



Variação no estoque de carbono do solo na mudança do uso da terra para cana-de-açúcar em Mococa, SP, Brasil⁽¹⁾

Ricardo de Oliveira Bordonal⁽²⁾; Carlos Cesar Ronquim⁽³⁾; Eduardo Barretto de Figueiredo⁽⁴⁾; Walter Maldonado Jr.⁽⁵⁾; Débora Marcondes Bastos Pereira Milori⁽⁶⁾; Newton La Scala Jr.⁽⁷⁾

⁽¹⁾ Parte da Tese de Doutorado do Primeiro Autor.

⁽²⁾ Doutorando em Agronomia (PPG-Produção Vegetal), Universidade Estadual Paulista (FCAV/UNESP), Jaboticabal/SP, E-mail: rbordonal@yahoo.com.br. ⁽³⁾ Pesquisador da Embrapa Monitoramento por Satélite, Campinas/SP, E-mail: carlos.ronquim@embrapa.br. ⁽⁴⁾ Pós-Doutorando na Universidade Estadual Paulista (FCAV/UNESP), Jaboticabal/SP, E-mail: eduardobfigueiredo@hotmail.com. ⁽⁵⁾ Doutorando em Agronomia (PPG-Produção Vegetal), Universidade Estadual Paulista (FCAV/UNESP), Jaboticabal/SP, E-mail: walter.bode.unesp@gmail.com. ⁽⁶⁾ Pesquisadora sênior da Embrapa Instrumentação, São Carlos/SP, E-mail: debora.milori@embrapa.br. ⁽⁷⁾ Professor adjunto do Departamento de Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista (FCAV/UNESP), Jaboticabal/SP, E-mail: lascala@fcav.unesp.br.

RESUMO: A mudança na cobertura e uso da terra (MUT) gerada pela expansão da cana-de-açúcar implica em relevantes alterações nos ciclos biogeoquímicos, incluindo os estoques de carbono (C) do solo, além das emissões de gases de efeito estufa (GEE). Objetivou-se, com este estudo, determinar as variações do estoque de C do solo na expansão (MUT) da cana-de-açúcar sobre áreas de pastagem e cultura anual na região de Mococa (SP), Brasil. O experimento foi conduzido em parcelas subdivididas com cinco repetições e sob delineamento inteiramente casualizado. Os tratamentos principais são em pares amostrais próximos, sendo o primeiro representado pelo uso da terra anterior à conversão e o segundo referente à cultura da cana-de-açúcar após a MUT. Os tratamentos secundários foram quatro profundidades de solo (0-10, 10-20, 20-60, 60-100 cm). A área de mata nativa apresentou o maior estoque de C no solo (228,6 Mg C ha⁻¹), sendo muito superior comparado aos demais agrossistemas: pastagem, cana-pasto, cultura anual e cana-anual. Observa-se que a conversão de pastagem para cana-de-açúcar resultou em diferença significativa nos estoques de C do solo, de 102,3 para 76,3 Mg C ha⁻¹ (25,4%) durante 8 anos. Em contrapartida, a variação dos estoques de C devido à conversão de cultura anual para cana-de-açúcar foi não significativa, variando de 116,2 para 121,2 Mg C ha⁻¹ ao longo de 7 anos. Estes resultados indicam como a expansão da cana-de-açúcar impacta nesse importante aspecto e aponta para rotas de maior sustentabilidade do etanol de cana considerando-se a MUT.

Termos de indexação: expansão da cana-de-açúcar; sustentabilidade; gases de efeito estufa.

INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos principais produtores de etanol de cana-de-açúcar, com uma área de produção

estimada de 9,07 Mha na safra 2015/2016, sendo o Estado de São Paulo responsável por mais de 52% da área nacional cultivada (CONAB, 2015). Em adição, a produção de etanol de cana está projetada em aumentar dos atuais 21 para 61,6 bilhões de litros até 2021 (Goldemberg et al., 2014).

