

DAVIDSON, E.A.; ARAÚJO, A.C.; ARTAXO, P.; BALCH, J.K.; BROWN, I.F.; BUSTAMANTE, M.M.C.; COE, M.T.; DEFRIES, R.S.; KELLER, M.; LONGO, M.; MUNGER,J.W.; SCHROEDER, W.; SOARES-FILHO, B.S.; SOUZA, C.M.;WOFSY, S.C.The Amazon basin in transition. **Nature**, London, v. 481, p.321-328, 2012.

ELLERT, B.H.; BETTANY, J.R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. **Canadian Journal of Soil Science**,Ottawa, v. 75, p. 529-538, 1996.

FAO. **The State of Food and Agriculture - BIOFUELS**: prospects, risks and opportunities. Rome, 2008. 128 p.

FAO. **FAOSTAT**. Rome, 2010. Disponível em: http://faostat.fao.org/Acesso em: 10 jan. 2012.

FARGIONE, J.; HILL, J.; TILMAN, D.; POLASKY, S.; HAWTHORNE, P. Land clearing and the biofuel carbon debt. **Science**, Washington, Dc, v.319, p. 1235–1238, 2008.

FEARNSIDE, P.M.; RIGHI, C.A.; GRAÇA, P.M.L.A.; KEIZER, E.W.H.;CERRI, C.C.; NOGUEIRA, E.M.; BARBOSA, R.I. Biomass and greenhouse-gas emissions from land-use change in Brazil s Amazonian arc of deforestation: the states of Mato Grosso and Rondônia. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 258, p. 1968-1978, 2009.

FOLEY, J.A.; RAMANKUTTY, N.; BRAUMAN, K.A.; CASSIDY, E.S.;GERBER, J.S.;JOHNSTON,M.; MUELLER, N.D.; O'CONNELL, C.; RAY, D.K.; WEST, P.C.; BALZER, C.; BENNETT, E.M.; CARPENTER, S.R.; HILL, J.; MONFREDA, C.;POLASKY,S.;ROCKSTRÖM, J.;SHEEHAN, J.;SIEBERT, S.;TILMAN, D.;ZAKS,D.P.M. Solutions for a cultivated planet. **Nature**, London, v. 478, p. 337-342, 2011.

FRAZÃO, L.A.; PAUSTIAN, K.; CERRI, C.E.P.; CERRI, C.C. Soil carbon stocks and changes after oil palm introduction in the Brazilian Amazon. **Global Change Biology Bioenergy**, Oxford, 2012. DOI: 10.1111/j.1757-1707.2012.01196.x.

GALDOS, M.V.; CERRI, C.C.; LAL, R.; BERNOUX, M.; FEIGL, B.; CERRI, C.E.P. Net greenhouse gas fluxes in Brazilian Ethanol Production Systems. **Global Change Biology Bioenergy**, Oxford, v. 2, p. 37-44, 2010.

GALDOS, M.V. **Dinâmica do carbono do solo no agrossistema cana-de-açúcar**. 2007. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11140/tde-14092007-140801/>. Acesso em: 09 nov. 2012.

GALFORD, G.; MELLILO, J.M.; KICKLIGHTER, D.; CRONIN, T.; CERRI, C.E.P.; MUSTARD, J.;CERRI, C.C. Greenhouse gas emissions from alternative futures of deforestation and agricultural management in the southern Amazon. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA**, Washington, DC, v. 107, p. 19649-19654, 2010.

GIBBS, H.K.; JOHNSTON, M.; FOLEY, J.A.; HOLLOWAY, T.; MONFREDA, C.; RAMANKUTTY, N.; ZAKS, D. Carbon payback times for crop-based biofuel expansion in the tropics: the effects of changing yield and technology. **Environmental Research Letters**, Bristol, v.3, 2008.doi:10.1088/1748-9326/3/3/034001.

GRACE, J.; JOSE, J.S.; MEIR, P.; MIRANDA S.M. Productivity and carbon fluxes of tropical savannas. **Journal of Biogeography**, Oxford, v.33, p.387–400, 2006.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.** Hayama, Kanagawa, Japan: Institute for Global Environment Strategies, 2006. v. 4: Agriculture, forestry and other land use.

ISBELL, F.; CALCAGNO, V.; HECTOR, A.; CONNOLY, J.; HARPOLE, S.; REICH, B.; SCHERER-LORENZEN, M.; SHMID, B.; TILMAN, D.; RUIJVEN, J.V.; WEIGELT, A.; WILSEY, J.; ZAVALETA, E.S.Z.; LOREAU, M.High plant diversity is needed to maintain ecosystem services. **Nature**, London, v. 477, p.199-202, 2011.

KURZ, I.; O'REILLY, C.D.; TUNNEY, H. Impact of cattle on soil physical properties and nutrient concentrations in overland flow from pasture in Ireland. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v.113, n. 1–4, p. 378–390, 2006.

LAL, R. Global potential of soil carbon sequestration to mitigate the greenhouse effect. **Critical Reviews in Plant Sciences**, Boca Raton, v.22, p. 151-184, 2003.

LANGE, M. The GHG balance of biofuels taking into account land use change. **Energy Policy**,Guildford, v.39, p.2373-2385, 2011.

LAPOLA, D.M.; SCHALDACH, R.; ALCAMO, J.; BONDEAU, A.; KOCH, J.; KOELKING, C.; PRIESS, J.A. Indirect land-use changes can overcome carbon savings from biofuels in Brazil. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA**, Washington, DC, v. 107, p. 3388-3393, 2010.

LUO, Z.; WANG, E.; SUN, O.J. Can no-tillage stimulate carbon sequestration in agricultural soils? A meta-analysis of paired experiments. **Agriculture Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v.139, n. 1-2, p.224–231, 2012.

MACEDO, I.C.; LEAL, M.R.L.V.; SILVA, J.E.A.R. **Balanço da emissões de gases de efeito estufa na produção e no uso do etanol no Brasil**. São Paulo: Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo, 2004. 37p.

MACEDO, I.C.; SEABRA, J.E.A.; SILVA, J.E.A.R. Greenhouse gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a rediction for 2020. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v.32, p.582-595, 2008.

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

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

MANZATTO, C.V.; ASSAD, E.D.; BACCA, J.F.M.; ZARONE, M.J.; PEREIRA, S.E.M. **Zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar**. Expandir a produção, preservar a vida, garantir o futuro. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009. 55 p. (Documentos, 110).

MARTÍNEZ, L.J.; ZINCK, J.A. Temporal variation of soil compaction and deterioration of soil quality in pasture areas of Colombian Amazonia. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.75, n. 1, p.3-18, 2004.

MORAES, J.F.L.; 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, p. 63-81, 1996.

