

Indicadores de qualidade do solo em cultivos irrigados de cana-de-açúcar

Letícia Silva de Almeida⁽¹⁾, Verônica Aparecida Santos Ferreira⁽¹⁾, Luiz Arnaldo Fernandes⁽¹⁾, Leidivan Almeida Frazão⁽¹⁾, Agda Loureiro Gonçalves Oliveira⁽¹⁾ e Reginaldo Arruda Sampaio⁽¹⁾

⁽¹⁾Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Ciências Agrárias, Campus Regional de Montes Claros, Avenida Universitária, nº 1.000, Bairro Universitário, CEP 39404-547 Montes Claros, MG, Brasil. E-mail: leticiasilvaalmeida@yahoo.com.br, veronicaasf@yahoo.com.br, luizmcmg@gmail.com, leidivan.frazao@gmail.com, agdaloureiro@gmail.com, reginaldo@terra.com.br

Resumo – O objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos da mudança de uso da terra na dinâmica do carbono orgânico, no nitrogênio total e em atributos microbiológicos do solo ao longo do tempo, em cultivos irrigados de cana-de-açúcar. Os sistemas foram avaliados em quatro áreas com cana-de-açúcar, numa cronosequência com 5, 7, 8 e 9 anos de cultivo, além de uma área com vegetação nativa. As amostras foram analisadas quanto ao estoque de C e N e quanto às propriedades microbiológicas do solo. O sistema com 8 anos apresentou os maiores valores de C na biomassa microbiana e de respiração basal, bem como os menores de quociente metabólico (qCO_2). Já os maiores valores de estoque de C e N foram observados na área com vegetação nativa. Estes resultados estão associados à deposição constante de serrapilheira e à intensa atividade biológica na vegetação nativa. A deposição de palhada de cana-de-açúcar sobre a superfície, ao longo do tempo, melhorou a qualidade do solo e manteve os estoques de C e N semelhantes aos observados na área de vegetação nativa.

Termos para indexação: bioindicadores, biomassa microbiana, dinâmica da matéria orgânica, quociente metabólico, quociente microbiano, respiração basal do solo.

Soil quality indicators in irrigated sugarcane crops

Abstract – The objective of this work was to evaluate the effects of land use change on the dynamics of organic carbon, on total nitrogen, and on microbial soil properties over time, in irrigated sugarcane crops. The systems were evaluated in four areas with sugarcane in a chronosequence of 5, 7, 8, and 9 years of cultivation, besides a native vegetation area. The soil samples were analyzed for C and N stocks, and for the microbiological properties of the soil. The system with 8 years showed the highest C values of microbial biomass and basal respiration, and the lowest ones for microbial metabolic quotient (qCO_2). The highest values of C and N stocks were observed in the native vegetation area. These results are associated with the constant deposition of litter and intense biological activity in the native vegetation. The deposition of sugarcane straw on the soil surface, over time, improved soil quality and kept the soil stocks of C and N similar to those observed in the native vegetation area.

Index terms: bioindicators, microbial biomass, organic matter dynamics, microbial metabolic quotient, microbial quotient, soil basal respiration.

Introdução

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo e o pioneiro na produção de etanol, o que coloca o País numa posição privilegiada no mercado mundial de biocombustíveis (Kohlhepp, 2010). A produção de etanol a partir da cana-de-açúcar, no Brasil, se concentra nas seguintes regiões: Sudeste, com 59,82% do total produzido no país; Centro-Oeste, 27,06%; Nordeste, 7,93%; Sul, 4,38%; e Norte, 0,81% (Acompanhamento..., 2015).

Atualmente, há uma significativa expansão na área agrícola ocupada com cana, graças ao crescimento da demanda interna e externa por etanol (Walter et al., 2008). Para atingir as metas nacionais de produção, consumo e exportação de etanol previstas para 2020, a área de cultivo com cana-de-açúcar deverá atingir o expressivo patamar de 19 milhões de hectares (Cerri et al., 2010). Este número denota a importância de se avaliar os impactos desse cultivo sobre a qualidade do solo, especialmente em cenários com aplicação de novas tecnologias para aumentar a produtividade da cultura.

A conversão da vegetação nativa (VN) em monocultivos provoca mudanças potencialmente danosas às características físicas, químicas e biológicas do solo. O processo de revolvimento do solo, caracterizado pelo sistema de plantio convencional, acelera os processos biológicos de oxidação com consumo da matéria orgânica estocada e consequente perda da capacidade produtiva do solo (Moreira & Siqueira, 2006; Ferreira et al., 2007).

Para avaliar a dinâmica da matéria orgânica do solo e a sustentabilidade do manejo adotado, são utilizados atributos sensíveis às mudanças ocorridas no solo, como biomassa microbiana, atividade microbiana e o C orgânico do solo (Marchiori Júnior & Melo, 2000; Costa et al., 2008). Vários autores, como Souza et al. (2006), Paredes Júnior (2012), Signor et al. (2014), utilizam os teores e os estoques de C e N como indicadores de qualidade do solo, a fim de identificar as alterações causadas pela manutenção dos resíduos vegetais sobre o solo, na cultura da cana-de-açúcar, assim como as alterações da substituição da VN por monocultivos. Segundo Chaer & Tótola (2007), a utilização de bioindicadores pode facilitar o entendimento sobre a dinâmica do C em sistemas cultivados.

O objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos da mudança de uso da terra sobre a dinâmica do C orgânico, N total e atributos microbiológicos do solo, ao longo do tempo, em cultivos irrigados de cana-de-açúcar.

Material e Métodos

O trabalho foi realizado em área de cultivo de cana-de-açúcar irrigada por sistema de pivô central, no Município de Jaíba, região norte do Estado de Minas Gerais, a 15°11'58,29"S e 43°56'16,83"W.

O clima da região, de acordo com a classificação de Köppen-Geiger, é do tipo Aw – tropical com inverno e verão secos, com temperatura média anual de 28 °C e precipitação pluvial média de 750 mm anuais, concentrada nos meses de novembro a janeiro. O solo das áreas de estudo é classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, de textura média, e a vegetação classificada como Floresta Estacional Decidual (Levantamento..., 1979; Scolforo et al., 2008).

De acordo com o histórico da área, foram selecionadas quatro áreas de cana-de-açúcar, em cronossequência com 5, 7, 8 e 9 anos de cultivo, que compunham, respectivamente, os sistemas Cana 5,

Cana 7, Cana 8 e Cana 9. Em razão da concentração das chuvas nos meses de novembro a janeiro e do elevado déficit hídrico na região (Borges Júnior et al., 2008), os cultivos de cana-de-açúcar são irrigados via pivô central, com água do Rio São Francisco. Além disso, selecionou-se, ainda, uma área com VN, adjacente aos cultivos de cana-de-açúcar, para representar a condição natural do solo.

Acolheita da cana-de-açúcar foi feita mecanicamente, e as quantidades de palhada depositadas nos sistemas foram diferentes, pois a maior parte era utilizada por uma usina para cogeração de energia para abastecer as caldeiras. A seguir serão apresentados os sistemas selecionados.

O sistema Cana 5 foi implantado no ano de 2009, logo após a retirada da VN, e a última colheita foi realizada no mês de novembro de 2013, tendo-se deixado cerca de 20% da palhada, aproximadamente 5 Mg ha⁻¹ de palha, sobre a superfície do solo. A cultivar de cana-de-açúcar utilizada foi a RB867515.

O sistema Cana 7 foi implantado em 2007, em área que havia sido desmatada em 2006 e cultivada com feijoeiro. Em 2013, o canavial foi reformado, tendo-se utilizado a cultivar RB867515. Na época da coleta das amostras, o primeiro corte do segundo cultivo ainda não havia sido realizado nessa área.

O sistema Cana 8 foi implantado logo após o desmatamento de uma área cultivada com pimentão em 2006. O canavial foi reformado em 2011, tendo-se utilizado a cultivar SP801816. A colheita foi realizada em setembro de 2013, tendo-se deixado 50% da palhada sobre o solo, aproximadamente 12 Mg ha⁻¹ de palha.

O sistema Cana 9 foi implantado em 2005, imediatamente após o desmatamento da VN. A reforma do canavial ocorreu em 2012, e a cultivar utilizada foi a SP801842. A última colheita aconteceu em agosto de 2013, tendo-se deixado 20% da palhada sobre a superfície do solo, aproximadamente 5 Mg ha⁻¹ de palha, e o restante foi retirado da área para a utilização nas caldeiras da usina.

Em todos os cultivos de cana-de-açúcar, utilizou-se o preparo convencional do solo, com arações, gradagens e correção da acidez pela utilização de calcário, de acordo com os resultados da análise de solo, para elevar a saturação por bases a 60%. A cada novo plantio de cana-de-açúcar, aplicaram-se 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅ no fundo do sulco, na camada de 0,40–0,50 m de profundidade, em

razão da baixa disponibilidade natural de P dos solos. As fontes de P foram fertilizantes formulados NPK, com variações, ao longo dos anos, da proporção de N e K das fórmulas utilizadas. As complementações de adubação com N e K foram feitas via fertirrigação, de modo a se aplicar em média, conforme o desenvolvimento das plantas, 120 kg ha⁻¹ de N e 120 kg ha⁻¹ de K₂O, na forma de ureia e cloreto de potássio, respectivamente. Após o corte, na adubação da soqueira, aplicavam-se 120 kg ha⁻¹ de N, 25 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 120 kg ha⁻¹ de K₂O, com o adubo formulado N-P₂O₅-K₂O 20-05-20. Todas as adubações em cobertura foram realizadas por meio de água de irrigação.