A mudança do uso da terra (MUT) e o setor agrícola são as principais fontes de emissões de gases de efeito estufa (GEE) no Brasil (~80% em 2005), representando a maior taxa absoluta de desmatamento do mundo (MCT, 2010). Embora inúmeros trabalhos tenham demonstrado as vantagens estratégicas do etanol de cana-de-açúcar em substituição aos combustíveis fósseis (Börjesson, 2009), a rápida expansão da cultura nos últimos anos tem colocado em pauta a sustentabilidade de sua produção (Lapola et al., 2010).

Segundo Adami et al. (2012), aproximadamente 3 Mha foram convertidos em cana-de-açúcar durante o período de 2000 a 2010 no centro-sul do Brasil. Os impactos ambientais da expansão da cana-de-açúcar ainda são poucos estudados. As alterações regionais na cobertura e uso das terras geradas por essa expansão implicam em relevantes alterações nos ciclos biogeoquímicos, incluindo mudanças nos estoques de carbono (C) dos solos e emissões de GEE (Mello et al., 2014). Além disso, a contabilização das emissões derivadas da MUT no balanço de GEE da produção da cana-de-açúcar pode reduzir a compensação de C do etanol em substituição aos combustíveis fósseis (Fargione et al., 2008).

O entendimento dos processos de alteração dos estoques de C em escalas regionais e nacionais é necessário para a futura compreensão do ciclo global do C, de forma a dimensionar as respostas dos ecossistemas às mudanças climáticas e, com isso, subsidiar as políticas públicas nas tomadas de decisões sobre o uso e manejo das terras. Portanto, objetivou-se com este estudo determinar as



variações dos estoques de C do solo devido à expansão (MUT) da cana-de-açúcar sobre áreas de pastagem e cultura anual na região de Mococa (SP), Brasil.

MATERIAL E MÉTODOS

As áreas do experimento em estudo estão localizadas na região de Mococa, interior de São Paulo e são decorrentes de variados sistemas de cultivo e manejo do solo. Os pares amostrais foram selecionados de modo que as áreas convertidas em cana-de-açúcar estivessem sob as mesmas condições edafoclimáticas de seu uso anterior, totalizando dois pares amostrais e uma mata nativa como referência. Foram observados os efeitos da MUT nos estoques de C do solo devido à conversão de pastagem e cultura anual para o agrossistema cana-de-açúcar.

Tratamentos e amostragens

A caracterização das áreas amostradas quanto ao histórico de uso e manejo da terra é apresentada na **Tabela 1**. Em 22 de abril de 2013, as amostras foram coletadas em 4 profundidades (0-10, 10-20, 20-60, 60-100 cm), em 5 replicatas, totalizando 80 amostras. Os procedimentos de amostragem, preservação e preparação das amostras seguiram métodos oficiais (EMBRAPA, 1997). As amostras de solo foram secas, retiraram-se os cascalhos e restos vegetais e posteriormente os solos foram passados em peneira de 2 mm. Em seguida, parte da amostra de solo foi moída (homogeneizada) e passada em peneira de 100 μ m (150 mesh) para as análises instrumentais. As medidas foram feitas em duplicata. O cálculo da densidade foi realizado após secagem de aproximadamente 24h em estufa a 105°C até massa constante. A partir da massa seca e o volume conhecido do anel, calculou-se a densidade do solo.

Além da determinação dos teores de C orgânico, foram estimados os estoques de C do solo (ECs) na profundidade de 0-100 cm, corrigindo-se os valores com as densidades do solo para as diferentes camadas amostradas (0-10, 10-20, 20-60, 60-100 cm). A equação utilizada nos cálculos é dada por: $EC = 10 \cdot (C \cdot D_s \cdot L)$, onde EC é o estoque de carbono em megagramas ($Mg\ C\ ha^{-1}$); C é a quantidade de carbono em $g\ kg^{-1}$; D_s é a densidade do solo em $Mg\ m^{-3}$; e L é a espessura da camada em metros (m). Como diferentes práticas de manejo podem alterar a densidade do solo, o cálculo dos estoques de C em função apenas da profundidade do solo pode levar ao erro dos valores estimados.