NASSAR, A.M.; RUDORFF, B.F.T.; ANTONIAZZI, L.B.; AGUIAR, D.A.; BACCHI, M.R.P.; ADAMI, M. Prospects of the sugarcane expansion in Brazil: impacts on direct and indirect land use changes. In: ZUURBIER, P.; VAN DE VOOREN, J. (Org.). **Sugarcane ethanol**: contributions to climate change mitigation and the environment. 1. ed. Wageningen: Wageningen Academic Publishers, 2008. v. 1, p. 63-93.

NELSON, D.W.; SOMMERS, L.E. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: SPARKS, D.L.; PAGA, A.L.; HELMKE, P.A.; LOEPPERT, R.H.; SOLTANPOUR, P.N.; TABATABAI, M.A.; JOHNSTON, C.T.; SUMMER, M.E. (Ed.). **Methods of soil analysis**: Chemical methods. Part 3. Madison: SSSA, 1996. p.961-1010.

NEVES, M.F.; TROMBIN, V.G.; CONSOLI, M.A. Measurement of sugar cane chain in Brazil. **International Food and Agribusiness Management Review**, Stanford, v.3, p.37-54, 2010.

OGLE, S.M.; BREIDT, F.J.; EVE, M.D.; PAUSTIAN, K. Uncertainty in estimating land use and management impacts on soil organic carbon storage for US agricultural lands between 1982 and 1997. **Global Change Biology**, Oxford, v. 9, p.1521-1542, 2003.

OGLE, S.M.; CONANT, R.T.; PAUSTIAN, K. Deriving grassland management factors for acarbon accounting approach developed by the Intergovernmental Panel on Climate Change. **Environmental Management**, New York, v. 33, p.474-484, 2004.

OGLE, S.M.;PAUSTIAN, K. Soil organic carbon as an indicator of environmental quality at the national scale: monitoring methods and policy relevance. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 85, p.531-540, 2005.

RANGEL, T.F. Amazonian extinction debts. **Science**, Washington, DC, v.337, p.162-163, 2012.

RIGHI, C.A.; GRAÇA, P.M.L.A.; CERRI, C.C.; FEIGL, B.J.; FEARNSIDE, P.M. Burning efficiency and charcoal formation in a fire after mechanized clearing at Feliz Natal, Mato Grosso. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 258, p. 2535-2546, 2009.

RUDORFF, B.F.T., AGUIAR, D. A., SILVA, W. F., SUGAWARA, L. M., ADAMI, M., MOREIRA, M.A. Studies on the rapid expansion of sugarcane for ethanol production in São Paulo State (Brazil) Using Landsat Data. **Remote Sensing**, Basel, v. 2, p. 1057-1076, 2010.

SILVA-OLAYA, A.M. **Emissão de dióxido de carbono após diferentes sistemas de preparo do solo na cultura da cana-de-açúcar**. 2010. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11140/tde-17092010-143434/>. Acesso em: 2012-11-09.

SILVA, R.B.; LANÇAS, K.P.; MIRANDA, E.E.V.; SILVA, F.A.M.; BAIO, F.H.R. Estimation and evaluation of dynamic properties as indicators of changes on soil structure in sugarcane fields of Sao Paulo State – Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.103,n. 2, p.265-270, 2009.

SIQUEIRA NETO, M.; SCOPEL, E.; CORBEELS, M.; CARDOSO, A.N.; DOUZET, J.M.; FELLER, C.; PICCOLO, M.C.;CERRI, C.C.; BERNOUX, M. Soil carbon stocks under no-tillage mulch-based cropping systems in the Brazilian Cerrado: an on-farm synchronic assessment. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 110, p. 187-195, 2010.

SIX, J.; OGLE, S.M.; BREIDT, F.J.; CONANT, R.T.; MOSIER, A.R.; PAUSTIAN, K. The potential to mitigate global warming with no-tillage management is only realized when practiced in the long term. **Global Change Biology**, Oxford, v. 10, p.155-160, 2004.

SMITH, D.M.; INMAM-BAMBER, N.G.; THORBURN, P.J. Growth and function of the sugarcane root system. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.92, p.169-183, 2005.

SOARES, L.H.B.; ALVES, B.J.R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R.M. **Mitigação das emissões de gases de efeito estufa pelo uso de etanol da cana-de-açúcar produzido no Brasil**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2009. 14 p. (Circular Técnica, 29).

TILMAN, D.; HILL, J.; LEHMAN, C. Carbon-negative biofuels from low-input high-diversity grassland biomass. **Science**, Washington, DC, v.314, p.1598-1600, 2006.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. **UNICADATA**. São Paulo: ÚNICA. Disponível em: http://www.unica.com.br. Acesso em: 10 out. 2012.

WALTER, A.; DOLZAN, P.; QUILODRAN, O.; OLIVEIRA, J.; SILVA, C.; PIACENTE, F.; SEGERSTEDT, A. Sustainability assessment of bio-ethanol production in Brazil considering land use change, GHG emissions and socio-economic aspects. **Energy Policy**, Guildford, v.39, p.5703–5716, 2011.

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

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O principal objetivo deste projeto de pesquisa foi determinar as alterações do estoque de carbono dos solos devido a mudança do uso da terra para o cultivo de cana-de-açúcar na região Centro Sul do Brasil, e para tanto diversas etapas precisaram ser executadas.

A elaboração de uma base de dados de solos possibilitou a comparação de pares amostrais, conforme indicado pela metodologia adotada para avaliação do efeito da mudança de uso da terra sobre os estoques de carbono dos solos.

A compreensão da relação entre densidade do solo e outros atributos existentes na base de dados constituída permitiu realizar a estimativa indireta de densidade do solo e efetuar posteriormente os cálculos dos estoques de carbono dos solos. Adicionalmente, o desenvolvimento desta etapa permitirá seu uso por outros grupos ou projetos de pesquisa que tenham por objetivo determinar estoques de carbono dos solos sem que exista a necessidade de realizar amostragens específicas de densidade do solo.

O desenvolvimento destas etapas foi importante para a derivação dos fatores de mudança de uso da terra específicos para o cultivo de cana-de-açúcar no Brasil. A diversidade de áreas amostradas sob aspectos de solo, clima e regiões produtoras de cana-de-açúcar e etanol são importantes à medida que formam uma base de conhecimento que poderá indicar de que maneira a expansão de cana-de-açúcar poderá apresentar menor impacto ao meio ambiente.

Especificamente, foi observado que a expansão da cana-de-açúcar sobre áreas de vegetação nativa e de pastagens resultou na redução do estoque de carbono dos solos com o decorrer dos anos, resultando em uma "dívida de carbono". Por outro lado, foi possível observar que a substituição de áreas de cultivo anual resultou no sequestro de carbono dos solos.