A amostragem do solo, para a caracterização física, química e análises biológicas, foi realizada no período chuvoso, em janeiro de 2014. Abriram-se minitrincheiras para a coleta das amostras, que foram retiradas às profundidades de 0,0–0,10, 0,10–0,20, 0,20–0,30 m de solo. Para cada profundidade, coletaram-se seis amostras compostas, constituídas pela homogeneização de seis amostras simples, retiradas nas linhas e na entrelinhas de plantio. Em análises anteriores, para o manejo da fertilidade do solo, verificou-se que até a profundidade de 0,30 m não houve diferenças significativas entre amostras coletadas nas linhas e nas entrelinhas, uma vez que as adubações em cobertura foram feitas em área total, por meio de água de irrigação, e a adubação de plantio com P foi realizada na camada de 0,40–0,50 m de profundidade. Assim, para uma amostra composta mais homogênea, coletou-se o mesmo número de amostras simples das linhas e da entrelinhas de plantio.

O preparo das amostras para as análises biológicas consistiu da tamisação em peneiras, com abertura de malha de 2 mm, retirada de fragmentos vegetais e animais por meio da catação, determinação da umidade e sua correção para 60% da capacidade de campo, e todas as amostras foram analisadas em duplicata.

O C da biomassa microbiana do solo (Cmic) foi estimado pelo método da irradiação-extração, de acordo com Ferreira et al. (1999). A atividade microbiana foi estimada pela determinação da respiração basal do solo (RBS), obtida pela incubação das amostras em NaOH com captura do CO₂, durante 25 dias, proposto por Jenkinson & Polwson (1976) e adaptada por Silva et al. (2007). Após a realização das análises de Cmic e RBS, foram determinados o quociente metabólico (qCO₂), obtido pela razão entre RBS e Cmic e o

quociente microbiano (qMIC), pela relação entre Cmic e C orgânico total.

A determinação dos teores de C orgânico total (COT) e do N total foram realizados em duplicata, em todas as profundidades, assim, para uma mesma profundidade, realizaram-se doze análises em laboratório. As amostras foram secas ao ar, moídas, passadas em peneiras com abertura de 0,150 mm, e analisadas por combustão seca em analisador elementar Leco CN 2000 (Leco Corp., St. Joseph, MI, EUA). A relação C:N foi calculada a partir da relação entre os valores de teores de C e N.

Os estoques de C e N foram calculados por meio da multiplicação dos teores totais de cada elemento pela densidade aparente e espessura de cada camada amostrada. Para a comparação entre massas iguais de solo, foram feitas correções pela massa de solo equivalente, tendo-se utilizado como referência a densidade de solo da VN (Ellert & Bettany, 1995). O ajuste foi realizado na camada mais profunda, e consistiu em encontrar novo valor de profundidade que representasse a mesma massa de solo, em todas as áreas em que foi usado para os cálculos dos estoques de C corrigidos (Signor et al., 2014).

A análise dos dados foi realizada com o cálculo da média de cada variável, e o intervalo de confiança, pelo teste de t de Student, a 5% de probabilidade.

Resultados e Discussão

A caracterização física mostra que, nas áreas estudadas, à profundidade de 0,0–0,3 m, a textura é arenosa, exceto na área de VN, em que a textura é média (Tabela 1). A densidade do solo nas camadas mais superficiais da VN e Cana 8, foram ligeiramente menores do que nos demais sistemas, em razão da ausência do tráfico de máquinas, na VN, e pela manutenção de 50% da palhada da Cana 8 – aproximadamente 12 Mg ha⁻¹ de palha de colmos e ponteiros – conservados à superfície do solo. Observa-se que a densidade do solo pode ser um eficiente indicador de sua qualidade, uma vez que é bastante sensível ao manejo do solo e está diretamente relacionada à porosidade, à infiltração de água, ao escoamento superficial de água, ao crescimento do sistema radicular das plantas e à absorção de nutrientes (Luciano et al., 2012).

Em relação à caracterização química, em geral, houve melhoria da fertilidade do solo das áreas cultivadas em comparação ao da VN (Tabela 2), em

Tabela 1. Teores de areia, silte, argila e densidade do solo, nas áreas com sistemas de cultivo de cana-de-açúcar em cronossequência e em área com vegetação nativa.

Profundidade (m)	Areia	Silte (dag kg ⁻¹)	Argila	Densidade (kg dm ⁻³)
Cana com 5 anos de cultivo				
0,00–0,10	78	10	12	1,37
0,10–0,20	80	8	12	1,24
0,20–0,30	70	12	18	1,35
Cana com 7 anos de cultivo				
0,00–0,10	82	10	8	1,33
0,10–0,20	86	8	6	1,30
0,20–0,30	86	6	8	1,26
Cana com 8 anos de cultivo				
0,00–0,10	78	10	12	1,26
0,10–0,20	78	8	14	1,08
0,20–0,30	72	8	20	1,14
Cana com 9 anos de cultivo				
0,00–0,10	86	8	6	1,37
0,10–0,20	86	8	6	1,27
0,20–0,30	84	8	8	1,35
Vegetação nativa				
0,00–0,10	72	12	16	1,10
0,10–0,20	70	10	20	1,05
0,20–0,30	66	10	24	1,19

consequência da aplicação de corretivos da acidez e de fertilizantes minerais.