Portanto, os estoques de C foram corrigidos para massas iguais de solo, utilizando-se a densidade do solo da vegetação nativa como referência, conforme sugerido por Carvalho et al. (2009), baseado nos trabalhos de Moraes et al. (1996) e Veldkamp et al. (1994).

Análise estatística

O experimento foi conduzido em parcelas subdivididas com cinco repetições e sob delineamento inteiramente casualizado. Os tratamentos principais são os pares amostrais, sendo o primeiro representado pelo uso da terra anterior à conversão e o segundo referente à cultura da cana-de-açúcar após a MUT. Os tratamentos secundários foram quatro profundidades (0-10, 10-20, 20-60, 60-100 cm).

Os tratamentos e as interações foram analisados através da análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%. Os dados foram transformados para $\log(x)$ visando alcançar a homocedasticidade. As diferenças entre as médias foram consideradas significativas quando maiores que a DMS calculada, dada por $\Delta = q \cdot \sqrt{r}$, onde q é o valor da amplitude total estudentizada a 5% de probabilidade, s é o desvio padrão residual, dado por $s = \sqrt{QMRes}$ e r é o número de repetições com que foram calculadas as médias dos tratamentos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A variação do estoque de C do solo ($Mg\ C\ ha^{-1}$) devido à conversão (MUT) de pastagem e cultura anual para o agrossistema cana-de-açúcar são apresentados na **Figura 1**, considerando-se o total para a camada de 0-100 cm. A área de mata nativa apresentou o maior estoque de C no solo ($228,6\ Mg\ C\ ha^{-1}$), sendo muito superior aos demais sistemas produtivos. A maior parte da perda do C orgânico do solo da mata original é resultado de práticas de manejo como o preparo do solo, que favorece uma maior saída via mineralização, e ao aporte inferior de resíduos sobre a superfície do solo quando se compara sistemas agrícolas a mata nativa.

Observa-se que a conversão de pastagem para cana-de-açúcar apresentou diferença significativa pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, resultando na depleção dos estoques de C do solo em 25,4%, ou seja, de 102,3 para 76,3 $Mg\ C\ ha^{-1}$ durante 8 anos. Similarmente, Mello et al. (2014) observaram uma depleção de C no solo de 8,7 $Mg\ C\ ha^{-1}$ na camada de 0-100 cm em 20 anos. Essa



redução deve-se muito provavelmente ao preparo intensivo do solo durante a implantação/reforma do canavial a cada 5 anos (De Figueiredo et al., 2015). Em contraste, a área de pastagem permaneceu por longo período (10 anos) sem algum preparo do solo. Perdas de C no solo associadas às conversões de floresta nativa e pastagem para cana-de-açúcar têm sido alvo de questionamento no que diz respeito à “pegada de carbono” do etanol de cana (Fargione et al., 2008; Mello et al., 2014). Contudo, práticas agrícolas conservacionistas podem recuperar parte do C orgânico perdido através da adoção do preparo reduzido do solo e da colheita mecanizada sem queima (Bordonal et al., 2012). Cerri et al. (2011) reportaram que a manutenção de palha na superfície do solo tem o potencial de acúmulo de $1,5 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Em áreas de cana-de-açúcar sob plantio direto (sem preparo do solo), Segnini et al. (2013) observaram o acúmulo anual de $1,63 \text{ Mg C ha}^{-1}$.

Diferentemente da conversão de pastagem, a variação dos estoques de C devido à conversão de cultura anual para o agrossistema cana-de-açúcar foi não significativa, variando de 116,2 para 121,2 Mg C ha^{-1} ao longo de 7 anos. Essa tendência também foi observada por Mello et al. (2014), em que a conversão de cultura anual para cana-de-açúcar resultou no acúmulo de $21,5 \text{ Mg C ha}^{-1}$ na camada de 0-100 cm durante o período de 20 anos.