Este fato pode ser correlacionado com o manejo intrínseco ao uso da terra. Ao passo em que o manejo do solo diminui de intensidade quando se comparam áreas sob cultivo anual (soja, milho), culturas semi-perenes (cana-de-açúcar), perenes (pastagem) e áreas não manejadas (vegetação nativa) o estoque de carbono do solo aumenta.

Por meio do desenvolvimento deste projeto de pesquisa foi possível observar o efeito que a avaliação em diferentes camadas de solo (0-30 cm, 0-50 cm e 0-100 cm) ocasionou no cálculo da dívida de carbono do etanol, indicando que a avaliação de camadas mais profundas apresenta a tendência de diminuir os efeitos da mudança de uso da terra sobre os estoques de carbono dos solos.

Neste aspecto é importante ressaltar que a maior parte das áreas coletadas situava-se sob manejo de queima da palha, prática que gradualmente vem diminuindo, e que possivelmente deixará de existir nos próximos anos. Desta forma, a melhoria de práticas agrícolas como adoção de manejo sem queima da palha poderia resultar no aumento dos estoques de carbono dos solos e proporcionar ganhos ambientais significativos, como a redução ou anulação da dívida de carbono na produção do etanol de cana-de-açúcar encontrados por este projeto de pesquisa.

Por fim, é importante estabelecer o cenário no qual o cultivo de cana-de-açúcar se insere no país. O Brasil apresenta cerca de 200 milhões de hectares de pastagens, 60 milhões de hectares sob cultivos anuais e 9 milhões de hectares com cana-de-açúcar. A expansão da referida cultura é esperada para ocorrer nos próximos 10 a 20 anos sobre áreas de pastagens (70%) e de culturas anuais (30%).

Mesmo que esta expansão acarrete em emissões de GEE, será possível compensá-las por meio do uso do etanol após o período de um ciclo de produção de cana-de-açúcar, equivalente a 5 anos de cultivo.

A adoção de estratégias que permitam o aumento da produtividade da atividade pecuária permitiria que a expansão da cultura da cana-de-açúcar pudesse ocorrer sem que houvesse limitações de atender as futuras demandas por alimentos, fibras e bioenergia.

Dentre as atividades que resultariam no aumento da produtividade da atividade pecuária destacam-se: recuperação de pastagens degradadas, melhoramento genético do rebanho, confinamento e adoção da integração lavoura-pecuária-floresta; atividades que vem sendo apoiadas pelo Governo Federal por meio do "Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura".

APÊNDICES

Apêndice A - Áreas amostradas na região Centro Sul do Brasil

ID	Municipio	UF	Solo Tipo	Textura	Uso Anterior	Uso Atual	Manejo (anos)		Idade (2011)	Par	ZAE
							Com Queima	Sem Queima			
1	Ipaussu	SP	Nitossolo	muito argilosa	pastagem	cana-de-açúcar	15	0	15	1	P
2	Ipaussu	SP	Nitossolo	muito argilosa		pastagem	N.A.	N.A.	N.D.	1	N.A.
3	Ipaussu	SP	Nitossolo	muito argilosa	pastagem	cana-de-açúcar	10	0	10	2	P
4	Ipaussu	SP	Nitossolo	muito argilosa		pastagem	N.A.	N.A.	N.D.	2 e 3	N.A.
5	Ipaussu	SP	Nitossolo	muito argilosa	pastagem	cana-de-açúcar	7	0	7	3	P
6	Iacanga	SP	Neossolo Quartzarênico	arenosa	pastagem	cana-de-açúcar	19	0	19	4	P
7	Iacanga	SP	Neossolo Quartzarênico	arenosa	pastagem	cana-de-açúcar	7	0	7	5	P
8	Iacanga	SP	Neossolo Quartzarênico	arenosa		pastagem	N.A.	N.A.	N.D.	4, 5 e 6	N.A.
9	Iacanga	SP	Neossolo Quartzarênico	arenosa	pastagem	cana-de-açúcar	9	0	9	6	P
10	Itirapina	SP	Neossolo Quartzarênico	arenosa	pastagem	cana-de-açúcar	6	0	6	7	IN
11	Itirapina	SP	Neossolo Quartzarênico	arenosa	pastagem	cana-de-açúcar	21	0	21	8	IN
12	Itirapina	SP	Neossolo Quartzarênico	arenosa	pastagem	cana-de-açúcar	31	0	31	9	IN
13	Itirapina	SP	Neossolo Quartzarênico	arenosa		pastagem	N.A.	N.A.	N.D.	7, 8 e 9	N.A.
14	Itirapina	SP	Neossolo Quartzarênico	arenosa		pastagem	N.A.	N.A.	N.D.	7, 8 e 9	N.A.
15	Anhembi	SP	Neossolo Quartzarênico	arenosa	pastagem	cana-de-açúcar	11	0	11	10	MS
16	Anhembi	SP	Neossolo Quartzarênico	arenosa	pastagem	cana-de-açúcar	6	0	6	11	MS
17	Anhembi	SP	Neossolo Quartzarênico	arenosa		pastagem	N.A.	N.A.	N.D.	10 e 11	N.A.
18	Anhembi	SP	Neossolo Quartzarênico	arenosa	pastagem	cana-de-açúcar	14	0	14	12	P
19	Anhembi	SP	Neossolo Quartzarênico	arenosa		pastagem	N.A.	N.A.	N.D.	12	N.A.
20	Anhembi	SP	Neossolo Quartzarênico	arenosa	pastagem	cana-de-açúcar	14	0	14	13	P
21	Anhembi	SP	Neossolo Quartzarênico	arenosa		pastagem	N.A.	N.A.	N.D.	13	N.A.
22	Anhembi	SP	Neossolo Quartzarênico	arenosa	pastagem	cana-de-açúcar	15	0	15	14	MS
23	Anhembi	SP	Neossolo Quartzarênico	arenosa		pastagem	N.A.	N.A.	N.D.	14	N.A.
24	Anhembi	SP	Neossolo Quartzarênico	arenosa	pastagem	cana-de-açúcar	20	0	20	15	P
25	Anhembi	SP	Neossolo Quartzarênico	arenosa		pastagem	N.A.	N.A.	N.D.	15	N.A.
26	Andradina	SP	Latossolo Amarelo	arenosa	pastagem	cana-de-açúcar	2	3	5	16	P
27	Andradina	SP	Latossolo Amarelo	arenosa		pastagem	N.A.	N.A.	N.D.	16	N.A.
28	Andradina	SP	Latossolo Amarelo	arenosa	pastagem	cana-de-açúcar	1	1	2	17	P
29	Andradina	SP	Latossolo Amarelo	arenosa		pastagem	N.A.	N.A.	N.D.	17	N.A.

continua

Apêndice A - Áreas amostradas na região Centro Sul do Brasil (continuação)