Verificaram-se diferenças significativas entre os diferentes sistemas de cultivos de cana-de-açúcar e a VN quanto aos atributos microbiológicos (Tabela 3). Os maiores valores de Cmic foram encontrados no sistema Cana 8, na camada superficial do solo 0–0,10 m, atribuídos à maior quantidade de palhada (cerca de 50%) depositada na área. Marchiori Júnior & Melo (2000), pesquisaram solos de áreas de mata natural, e de cultivo de café, milho e cana-de-açúcar, e também encontraram valores maiores de Cmic em áreas com cana-de-açúcar. Segato et al. (2006) associam esses resultados às características intrínsecas do sistema radicular da cana-de-açúcar, que exsuda e proporciona um ambiente rizosférico rico em compostos orgânicos de fácil mineralização. O menor valor de Cmic foi observado no sistema Cana 7 e pode estar associado às condições limitantes, específicas para o desenvolvimento da biomassa microbiana do solo, como o teor dos resíduos orgânicos presentes na área do sistema Cana 7. Neste sistema, não havia palhada sobre o solo à época de coleta das amostras, pois não

Tabela 2. Caracterização química do solo de áreas com cultivo de cana-de-açúcar em cronossequência e em área com vegetação nativa.

Profundidade (m)	pH água	P	K	S	Ca	Mg	Al	H + Al	SB	T	V (%)
		(mg dm ⁻³)			(cmol _c dm ⁻³)						
Cana com 5 anos de cultivo											
0,00–0,10	6,5	13,3	89,0	8,8	2,3	1,0	0,0	1,4	3,7	5,1	73
0,10–0,20	6,3	4,5	39,0	7,9	1,9	0,8	0,0	1,4	2,8	4,2	67
0,20–0,30	6,2	4,7	30,0	7,1	1,9	0,9	0,0	1,4	3,0	4,4	69
Cana com 7 anos de cultivo											
0,00–0,10	7,8	42,6	43,0	8,3	2,9	1,2	0,0	0,8	4,3	5,2	84
0,10–0,20	7,9	14,1	48,0	4,5	1,9	0,9	0,0	0,8	3,0	3,8	78
0,20–0,30	7,1	18,3	26,0	4,6	1,5	0,7	0,0	1,0	2,4	3,4	70
Cana com 8 anos de cultivo											
0,00–0,10	5,4	17,6	88,0	11,4	2,2	1,2	0,0	2,1	3,7	5,9	64
0,10–0,20	5,5	16,0	56,0	9,5	2,2	1,0	0,0	2,1	3,5	5,6	62
0,20–0,30	5,0	24,6	58,0	9,2	1,7	0,7	0,1	2,4	2,6	5,0	52
Cana com 9 anos de cultivo											
0,00–0,10	7,6	100,1	102,0	9,7	5,1	1,2	0,0	0,8	6,7	7,5	89
0,10–0,20	7,2	22,1	57,0	9,4	3,0	1,3	0,0	0,9	4,6	5,6	83
0,20–0,30	6,9	25,4	65,0	6,2	2,3	1,0	0,0	1,0	3,5	4,6	77
Vegetação nativa											
0,00–0,10	5,5	2,6	61,0	14,5	1,8	0,5	0,1	3,2	2,8	6,0	47
0,10–0,20	5,1	1,2	54,0	12,3	1,1	0,2	0,6	3,2	1,6	4,7	33
0,20–0,30	4,8	2,8	48,0	5,7	0,9	0,2	1,1	3,5	1,3	4,8	27

havia sido realizado o primeiro corte da cana-de-açúcar plantada no ano anterior.

Nos sistemas Cana 5 e Cana 9, não houve diferenças significativas em comparação à VN, quanto ao Cmic (Tabela 3), o que indica que esses sistemas de cultivo garantem o funcionamento da atividade biológica do solo, semelhantemente ao da VN. É importante destacar que a biomassa microbiana e sua atividade no solo são indicadores sensíveis às mudanças de uso do solo, uma vez que representa a parte viva e mais ativa da matéria orgânica, ou seja, alterações significativas da biomassa podem ser percebidas antes das alterações da matéria orgânica total, o que possibilita a adoção de estratégias de manejo para garantir a qualidade do solo (Moreira & Siqueira, 2006).

Tabela 3. Carbono da biomassa microbiana (Cmic), respiração basal, quociente microbiano (qCO₂) e relação Cmic e carbono total (C_{mic}:C_{total}), em áreas de cronossequências de cana-de-açúcar e em vegetação nativa⁽¹⁾.

Sistema ⁽²⁾	Profundidade (m)		
	0,00–0,10	0,10–0,20	0,20–0,30
Cmic (mg C microbiano kg ⁻¹)			
Cana 5	103,46bA	102,95abA	83,26aA
Cana 7	35,71cB	102,61abA	80,57cA
Cana 8	218,95aA	181,11aA	195,29aA
Cana 9	124,75bA	94,81bA	80,59bA
Vegetação nativa	148,84bA	180,82aA	136,36abA
Respiração basal (mg C-CO ₂ k ⁻¹ solo h ⁻¹)			
Cana 5	0,06abA	0,07aA	0,08aA
Cana 7	0,05bA	0,03aA	0,06aA
Cana 8	0,04bB	0,07aA	0,03aB
Cana 9	0,08aA	0,08aA	0,07aA
Vegetação nativa	0,09aA	0,10aA	0,05aA
qCO ₂ (mg C-CO ₂ g ⁻¹ Cmic h ⁻¹)			
Cana 5	0,48bA	0,74abA	0,92aA
Cana 7	1,81aA	0,39bB	0,76abAB
Cana 8	0,18cAB	0,36bA	0,14bB
Cana 9	0,70bA	0,89aA	1,03aA
Vegetação nativa	0,56bA	0,47bA	0,38abA
C _{mic} :C _{total} (%)			
Cana 5	1,37bA	1,40bA	1,39aA
Cana 7	0,50cB	1,77abA	1,69aA
Cana 8	2,30aA	1,79aA	2,30aA
Cana 9	1,33bA	0,96bA	1,46aA
Vegetação nativa	1,11bA	1,81a	2,60aA