Foram estudados os desdobramentos das interações avaliadas para descrever o comportamento do C orgânico (g kg^{-1}) em função das profundidades (0-10, 10-20, 20-60, 60-100 cm) e da MUT (**Figura 2**). A área de cana-de-açúcar que teve como uso anterior a pastagem apresentou menores valores de C orgânico nas camadas de 0-10 e 10-20 cm em relação ao pasto estabelecido. Esses resultados são consistentes aos obtidos por Sá et al. (2001), em que as maiores variações no conteúdo de C orgânico ocorreram na camada superficial em áreas sob plantio direto com outras culturas. Com relação à concentração de C orgânico no perfil do solo, observou-se também, uma redução significativa do C orgânico na camada de 60-100 cm em relação às camadas superiores. Quanto à conversão de cultura anual para cana-de-açúcar, não foi notado efeito algum em função das profundidades e da MUT.

CONCLUSÕES

1. A conversão (MUT) de pastagem para cana-de-açúcar resulta na depleção dos estoques de C

do solo. Em contraste, não há diferença significativa quando a cultura anual é convertida em cana.

2. Este estudo é um importante subsídio para a formulação de políticas públicas que visam à expansão da cana-de-açúcar de forma sustentável.

AGRADECIMENTOS

Ao Projeto CarbCana (Embrapa Monitoramento por Satélite) pelo suporte financeiro para a execução deste trabalho e ao CNPq (Processo 142232/2012-2) pela concessão da bolsa de doutorado ao primeiro autor.

REFERÊNCIAS

- ADAMI, M., et al. Remote Sensing Time Series to Evaluate Direct Land Use Change of Recent Expanded Sugarcane Crop in Brazil. *Sustainability*, 4:574-585, 2012.
- BORDONAL, R. O., et al. Greenhouse gas balance due to the conversion of sugarcane areas from burned to green harvest, considering other conservationist management practices. *Global Change Biology Bioenergy*, 4:846-858, 2012.
- BÖRJESSON, P. Good or bad bioethanol from a greenhouse gas perspective – What determines this? *Applied Energy*, 86:589-594, 2009.
- CARVALHO, J. L. N., et al. Carbon sequestration in agricultural soils in the Cerrado region of the Brazil. *Amazon. Soil and Tillage Research*, 103:342-349, 2009.
- CERRI, C. C., et al. Effect of sugarcane harvesting systems on soil carbon stocks in Brazil: an examination of existing data. *European Journal of Soil Science*, 62:23-28, 2011.
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar - Safra 2015/2016. Disponível em: <www.conab.gov.br>. Acesso em 25 maio 2015.
- DE FIGUEIREDO, E. B., et al. Short-term CO_2 -C emissions from soil prior to sugarcane (*Saccharum spp.*) replanting in southern Brazil. *Global Change Biology Bioenergy*, 7:316-327, 2015.
- EMBRAPA. Manual de Métodos de Análise de Solos. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de solos. 2.ed., 210 p., 1997.
- FARGIONE, J., et al. Land Clearing and the Biofuel Carbon Debt. *Science*, 319:1235-1238, 2008.
- GOLDEMBERG, J., et al. Meeting the global demand for biofuels in 2021 through sustainable land use change policy. *Energy Policy*, 69:14-18, 2014.
- LAPOLA, D. M., et al. Indirect land-use changes can overcome carbon savings from biofuels in Brazil. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107:3388-3393, 2010.
- MCT - Ministério da Ciência e Tecnologia. Segunda Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. 520 p., 2010.

- MELLO, F. F. C., et al. Payback time for soil carbon and sugar-cane ethanol. *Nature climate change*, 4:605-609, 2014.
- MORAES, J. F. L., et al. Soil properties under Amazon forest and changes due to pasture installation in Rondonia. *Geoderma*, 70:63-81, 1996.
- SÁ, J. C. M., et al. Organic Matter Dynamics and Carbon Sequestration Rates for a Tillage Chronosequence in a Brazilian Oxisol. *Soil Science Society of America Journal*, 65:1486-1499, 2001.
- SEGNINI, A., et al. Carbon stock and humification index of organic matter affected by sugarcane straw and soil management. *Scientia Agricola*, 70:321-326, 2013.
- VELDKAMP, E. Organic Carbon Turnover in Three Tropical Soils under Pasture after Deforestation. *Soil Science Society of America Journal*, 58:175-180, 1994.