ID	Municipio	UF	Solo Tipo	Textura	Uso Anterior	Uso Atual	Manejo (anos)		Idade (2011)	Par	ZAE
							Com Queima	Sem Queima			
30	Andradina	SP	Latossolo Amarelo	arenosa	pastagem	cana-de-açúcar	8	2	10	18	P
31	Andradina	SP	Latossolo Amarelo	arenosa		pastagem	N.A.	N.A.	N.D.	18	N.A.
32	Andradina	SP	Latossolo Amarelo	arenosa	pastagem	cana-de-açúcar	3	1	4	19	P
33	Andradina	SP	Latossolo Amarelo	arenosa		pastagem	N.A.	N.A.	N.D.	19	N.A.
34	Andradina	SP	Latossolo Amarelo	arenosa	pastagem	cana-de-açúcar	8	1	9	20	P
35	Andradina	SP	Latossolo Amarelo	arenosa		pastagem	N.A.	N.A.	N.D.	20	N.A.
36	Araçatuba	SP	Latossolo Amarelo	arenosa	pastagem	cana-de-açúcar	30	9	39	21	P
37	Araçatuba	SP	Latossolo Amarelo	arenosa		pastagem	N.A.	N.A.	N.D.	21	N.A.
38	Araçatuba	SP	Latossolo Amarelo	arenosa	pastagem	cana-de-açúcar	9	7	16	22	P
39	Araçatuba	SP	Latossolo Amarelo	arenosa		pastagem	N.A.	N.A.	N.D.	22	N.A.
40	Araçatuba	SP	Latossolo Amarelo	arenosa	pastagem	cana-de-açúcar	30	9	39	23	P
41	Araçatuba	SP	Latossolo Amarelo	arenosa		pastagem	N.A.	N.A.	N.D.	23	N.A.
42	Araçatuba	SP	Latossolo Amarelo	arenosa	pastagem	cana-de-açúcar	30	9	39	24	P
43	Araçatuba	SP	Latossolo Amarelo	arenosa		pastagem	N.A.	N.A.	N.D.	24	N.A.
44	Campo Florido	MG	Latossolo Vermelho	média	agricultura	cana-de-açúcar	0	2	2	25	R
45	Campo Florido	MG	Latossolo Vermelho	média	agricultura	cana-de-açúcar	0	5	5	26	R
46	Campo Florido	MG	Latossolo Vermelho	média		agricultura	N.A.	N.A.	N.D.	25 e 26	N.A.
47	Campo Florido	MG	Neossolo Quartzarênico	arenosa	pastagem	cana-de-açúcar	0	3	3	27	R
48	Campo Florido	MG	Neossolo Quartzarênico	arenosa		pastagem	N.A.	N.A.	N.D.	27	N.A.
49	Campo Florido	MG	Neossolo Quartzarênico	arenosa	pastagem	cana-de-açúcar	3	3	6	28	P
50	Campo Florido	MG	Neossolo Quartzarênico	arenosa	pastagem	cana-de-açúcar	4	3	7	29	P
51	Campo Florido	MG	Neossolo Quartzarênico	arenosa		pastagem	N.A.	N.A.	N.D.	28 e 29	N.A.
52	Campo Florido	MG	Neossolo Quartzarênico	arenosa		pastagem	N.A.	N.A.	N.D.	30 e 31	N.A.
53	Campo Florido	MG	Neossolo Quartzarênico	arenosa	pastagem	cana-de-açúcar	4	3	7	30	R
54	Campo Florido	MG	Neossolo Quartzarênico	arenosa	pastagem	cana-de-açúcar	3	3	6	31	R
55	Campo Florido	MG	Neossolo Quartzarênico	arenosa	cerrado	cana-de-açúcar	4	0	4	32	R
56	Campo Florido	MG	Neossolo Quartzarênico	arenosa		cerrado	N.A.	N.A.	N.D.	32	N.A.
57	Campo Florido	MG	Latossolo Vermelho	argilosa	agricultura	cana-de-açúcar	4	3	7	33	R
58	Campo Florido	MG	Latossolo Vermelho	argilosa	agricultura	cana-de-açúcar	4	3	7	34	R
59	Araporã	MG	Latossolo Vermelho	muito argilosa	pastagem	cana-de-açúcar	5	2	7	35	R

continua

Apêndice A - Áreas amostradas na região Centro Sul do Brasil (continuação)

ID	Municipio	UF	Solo Tipo	Textura	Uso Anterior	Uso Atual	Manejo (anos)		Idade (2011)	Par	ZAE
							Com Queima	Sem Queima			
60	Araporã	MG	Latossolo Vermelho	muito argilosa		pastagem	N.A.	N.A.	N.D.	35 e 36	N.A.
61	Araporã	MG	Latossolo Vermelho	muito argilosa	pastagem	cana-de-açúcar	14	2	16	36	R
62	Araporã	MG	Latossolo Vermelho	muito argilosa	cerrado	cana-de-açúcar	37	2	39	37	R
63	Araporã	MG	Latossolo Vermelho	muito argilosa	pastagem	cana-de-açúcar	8	2	10	38	R
64	Araporã	MG	Latossolo Vermelho	muito argilosa		pastagem	N.A.	N.A.	N.D.	38 e 39	N.A.
65	Araporã	MG	Latossolo Vermelho	muito argilosa	pastagem	cana-de-açúcar	20	2	22	39	R
66	Araporã	MG	Latossolo Vermelho	muito argilosa		pastagem	N.A.	N.A.	N.D.	40	N.A.
67	Araporã	MG	Latossolo Vermelho	muito argilosa		pastagem	N.A.	N.A.	N.D.	41	N.A.
68	Araporã	MG	Latossolo Vermelho	muito argilosa	pastagem	cana-de-açúcar	0	3	3	40	R
69	Araporã	MG	Latossolo Vermelho	muito argilosa	pastagem	cana-de-açúcar	5	2	7	41	R
70	Araporã	MG	Latossolo Vermelho	muito argilosa		pastagem	N.A.	N.A.	N.D.	42	N.A.
71	Araporã	MG	Latossolo Vermelho	muito argilosa		pastagem	N.A.	N.A.	N.D.	43	N.A.
72	Araporã	MG	Latossolo Vermelho	muito argilosa	pastagem	cana-de-açúcar	0	3	3	43	R
73	Araporã	MG	Latossolo Vermelho	muito argilosa	pastagem	cana-de-açúcar	4	3	7	42	R
74	Araporã	MG	Latossolo Vermelho	muito argilosa		pastagem	N.A.	N.A.	N.D.	44	N.A.
75	Araporã	MG	Latossolo Vermelho	muito argilosa	pastagem	cana-de-açúcar	8	3	11	44	R
76	Araporã	MG	Latossolo Vermelho	muito argilosa		cerrado	N.A.	N.A.	N.D.	45	N.A.
77	Araporã	MG	Latossolo Vermelho	muito argilosa	cerrado	cana-de-açúcar	0	6	6	45	R
78	Araporã	MG	Latossolo Vermelho	muito argilosa		cerrado	N.A.	N.A.	N.D.	37	N.A.
79	Igarapava	SP	Latossolo Vermelho	muito argilosa	pastagem	cana-de-açúcar	6	2	8	46	P
80	Igarapava	SP	Latossolo Vermelho	muito argilosa		pastagem	N.A.	N.A.	N.D.	46	N.A.
81	Igarapava	SP	Latossolo Vermelho	muito argilosa	pastagem	cana-de-açúcar	9	1	10	47	P
82	Igarapava	SP	Latossolo Vermelho	muito argilosa		pastagem	N.A.	N.A.	N.D.	47	N.A.
83	Igarapava	SP	Latossolo Vermelho	muito argilosa		pastagem	N.A.	N.A.	N.D.	48	N.A.
84	Igarapava	SP	Latossolo Vermelho	muito argilosa	pastagem	cana-de-açúcar	4	1	5	48	P
85	Igarapava	SP	Latossolo Vermelho	muito argilosa	pastagem	cana-de-açúcar	4	1	5	49	P
86	Igarapava	SP	Latossolo Vermelho	muito argilosa	pastagem	cana-de-açúcar	15		15	50	P
87	Igarapava	SP	Latossolo Vermelho	muito argilosa	pastagem	cana-de-açúcar	18	2	20	51	P
88	Igarapava	SP	Latossolo Vermelho	muito argilosa		pastagem	N.A.	N.A.	N.D.	49 e 50	N.A.
89	Igarapava	SP	Latossolo Vermelho	muito argilosa		pastagem	N.A.	N.A.	N.D.	51	N.A.