⁽¹⁾Médias seguidas de letras iguais, maiúsculas nas linhas e minúsculas nas colunas, não diferem pelo teste de t de Student, a 5% de probabilidade.

⁽²⁾Cana 5, cinco anos de cultivo de cana-de-açúcar; Cana 7, sete anos de cultivo; Cana 8, oito anos de cultivo; e Cana 9, nove anos de cultivo.

Assim como observado para o Cmic, não houve diferenças significativas entre os sistemas quanto à RBS. No entanto, os valores encontrados foram um pouco maiores no solo sob VN (Tabela 3), em razão do aporte constante de serapilheira, com acúmulo de matéria orgânica no solo (Tabela 4), e a maior atividade biológica sobre esse material. Esses resultados corroboram os de Silva et al. (2012), que também encontraram maiores valores de respiração basal do solo em três fragmentos florestais, em comparação a áreas de agricultura anual e perene. A maior liberação de CO₂ em áreas de VN, associada a maiores teores de C, indica constante deposição e mineralização de serrapilheira, com acúmulo de matéria orgânica que promove elevada biomassa microbiana e atividade biológica.

Os menores valores de quociente metabólico ou respiratório (qCO₂) foram observados no sistema Cana 8 (Tabela 3), na camada superficial do solo. E os maiores valores de qCO₂ foram observados no sistema Cana 7, à profundidade de 0,0–0,10 m. De acordo com De-Polli & Pimentel (2005), quanto menor o qCO₂, mais eficiente é a biomassa microbiana no uso de C, e menores são as perdas na forma de CO₂. Assim, os resultados obtidos permitem inferir que no sistema Cana 7 havia uma pequena população microbiana, com elevadas taxas de respiração. Este resultado indica que as condições ambientais em que a biomassa microbiana gasta mais C para sua manutenção podem ser desfavoráveis (Souza et al., 2006). Essas condições podem ser resultantes da quantidade (Tabela 4) e da qualidade da matéria orgânica disponível, uma vez que no sistema Cana 7 ainda não havia sido realizado nenhum corte e, conseqüentemente não havia deposição de palhada, após o último plantio da cana-de-açúcar, no ano anterior à coleta das amostras de solo para análise. Portanto, assim como relatado por De-Polli & Pimentel (2005), pode-se inferir que o qCO₂ é um indicador sensível para estimar a atividade biológica e a qualidade do substrato.

A relação Cmic:Ctotal (qMIC) apresentou valores significativamente superiores, no sistema Cana 8 (Tabela 3), à profundidade de 0,0–0,10 m, do que os demais sistemas e profundidades. Maiores valores de quociente microbiano significam que o C orgânico encontra-se mais facilmente acessível para a microbiota do solo. Portanto, o qMIC é um indicador de qualidade e da disponibilidade da matéria orgânica do solo para

os microrganismos que se encontram muito ativos e sujeitos a transformações no solo. Pode-se, assim, inferir que solos que exibem valores menores de qMIC podem expressar ocorrência de perda de C e redução de sua dinâmica no solo (De-Polli & Pimentel, 2005; Sampaio et al., 2008; Matias et al., 2009).

Embora sem diferença significativa, todos os sistemas e profundidades, exceto Cana 7 e Cana 9 (Tabela 3), nas camadas de 0,0–0,10 e 0,10–0,20 m de profundidade, respectivamente, apresentaram valores

superiores a 1% de qMIC, o que indica possível acréscimo de C no solo ao longo do tempo. Jenkinson & Ladd (1981) relatam que, em condições normais, o qMIC corresponde de 1 a 4% do C orgânico total. Segundo Silva et al. (2012), valores de qMIC inferiores a 1% podem estar relacionados a algum fator limitante à atividade da biomassa microbiana, como observado no sistema Cana 7, que apresentou menores teores de COT (Tabela 4).

Os teores de COT total variaram de 5,73 a 13,60 g kg⁻¹ (Tabela 4) e foram significativamente superiores no sistema VN, à profundidade de 0,0–0,10 m, do que nos demais sistemas estudados. Souza et al. (2006) e Hickmann & Costa (2012) também encontraram maiores teores de C em áreas de vegetação nativa, em comparação à pastagem, ao plantio direto e ao convencional. Para Costa et al. (2008), os menores teores e estoques de C, no cultivo convencional, estão associados à incorporação dos resíduos ao solo na camada arável, durante o preparo, que promove maior aeração, aumento da temperatura na camada revolvida, ruptura dos agregados e consequente exposição da MOS à ação de microrganismos.