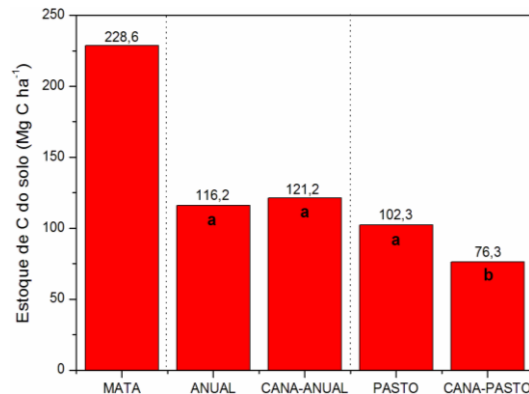


Figura 1 – Estoques de carbono do solo (em Mg C ha⁻¹) na camada de 0-100cm devido à conversão (mudança do uso da terra; MUT) de pastagem e cultura anual para o agrossistema cana-de-açúcar na região de Mococa (SP), Brasil. Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

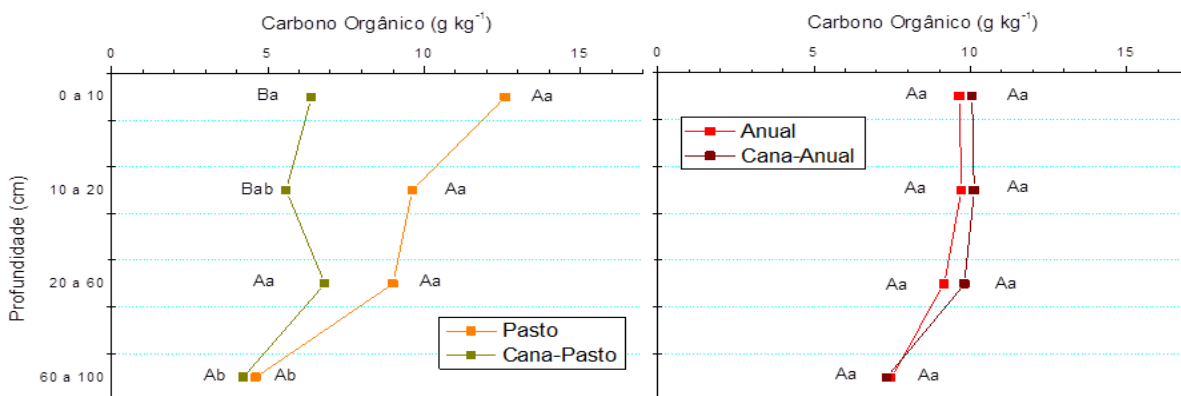


Figura 2 – Variação do carbono orgânico (g kg⁻¹) nas camadas de 0-10, 10-20, 20-60 e 60-100 cm, devido à conversão (mudança do uso da terra; MUT) de pastagem e cultura anual para o agrossistema cana-de-açúcar na região de Mococa (SP), Brasil. Médias seguidas de letras maiúsculas diferentes indicam diferença entre o uso da terra (culturas) e médias seguidas de letras minúsculas diferentes indicam diferença entre as profundidades pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 1 – Descrição do manejo agrícola associado aos pares amostrais avaliados antes e depois da mudança do uso da terra (MUT) para cana-de-açúcar na região de Mococa (SP), Brasil.

Par amostral ⁷¹	Uso anterior	Descrição do manejo	Uso atual	Tempo de conversão (anos)	Descrição do manejo
1	Cultura anual (Pivô Central)	Preparo intensivo do solo (2 vezes ao ano), rotação de culturas com hortaliças e milho	Cana-de-açúcar	7	Colheita mecanizada sem queima, com preparo convencional do solo a cada 5 anos
2	Pastagem	Degradada, sem preparo do solo nos últimos 10 anos	Cana-de-açúcar	8	5 anos de colheita manual com queima e 3 anos de colheita mecanizada sem queima, com preparo convencional do solo a cada 5 anos

⁷¹ Amostragem realizada em 22 de abril de 2013.