continua

Apêndice A - Áreas amostradas na região Centro Sul do Brasil (continuação)

ID	Municipio	UF	Solo Tipo	Textura	Uso Anterior	Uso Atual	Manejo (anos)		Idade (2011)	Par	ZAE
							Com Queima	Sem Queima			
90	Igarapava	SP	Latossolo Vermelho	média	pastagem	cana-de-açúcar	4	1	5	52	R
91	Igarapava	SP	Latossolo Vermelho	média		pastagem	N.A.	N.A.	N.D.	52	N.A.
92	Igarapava	SP	Latossolo Vermelho	argilosa	pastagem	cana-de-açúcar	15	1	16	53	R
93	Igarapava	SP	Latossolo Vermelho	argilosa		pastagem	N.A.	N.A.	N.D.	53	N.A.
94	Araporã	MG	Latossolo Vermelho	muito argilosa		pastagem	N.A.	N.A.	N.D.	54	N.A.
95	Araporã	MG	Latossolo Vermelho	muito argilosa		pastagem	N.A.	N.A.	N.D.	55	N.A.
96	Araporã	MG	Latossolo Vermelho	muito argilosa	pastagem	cana-de-açúcar	16	2	18	55	R
97	Araporã	MG	Latossolo Vermelho	muito argilosa	pastagem	cana-de-açúcar	12	2	14	56	R
98	Araporã	MG	Latossolo Vermelho	muito argilosa	pastagem	cana-de-açúcar	13	2	15	54	R
99	Araporã	MG	Latossolo Vermelho	muito argilosa		pastagem	N.A.	N.A.	N.D.	56	N.A.
100	Araporã	MG	Latossolo Vermelho	muito argilosa	cerrado	cana-de-açúcar	2	1	3	57	R
101	Araporã	MG	Latossolo Vermelho	muito argilosa		cerrado	N.A.	N.A.	N.D.	57	N.A.
102	Araporã	MG	Latossolo Vermelho	muito argilosa	agricultura	cana-de-açúcar	3	0	3	58	R
103	Araporã	MG	Latossolo Vermelho	muito argilosa		agricultura	N.A.	N.A.	N.D.	58	N.A.
104	Goiatuba	GO	Latossolo Vermelho Amarelo	muito argilosa	pastagem	cana-de-açúcar	3	8	11	59	R
105	Goiatuba	GO	Latossolo Vermelho Amarelo	muito argilosa		pastagem	N.A.	N.A.	N.D.	59	N.A.
106	Goiatuba	GO	Latossolo Vermelho Amarelo	muito argilosa	pastagem	cana-de-açúcar	2	1	3	60	R
107	Goiatuba	GO	Latossolo Vermelho Amarelo	muito argilosa		pastagem	N.A.	N.A.	N.D.	60	N.A.
108	Goiatuba	GO	Latossolo Vermelho Amarelo	muito argilosa	agricultura	cana-de-açúcar	3	0	3	61	R
109	Goiatuba	GO	Latossolo Vermelho Amarelo	muito argilosa	pastagem	cana-de-açúcar	4	8	12	62	R
110	Goiatuba	GO	Latossolo Vermelho Amarelo	muito argilosa		cerrado	N.A.	N.A.	N.D.	63	N.A.
111	Goiatuba	GO	Latossolo Vermelho Amarelo	muito argilosa	cerrado	cana-de-açúcar	17	3	20	63	R
112	Goiatuba	GO	Latossolo Vermelho Amarelo	muito argilosa		pastagem	N.A.	N.A.	N.D.	63 4	N.A.
113	Goiatuba	GO	Latossolo Vermelho Amarelo	muito argilosa	pastagem	cana-de-açúcar	18	1	19	64	R
114	Goiatuba	GO	Latossolo Vermelho Amarelo	muito argilosa	pastagem	cana-de-açúcar	8	8	16	65	R
115	Goiatuba	GO	Latossolo Vermelho Amarelo	muito argilosa	pastagem	cana-de-açúcar	13	0	13	66	R
116	Goiatuba	GO	Latossolo Vermelho Amarelo	muito argilosa		pastagem	N.A.	N.A.	N.D.	65 e 66	N.A.
117	Goiatuba	GO	Latossolo Vermelho Amarelo	muito argilosa		agricultura	N.A.	N.A.	N.D.	67	N.A.
118	Goiatuba	GO	Latossolo Vermelho Amarelo	muito argilosa	agricultura	cana-de-açúcar	12	0	12	67	R
119	Terra Rica	PR	Neossolo Quartzarenico	arenosa	pastagem	cana-de-açúcar	16	0	16	68	P

continua

Apêndice A - Áreas amostradas na região Centro Sul do Brasil (conclusão)