Em geral, não se observaram diferenças significativas entre os sistemas quanto ao estoque de C (Tabela 4). No entanto, independentemente do sistema, houve redução dos estoques de C com a profundidade. Por isso, quando se comparam os sistemas estudados com a VN, pode-se inferir que o manejo adotado nos sistemas tem contribuído para a conservação do estoque de C ao longo do tempo.

Os sistemas Cana 9 e Cana 8 apresentaram os maiores valores de estoque de C do que os demais sistemas com cana-de-açúcar (Tabela 4). Isto indica que a manutenção da palhada sobre o solo, ao longo do tempo, aumenta o potencial do solo de estocar C, o que pode ser comprovado pelo aumento gradativo dos estoques de C desde o sistema Cana 5 até o sistema Cana 9, à profundidade de 0,0–0,20 m. Os resultados encontrados nos sistemas com maior tempo de utilização da área foram os que mais se aproximaram dos valores encontrados por Luca et al. (2008), que avaliaram o estoque de C em solos arenosos, sob cultivo de cana-de-açúcar, sem queima da palhada.

Os teores de N variaram de 0,24 a 1,08 Mg ha⁻¹ (Tabela 4), em que a área sob VN, à profundidade de 0,0–0,10 e 0,10–0,20 m foi significativamente superior aos demais sistemas estudados, e um fator

Tabela 4. Teores de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT), estoques de carbono e nitrogênio e relação C:N, em áreas de cronossequências de cana-de-açúcar⁽¹⁾.

Sistema ⁽²⁾	Profundidade (m)		
	0,0–0,10	0,10–0,20	0,20–0,30
	COT (g kg ⁻¹)		
Cana 5	7,67bcA ⁽²⁾	7,49bA	6,31bA
Cana 7	7,23cA	5,71bB	4,86cB
Cana 8	9,19bA	10,14aA	8,42aA
Cana 9	9,02bA	9,64abA	5,73bB
Vegetação nativa	13,60aA	10,17aA	6,72abB
	Estoque de C (Mg ha ⁻¹)		
Cana 5	10,53bA	9,31abA	4,49bB
Cana 7	9,61bA	7,41bB	3,55bC
Cana 8	11,57bA	10,96aA	8,45aB
Cana 9	12,37abA	12,20aA	3,97bB
Vegetação nativa	15,01aA	10,66aB	7,99abB
	NT (g kg ⁻¹)		
Cana 5	0,34bA	0,42bA	0,24bA
Cana 7	0,40bA	0,43bA	0,45aA
Cana 8	0,45bA	0,40bA	0,39abA
Cana 9	0,42bAB	0,54bA	0,29bB
Vegetação nativa	1,08aA	0,86aB	0,55aB
	Estoque de N (Mg ha ⁻¹)		
Cana 5	0,47bA	0,53bA	0,17cB
Cana 7	0,53bA	0,55bAB	0,33abB
Cana 8	0,57bA	0,43bA	0,39abA
Cana 9	0,58bA	0,69abA	0,20cB
Vegetação nativa	1,19aA	0,90aB	0,66aB
	Relação C:N		
Cana 5	23,26aA	21,50aA	29,40aA
Cana 7	18,33aA	14,70abAB	11,00bB
Cana 8	21,77aA	27,38aA	22,56aA
Cana 9	26,86aA	18,53abA	19,83aA
Vegetação nativa	12,71aA	11,90bA	12,87bA

⁽¹⁾Médias seguidas de letras iguais, maiúsculas nas linhas e minúsculas nas colunas, não diferem entre si, pelo teste de t de Student, a 5% de probabilidade. ⁽²⁾Cana 5, cinco anos de cultivo; Cana 7, sete anos de cultivo; Cana 8, oito anos de cultivo; Cana 9, nove anos de cultivo; VN, área de vegetação nativa

que pode ter contribuído para esse aumento foi a presença de leguminosas fixadoras de N_2 . Áreas de vegetação nativa também apresentaram maiores teores de N no estudo de Leite et al. (2013), que avaliaram a qualidade química e os compartimentos de C do solo em monocultivos, sistemas consorciados e pastagem no Cerrado maranhense.

No presente trabalho, verificou-se maior valor de estoque de N no solo sob vegetação nativa, na camada superficial (0,0–0,10 m), em comparação aos valores observados nos demais sistemas e profundidades avaliadas (Tabela 4). Leite et al. (2013) também observaram maiores valores de estoque de N e C em áreas de cerrado nativo, em comparação aos sistemas de plantio convencional e cultivos consorciados. Todavia, Campos et al. (2013) encontraram, em geral, valores semelhantes de estoque de C e N, em solo sob plantio convencional e cerrado nativo. Contudo, esses autores encontraram maiores valores de estoque de C e N no solo sob plantio direto do que no solo sob cerrado nativo. De acordo com os autores, os maiores estoques de C e N no sistema de plantio direto ocorrem em consequência do maior acúmulo de matéria orgânica e de maior estabilidade das frações húmicas; portanto, eles afirmam que o plantio direto pode ser uma estratégia para mitigar as emissões de CO_2 para a atmosfera.