ID	Municipio	UF	Solo Tipo	Textura	Uso Anterior	Uso Atual	Manejo (anos)		Idade (2011)	Par	ZAE
							Com Queima	Sem Queima			
120	Terra Rica	PR	Neossolo Quartzarênico	arenosa		pastagem	N.A.	N.A.	N.D.	68	N.A.
121	Terra Rica	PR	Neossolo Quartzarênico	arenosa	pastagem	cana-de-açúcar	5	0	5	69	P
122	Terra Rica	PR	Neossolo Quartzarênico	arenosa		pastagem	N.A.	N.A.	N.D.	69	N.A.
123	Terra Rica	PR	Neossolo Quartzarênico	arenosa		pastagem	N.A.	N.A.	N.D.	70	N.A.
124	Terra Rica	PR	Neossolo Quartzarênico	arenosa	pastagem	cana-de-açúcar	5	0	5	70	P
125	Terra Rica	PR	Neossolo Quartzarênico	arenosa		pastagem	N.A.	N.A.	N.D.	71	N.A.
126	Terra Rica	PR	Neossolo Quartzarênico	arenosa	pastagem	cana-de-açúcar	6	0	6	71	P
127	Iguatemi	PR	Nitossolo	muito argilosa	agricultura	cana-de-açúcar	26	0	26	72	P
128	Iguatemi	PR	Nitossolo	muito argilosa	agricultura	cana-de-açúcar	21	0	21	73	P
129	Iguatemi	PR	Nitossolo	muito argilosa	agricultura	cana-de-açúcar	15	0	15	74	MS
130	Iguatemi	PR	Nitossolo	muito argilosa	agricultura	cana-de-açúcar	15	0	15	75	MS
131	Iguatemi	PR	Nitossolo	muito argilosa		agricultura	N.A.	N.A.	N.D.	72	N.A.
132	Iguatemi	PR	Nitossolo	muito argilosa		agricultura	N.A.	N.A.	N.D.	73	N.A.
133	Iguatemi	PR	Nitossolo	muito argilosa		agricultura	N.A.	N.A.	N.D.	74	N.A.
134	Iguatemi	PR	Nitossolo	muito argilosa		agricultura	N.A.	N.A.	N.D.	75	N.A.
135	Maracaju	MS	Latossolo Vermelho	muito argilosa	agricultura	cana-de-açúcar	3	0	3	76	R
136	Maracaju	MS	Latossolo Vermelho	muito argilosa		agricultura	N.A.	N.A.	N.D.	76	N.A.
137	Maracaju	MS	Latossolo Vermelho	muito argilosa		agricultura	N.A.	N.A.	N.D.	77	N.A.
138	Maracaju	MS	Latossolo Vermelho	muito argilosa	agricultura	cana-de-açúcar	1	0	1	77	R
139	Maracaju	MS	Latossolo Vermelho	muito argilosa	agricultura	cana-de-açúcar	2	1	3	78	R
140	Maracaju	MS	Latossolo Vermelho	muito argilosa		agricultura	N.A.	N.A.	N.D.	78	N.A.
141	Maracaju	MS	Latossolo Vermelho	muito argilosa		pastagem	N.A.	N.A.	N.D.	79	N.A.
142	Maracaju	MS	Latossolo Vermelho	muito argilosa	pastagem	cana-de-açúcar	11	1	12	79	R

N.A. = Não aplicável; N.D. = Não disponível;

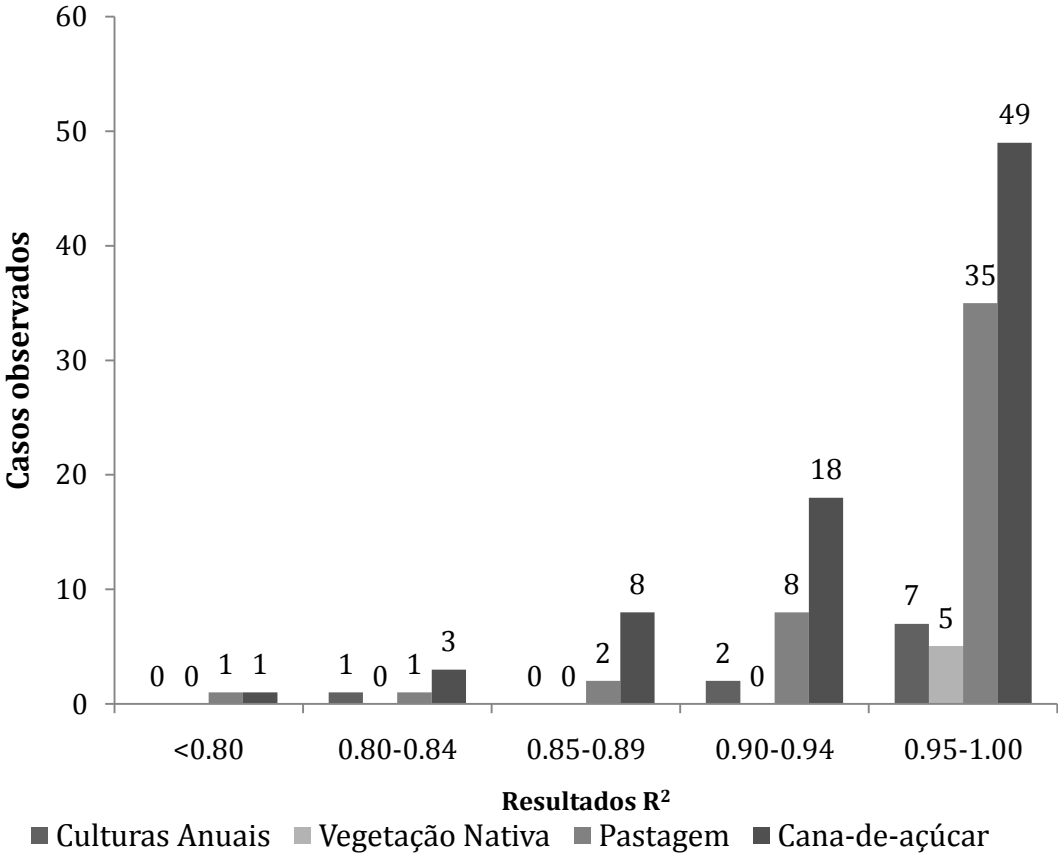
ZAE = Zoneamento Agroecológico da cana-de-açúcar (2009). P = Prioritárias; R = Regulares; MS = Marginal por Solo; IN = Inaptas.

Granulometria consistiu na separação das frações areia (2,00-0,05 mm) silte (0,05-0,002 mm) e argila (<0,002 mm) pelo método do densímetro, utilizando como agente dispersante o Na-hexametafosfato (CAMARGO et al., 1986). Classificação em classes foi realizada de acordo com o sistema brasileiro de classificação de solos proposto pela EMBRAPA (2006).

Apêndice B - Estatística descritiva da raíz quadrada resultante de regressões aplicadas para determinação da taxa de decaimento de carbono do solo

Uso da terra	**Observações (n)**	**Estatística descritiva**						
		Média	**Máximo**	**Mínimo**	**Q1 (25%)**	**Q2 (75%)**	**IQR**	**MAD**
Cana-de-açúcar	79	0,932	0,997	0,042	0,929	0,974	0,045	0,022
Pastagem	47	0,950	0,997	0,594	0,946	0,980	0,034	0,017
Culturas anuais	10	0,972	0,998	0,900	0,978	0,991	0,014	0,007
Vegetação Nativa	5	0,981	0,997	0,967	0,973	0,996	0,024	0,005

IQR: Distância entre quartis; MAD: desvio da média absoluta



Apêndice C - Resultados da raiz quadrada das regressões aplicadas para determinação das taxas de decaimento de carbono dos solos

Apêndice D - Estoques de carbono dos solos sob diferentes usos da terra na região Centro Sul do Brasil

Par amostral	Cidade	Região (Fig 1)	Tempo de Uso (anos)	Tempo SQ* (anos)	Text. do Solo (IPCC)	Estoques de C dos solos Cana-de-açúcar (Mg ha^{-1}) 0-30 cm	0-50 cm	0-100 cm	Uso do Solo Ref.	Estoques de C dos solos Referência (Mg ha^{-1}) 0-30 cm	0-50 cm	0-100 cm
1	Ipaussu	1	15	0	Argiloso	57,5	84,2	138,5	PA	73,4	105,4	170,8
2	Ipaussu	1	9	0	Argiloso	62,9	92,9	143,5	PA	64,8	86,5	124,8
3	Ipaussu	1	7	0	Argiloso	60,6	89,9	147,2	PA	64,8	86,5	124,8
4	Anhembi	2	6	0	Arenoso	36,9	55,1	95,1	PA	45,8	65,1	95,4
5	Anhembi	2	11	0	Arenoso	23,9	36,2	63,2	PA	45,8	65,1	95,4
6	Anhembi	2	14	0	Arenoso	27,4	40,9	72,5	PA	24,1	35,5	58,8
7	Anhembi	2	14	0	Arenoso	37,8	53,4	82,7	PA	34,1	46,4	70,3
8	Anhembi	2	15	0	Argiloso	51,0	78,7	124,6	PA	50,9	75,0	114,2
9	Anhembi	2	20	0	Argiloso	34,5	58,4	112,0	PA	79,2	109,6	161,8
10	Itirapina	3	6	0	Argiloso	76,4	112,7	162,8	PA	55,9	84,0	127,2
11	Itirapina	3	21	0	Arenoso	42,6	65,6	103,0	PA	55,9	84,0	127,2
12	Itirapina	3	31	0	Arenoso	56,5	77,3	111,5	PA	55,9	84,0	127,2
13	Iacanga	4	18	0	Argiloso	23,1	32,7	50,4	PA	33,2	48,0	73,4
14	Iacanga	4	7	0	Argiloso	31,1	43,7	68,8	PA	33,2	48,0	73,4
15	Iacanga	4	9	0	Argiloso	29,3	42,6	67,4	PA	33,2	48,0	73,4
16	Araçatuba	5	39	9	Arenoso	44,9	59,7	82,7	PA	35,5	49,4	71,3
17	Araçatuba	5	16	7	Argiloso	25,0	35,2	52,3	PA	32,5	44,3	64,4
18	Araçatuba	5	39	9	Argiloso	34,1	47,5	72,8	PA	29,1	45,9	81,0
19	Araçatuba	5	39	9	Arenoso	20,0	30,0	48,7	PA	25,1	35,8	55,0
20	Andradina	6	5	3	Argiloso	32,3	46,8	74,2	PA	39,3	53,7	79,2

continua

Apêndice D - Estoques de carbono dos solos sob diferentes usos da terra na região Centro Sul do Brasil (continuação)

Par amostral	Cidade	Região (Fig 1)	Tempo de Uso (anos)	Tempo SQ* (anos)	Textura do Solo (IPCC)	Estoques de C dos solos Cana-de-açúcar (Mg ha^{-1}) 0-30 cm	0-50 cm	0-100 cm	Uso do Solo Ref.	Estoques de C dos solos Referência (Mg ha^{-1}) 0-30 cm	0-50 cm	0-100 cm
21	Andradina	6	2	1	Argiloso	26,8	39,4	57,9	PA	34,6	47,8	69,4
22	Andradina	6	10	2	Argiloso	22,9	36,2	58,7	PA	55,0	68,0	85,2
23	Andradina	6	4	1	Argiloso	27,0	40,3	61,0	PA	30,7	41,2	56,2
24	Andradina	6	9	1	Argiloso	26,8	38,2	55,3	PA	28,5	41,3	63,6
25	Igarapava	7	8	2	Argiloso	59,8	89,1	142,5	PA	84,6	120,6	176,1
26	Igarapava	7	10	1	Argiloso	60,7	90,3	143,5	PA	94,2	136,8	220,4
27	Igarapava	7	5	1	Argiloso	57,9	77,7	118,9	PA	68,6	101,1	156,9
28	Igarapava	7	5	1	Argiloso	21,8	34,3	57,0	PA	97,1	134,9	201,4
29	Igarapava	7	15	2	Argiloso	78,0	113,5	171,3	PA	97,1	134,9	201,4
30	Igarapava	7	20	2	Argiloso	56,5	85,0	136,3	PA	63,5	91,3	140,7
31	Igarapava	7	5	1	Argiloso	42,9	63,0	98,8	PA	55,8	83,5	124,2
32	Igarapava	7	16	1	Argiloso	87,7	125,1	195,6	PA	45,8	66,1	105,5
33	Campo Florido	8	2	2	Arenoso	31,0	45,5	72,8	CA	31,6	47,4	77,5
34	Campo Florido	8	5	5	Argiloso	36,7	53,1	85,2	CA	31,6	47,4	77,5
35	Campo Florido	8	3	3	Arenoso	31,1	45,2	70,2	PA	27,2	40,1	65,7
36	Campo Florido	8	6	3	Arenoso	26,0	38,9	63,7	PA	28,8	41,3	63,5
37	Campo Florido	8	7	3	Argiloso	27,7	41,1	66,6	PA	28,8	41,3	63,5
38	Campo Florido	8	7	3	Argiloso	30,9	46,1	72,7	PA	28,6	41,1	64,0
39	Campo Florido	8	6	3	Argiloso	19,9	30,3	50,6	PA	28,6	41,1	64,0
40	Campo Florido	8	4	0	Argiloso	29,6	42,5	66,0	VN	35,8	49,8	74,3

continua

Apêndice D - Estoques de carbono dos solos sob diferentes usos da terra na região Centro Sul do Brasil (continuação)