Não se observaram diferenças significativas entre os sistemas e as profundidades quanto à relação C:N (Tabela 4). Na área sob VN, a relação C:N foi menor do que 20, em todas as profundidades avaliadas. Este resultado indica a presença de matéria orgânica muito ativa no solo, em que predominam o processo de mineralização, em relação à imobilização, e o consequente aumento da disponibilidade de nutrientes para as plantas. O sistema Cana 7 também apresentou relação C:N menor do que 20, em consequência da redução dos teores de C, pois, não se realizou a colheita do segundo plantio para deposição de palhada no solo. Ao contrário do C, o N pode ter aumentado, em consequência da atividade microbiana e da rápida decomposição da matéria orgânica, o que favoreceu o processo de mineralização, promovido pelo revolvimento do solo durante a reforma do canavial. Nos sistemas Cana 5 e Cana 8, a relação C:N ficou entre 20 e 30; esses valores maiores expressam um tempo maior de permanência do material orgânico no

solo, em razão da manutenção da palhada (Moreira & Siqueira, 2006).

Conclusões

1. Em áreas cultivadas com cana-de-açúcar irrigada, mesmo com a manutenção de apenas 20% da palhada sobre a superfície do solo há melhoria da qualidade do solo, logo após a primeira colheita.

2. Ao longo do tempo, a deposição de palhada da cana-de-açúcar irrigada sobre a superfície do solo mantém os estoques de carbono e nitrogênio do solo semelhantes àqueles encontrados em áreas de vegetação nativa.

Agradecimentos

A Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro.

Referências

- ACOMPANHAMENTO DA SAFRA BRASILEIRA [DE] CANA-DE-AÇÚCAR: Safra 2014/15. Brasília, v.1, n.4, 2015.
- BORGES JÚNIOR, J.C.F.; FERREIRA, P.A.; HEDDEN-DUNKHORST, B.; ANDRADE, C. de L.T. Modelo computacional para suporte à decisão em áreas irrigadas. Parte I: desenvolvimento e análise de sensibilidade. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, p.3-11, 2008. DOI: 10.1590/S1415-43662008000100001.
- CAMPOS, L.P.; LEITE, L.F.C.; MACIEL, G.A.; BRASIL, E.L.; IWATA, B. de F. Estoques e frações de carbono orgânico em Latossolo Amarelo submetido a diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.48, p.304-312, 2013. DOI: 10.1590/S0100-204X2013000300009.
- 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. de 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 Agrícola**, v.67, p.102-116, 2010. DOI: 10.1590/S0103-90162010000100015.
- CHAER, G.M.; TÓTOLA, M.R. Impacto do manejo de resíduos orgânicos durante a reforma de plantios de eucalipto sobre indicadores de qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.1381-1396, 2007. DOI: 10.1590/S0100-06832007000600016.
- COSTA, F. de S.; BAYER, C.; ZANATTA, J.A.; MIELNICZUK, J. Estoque de carbono orgânico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no Sul do Brasil.

- Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.323-332, 2008. DOI: 10.1590/S0100-06832008000100030.
- DE-POLLI, H.; PIMENTEL, M.S. Indicadores de qualidade do solo. In: AQUINO, A.M. de; ASSIS, R.L. de. (Ed.). **Processos biológicos no sistema solo-planta**: ferramentas para uma agricultura sustentável. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2005. p.17-28.
- ELLERT, B.H.; BETTANY, J.R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. **Canadian Journal of Soil Science**, v.75, p.529-538, 1995. DOI: 10.4141/cjss95-075.
- FERREIRA, A.S.; CAMARGO, F.A.O.; VIDOR, C. Utilização de microondas na avaliação da biomassa microbiana do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.991-996, 1999. DOI: 10.1590/S0100-06831999000400026.
- FERREIRA, E.A.B.; RESCK, D.V.S.; GOMES, A.C.; RAMOS, M.L.G. Dinâmica do carbono da biomassa microbiana em cinco épocas do ano em diferentes sistemas de manejo do solo no Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.1625-1635, 2007. DOI: 10.1590/S0100-06832007000600038.
- HICKMANN, C.; COSTA, L.M. da. Estoque de carbono no solo e agregados em Argissolo sob diferentes manejos de longa duração. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, p.1055-1061, 2012. DOI: 10.1590/S1415-43662012001000004.
- JENKINSON, D.S.; LADD, J.N. Microbial biomass in soil: measurement and turnover. In: PAUL, E.A.; LADD, J.N. (Ed.). **Soil biochemistry**. New York: Marcel Dekker, 1981. p.415-471.
- JENKINSON, D.S.; POWLSON, D.S. The effect of biocidal treatments on metabolism in soil. V: a method of measuring soil biomass. **Soil Biology and Biochemistry**, v.8, p.209-213, 1976. DOI: 10.1016/0038-0717(76)90005-5.
- KOHLHEPP, G. Análise da situação da produção de etanol e biodiesel no Brasil. **Estudos Avançados**, v.24, p.223-253, 2010. DOI: 10.1590/S0103-40142010000100017.
- LEITE, L.F.C.; ARRUDA, F.P. de; COSTA, C. do N.; FERREIRA, J. da S.; HOLANDA NETO, M.R. Qualidade química do solo e dinâmica de carbono sob monocultivo e consórcio de macaúba e pastagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, p.1257-1263, 2013. DOI: 10.1590/S1415-43662013001200002.
- LEVANTAMENTO exploratório: reconhecimento de solos do norte de Minas Gerais: área de atuação da Sudene. Recife, 1979. 407p. (Embrapa-SNLCs. Boletim técnico, 60; Sudene – DRN. Série Recursos de Solos, 12).
- LUCA, E.F. de; FELLER, C.; CERRI, C.C.; BARTHÈS, B.; CHAPLOT, V.; CAMPOS, D.C.; MANECHINI, C. Avaliação de atributos físicos e estoques de carbono e nitrogênio em solos com queima e sem queima de canavial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.789-800, 2008. DOI: 10.1590/S0100-06832008000200033.
- LUCIANO, R.V.; ALBUQUERQUE, J.A.; COSTA, A. da; BATISTELLA, B.; WARMLING, M.T. Atributos físicos relacionados à compactação de solos sob vegetação nativa em região de altitude no Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.1733-1744, 2012. DOI: 10.1590/S0100-06832012000600007.
- MARCHIORI JÚNIOR, M.; MELO, W.J. de. Alterações na matéria orgânica e na biomassa microbiana em solo de mata natural submetido a diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, p.1177-82, 2000. DOI: 10.1590/S0100-204X2000000600014.
- MATIAS, M. da C.B.S.; SALVIANO, A.A.C.; LEITE, L.F. de C.; ARAÚJO, A.S.F. Biomassa microbiana e estoques de C e N do solo em diferentes sistemas de manejo, no Cerrado do Estado do Piauí. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v.31, p.517-521, 2009. DOI: 10.4025/actasciagr.31i3.687.
- MOREIRA, F.M.S.; SIQUEIRA, J.O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2.ed. atual. e ampl. Lavras: Ed. da UFLA, 2006. 729p.
- PAREDES JÚNIOR, F.P. **Bioindicadores de qualidade do solo em cultivos de cana-de-açúcar sob diferentes manejos**. 2012. 95p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual do Mato Grosso do Sul, Aquidauana.
- SAMPAIO, D.B.; ARAÚJO, A.S.F. de; SANTOS, V.B. dos. Avaliação de indicadores biológicos de qualidade do solo sob sistemas de cultivo convencional e orgânico de frutas. **Ciência e Agrotecnologia**, v.32, p.353-359, 2008. DOI: 10.1590/S1413-70542008000200001.
- SCOLFORO, J.R.; OLIVEIRA, A.D. de; CARVALHO, L.M.T. de (Ed.). **Zoneamento ecológico-econômico do Estado de Minas Gerais**: zoneamento e cenários exploratórios. Lavras: UFLA, 2008. 136p.
- SEGATO, S.V.; MATTIUZ, C.F.M.; MOZAMBANI, A.E. Aspectos fenológicos da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S.V.; PINTO, A. de S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J.C.M. de (Org.). **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: [s.n.], 2006. p.19-36.
- SIGNOR, D.; ZANI, C.F.; PALADINI, A.A.; DEON, M.D.I.; CERRI, C.E.P. Estoques de carbono e qualidade da matéria orgânica do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, p.1402-1410, 2014. DOI: 10.1590/S0100-06832014000500005.
- SILVA, C.F. da; PEREIRA, M.G.; MIGUEL, D.L.; FEITORA, J.C.F.; LOSS, A.; MENEZES, C.E.G.; SILVA, E.M.R. Da. Carbono orgânico total, biomassa microbiana e atividade enzimática do solo de áreas agrícolas, florestais e pastagem no Médio Vale do Paraíba do Sul (RJ). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.1680-1689, 2012. DOI: 10.1590/S0100-06832012000600002.
- SILVA, E.E. da; AZEVEDO, P.H.S. de; DE-POLLI, H. **Determinação da respiração basal (RBS) e quociente metabólico do solo (qCO₂)**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2007. (Embrapa Agrobiologia. Comunicado técnico, 99).
- SOUZA, E.D.; CARNEIRO, M.A.C.; PAULINO, H.B.; SILVA, C.A. Frações do carbono orgânico, biomassa e atividade microbiana em um Latossolo Vermelho sob cerrado submetido a diferentes sistemas de manejos e usos do solo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v.28, p.323-329, 2006. DOI: 10.4025/actasciagr.28i3.940.

WALTER, A.; DOLZAN, P.; QUILODRÁN, O.; GARCIA, J.; SILVA, C. da; PIACENTE, F.; SEGERSTEDT, A. A **sustainability analysis of the Brazilian ethanol**. Campinas: Unicamp, 2008.

Recebido em 28 de agosto de 2015 e aprovado em 22 de fevereiro de 2016