Par amostral	Cidade	Região (Fig 1)	Tempo de Uso (anos)	Tempo SQ* (anos)	Textura do Solo (IPCC)	Estoques de C dos solos Cana-de-açúcar (Mg ha^{-1}) 0-30 cm	0-50 cm	0-100 cm	Uso do Solo Ref.	Estoques de C dos solos Referência (Mg ha^{-1}) 0-30 cm	0-50 cm	0-100 cm
41	Campo Florido	8	7	3	Argiloso	68,6	99,7	153,6	CA	31,6	47,4	77,5
42	Campo Florido	8	7	3	Argiloso	31,3	46,4	73,4	CA	31,6	47,5	77,5
43	Arapora	9	7	2	Argiloso	54,3	83,7	137,1	PA	54,2	78,8	121,9
44	Arapora	9	16	2	Argiloso	43,4	64,2	100,6	PA	54,2	78,8	121,9
45	Arapora	9	39	2	Argiloso	62,1	94,5	152,1	VN	105,6	140,9	201,8
46	Arapora	9	10	2	Argiloso	67,7	92,8	139,4	PA	85,3	110,5	151,8
47	Arapora	9	20	2	Argiloso	62,4	86,7	130,3	PA	85,3	110,5	151,8
48	Arapora	9	3	3	Argiloso	62,3	93,5	150,2	PA	69,6	97,8	148,5
49	Arapora	9	7	2	Argiloso	91,1	132,7	198,2	PA	70,5	98,2	145,7
50	Arapora	9	3	3	Argiloso	74,6	113,5	182,7	PA	75,7	109,1	169,0
51	Arapora	9	7	3	Argiloso	72,6	99,4	155,9	PA	67,3	95,7	153,4
52	Arapora	9	11	3	Argiloso	66,0	96,3	149,9	PA	72,9	110,7	177,9
53	Arapora	9	6	6	Argiloso	69,5	102,4	164,0	VN	73,1	102,1	153,2
54	Arapora	9	13	2	Argiloso	50,7	71,2	110,3	PA	55,5	77,1	119,4
55	Arapora	9	14	2	Argiloso	59,2	91,0	143,2	PA	71,8	96,7	139,8
56	Arapora	9	15	2	Argiloso	50,0	71,3	113,9	PA	51,4	68,8	101,8
57	Arapora	9	3	1	Argiloso	66,6	92,8	132,3	VN	86,9	113,2	155,4
58	Arapora	9	3	0	Argiloso	54,7	76,9	116,5	CA	53,8	73,5	104,3
59	Goiatuba	10	11	8	Argiloso	88,4	134,7	207,6	PA	111,3	159,4	234,0
60	Goiatuba	10	3	1	Argiloso	51,8	79,7	129,8	PA	51,2	84,8	142,0

continua

Apêndice D - Estoques de carbono dos solos sob diferentes usos da terra na região Centro Sul do Brasil (conclusão)

Par amostral	Cidade	Região (Fig 1)	Tempo de Uso (anos)	Tempo SQ* (anos)	Textura do Solo (IPCC)	Estoques de C dos solos Cana-de-açúcar (Mg ha^{-1}) 0-30 cm	0-50 cm	0-100 cm	Uso do Solo Ref.	Estoques de C dos solos Referência (Mg ha^{-1}) 0-30 cm	0-50 cm	0-100 cm
61	Goiatuba	10	3	0	Argiloso	61,9	91,5	145,5	CA	66,4	96,9	152,7
62	Goiatuba	10	12	8	Argiloso	80,3	120,2	193,2	PA	94,6	139,0	217,5
63	Goiatuba	10	20	3	Argiloso	78,1	118,5	187,0	VN	103,7	144,8	208,9
64	Goiatuba	10	17	1	Argiloso	90,2	132,3	200,8	PA	94,6	139,0	217,5
65	Goiatuba	10	16	8	Argiloso	55,4	91,7	155,9	PA	77,5	124,7	206,2
66	Goiatuba	10	13	3	Argiloso	75,0	127,0	228,8	PA	77,5	124,7	206,2
67	Goiatuba	10	12	0	Argiloso	70,6	104,2	158,8	CA	66,4	96,9	152,7
68	Maracaju	11	3	1	Argiloso	63,9	89,4	135,6	CA	86,9	116,6	164,4
69	Maracaju	11	1	1	Arenoso	72,0	99,6	143,3	CA	74,7	104,1	152,3
70	Maracaju	11	3	1	Arenoso	84,9	119,8	170,2	CA	94,6	132,7	193,3
71	Maracaju	11	3	3	Arenoso	89,0	129,5	191,8	PA	79,3	112,4	163,3
72	Terra Rica	12	16	0	Arenoso	50,2	73,9	118,3	PA	59,0	89,1	143,4
73	Terra Rica	12	5	0	Argiloso	77,8	111,5	177,9	PA	69,6	107,6	176,6
74	Terra Rica	12	5	0	Argiloso	55,8	81,1	129,0	PA	59,1	91,4	141,7
75	Terra Rica	12	6	1	Argiloso	50,6	80,3	135,7	PA	44,5	68,2	113,7
76	Iguatemi	13	26	0	Argiloso	70,6	98,4	147,0	CA	47,6	65,6	99,3
77	Iguatemi	13	21	0	Argiloso	52,4	75,1	111,3	CA	52,7	72,8	106,3
78	Iguatemi	13	15	0	Argiloso	51,1	69,4	102,2	CA	55,9	74,5	105,0
79	Iguatemi	13	15	0	Argiloso	58,1	77,5	111,4	CA	56,0	78,9	111,4

SQ* = período cultivado sob manejo sem queima (anos); PA = Pastagem; CA= Culturas anuais; VN = Vegetação Nativa; Ref. = referência.

Apêndice E - Fatores de mudança de uso da terra derivados com dados de solo considerando classificação granulométrica do IPCC

Camada de solo (cm)	**Fatores de mudança de uso da terra para cana-de-açúcar**											
	Pastagem				**Cultivo anual**				**Cerrado**			
	tempo (anos)				**tempo (anos)**				**tempo (anos)**			
	5	**10**	**15**	**20**	**5**	**10**	**15**	**20**	**5**	**10**	**15**	**20**
0-30	0,93 (±0,04)	0,93 (±0,03)	0,92 (±0,03)	0,91 (±0,04)	1,09 (±0,12)	1,12 (±0,11)	1,16 (±0,13)	1,20 (±0,18)	N.S.	N.S.	N.S.	0,79 (±0,04)
0-50	0,96 (±0,04)	0,96 (±0,03)	0,95 (±0,03)	0,94 (±0,04)	1,09 (±0,12)	1,13 (±0,10)	1,17 (±0,13)	1,20 (±0,18)	N.S.	N.S.	N.S.	0,86 (±0,04)
0-100	1,00 (±0,04)	0,99 (±0,03)	0,98 (±0,03)	0,98 (±0,04)	1,10 (±0,12)	1,14 (±0,10)	1,18 (±0,13)	1,21 (±0,18)	N.S.	N.S.	N.S.	0,94 (±0,04)

N.S. = não significativo ao nível de 95% de intervalo de confiança. Fatores não foram gerados para este uso.