

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
CENTRO DE ENERGIA NUCLEAR NA AGRICULTURA

GÁBOR GYULA JULIUS SZAKÁCS

**Estoques de carbono e agregados do solo cultivado com cana-de-açúcar:
efeito da palhada e do clima no centro-sul do Brasil**

Piracicaba

2007

GÁBOR GYULA JULIUS SZAKÁCS

**Estoques de carbono e agregados do solo cultivado com cana-de-açúcar:
efeito da palhada e do clima no centro-sul do Brasil**

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: Energia Nuclear na Agricultura

Orientador: Prof. Carlos Clemente Cerri

Piracicaba

2007

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E 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

Szakács, Gábor Gyula Julius

Estoques de carbono e agregados do solo cultivado com cana-de-açúcar: efeito da palhada e do clima no centro-sul do Brasil / Gábor Gyula Julius Szakács; orientador Carlos Clemente Cerri. - - Piracicaba, 2007.

105 p. : il.

Tese (Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Ciências. Área de Concentração: Energia Nuclear na Agricultura) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo.

1. Efeito estufa 2. Fixação de carbono 3. Manejo ambiental 4. Matéria orgânica do solo 5. Política ambiental 6. Resíduos agrícolas I. Título

CDU 631.417.1:551.583

Dedicatória

A minha família, Maria Eugênia, Sofia e Stella,
sem vocês minha vida não seria tão bela.

e

Meinen Eltern, Hannelore und Árpád,
danke für alles was Ihr mir gelehrt habt.

“Felix qui potuit rerum cognoscere causas”

Vergil

Agradecimentos

Ao meu orientador Prof. Carlos Clemente Cerri, pela atenção e apoio durante a elaboração da tese.

Ao Centro de Agricultura na Agricultura, pela oportunidade de realização do curso de doutorado.

À CAPES, pela concessão da bolsa de doutorado.

Ao Dr. Martial Bernoux, pelo auxílio.

Ao Dr. Johan Six, pela orientação científica na área de agregados.

Ao pessoal em geral do Laboratório de Biogeoquímica Ambiental pela ajuda na análise dos dados, especificamente à Mara pela competência no cuidado das tarefas administrativas, à Sandra Nicoletti pela medição do teor de carbono; e à Lilian pela organização das análises no laboratório.

Aos estagiários, pela ajuda na preparação das amostras: Augusto, Érico, Daiane e Felipe.

Aos meus amigos e colegas do Laboratório de Biogeoquímica Ambiental, pela convivência saudável, obrigado a vocês todos!

À Usina São Martinho, pela oportunidade de amostragem de solo e fornecimento de dados, com a ajuda de Mário Gandini, Marcos Marcari, Delair Vasconcelos, Luciano das Graças, Jaime dos Anjos, Gilson Cordeiro, Roberto dos Anjos.

À Usina São Luiz de Ourinhos, pela oportunidade de amostragem de solo e fornecimento de dados com a ajuda de Dr. Manoel, Marcus Vinicius Lopes, Marcelo Pereira Mendonça e Tiago Aparecido de Barrios Marcusso.

À Usina Jalles Machado, pela oportunidade de amostragem de solo e fornecimento de dados com a ajuda de Dr. Rogério, Tiago, Edgar Alves da Silva e a equipe do campo.

À minha esposa Maria Eugênia Farré, pela revisão do português.

Ao Dr. Uwe Herpin pela amizade e incentivo científico Danke!

À Marília Henyei pela revisão das referências bibliográficas Köszönom!

A todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

SZAKÁCS, G. G. J. **Estoques de carbono e agregados do solo cultivado com cana-de-açúcar: efeito da palhada e do clima no centro-sul do Brasil. 2007.** 105 f. Tese (Doutorado) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

O estudo foi dividido em quatro partes. Na primeira parte analisou-se o impacto do clima na estocagem de carbono em solos de canaviais sem a queima da palhada. Foram escolhidos três regimes climáticos contrastantes do centro-sul do Brasil. O potencial de seqüestro de carbono orgânica no solo (COS) foi determinado, em cada regime climático, de acordo com a taxa anual de carbono remanescente no solo proveniente da palhada depositada. Para obter esta taxa, compararam-se os estoques de COS em canaviais com e sem queima da palhada. Esse ganho anual foi comparado com a entrada anual de carbono via palhada depositada. O ganho anual de COS (0-30 cm) em canaviais sem queima da palhada não resultou em diferenças significativas por clima: 1,97 Mg ha⁻¹ (clima norte), 2,00 Mg ha⁻¹ (clima centro) e 1,70 Mg ha⁻¹ (clima sul). Os regimes climáticos estudados também não revelaram diferenças significativas entre suas temperaturas e precipitações médias anuais. Porém, o aumento anual de COS um pouco menor no clima sul levou à conclusão que o potencial de seqüestro de carbono diminui ligeiramente em latitudes mais altas, devido à maior precipitação no centro-sul do Brasil. Na segunda parte avaliou-se o impacto da palhada sobre a estabilidade de agregados dos solos, que foi calculada pelo método de fracionamento proposto por Six et al. (2000a). A estabilidade de agregados no solo do canavial sem a queima da palhada aumentou,

em média, 15,3% por ano na profundidade 0-30 cm. Na terceira parte, avaliou-se a diferença da estabilidade de agregados entre canaviais e mata nativa. O solo da mata nativa mostrou uma estabilidade de agregados significativamente maior (7,2 vezes). Supõe-se que a estabilidade de agregados seja maior na mata nativa como resultado da maior presença de matéria orgânica e biota no solo. Na quarta parte avaliou-se a origem do carbono nos agregados estáveis em água de fluxo contínuo para determinar que forma de agregação possui a melhor proteção contra a decomposição de carbono. Houve uma diferença significativa de $\delta^{13}\text{C}$ entre os macroagregados e microagregados na camada superior, com 10% mais $\delta^{13}\text{C}$ nos macroagregados. Isto indica mais carbono derivado da cobertura vegetal atual (C4), ou seja, mais incorporação da palhada nos macroagregados. O $\delta^{13}\text{C}$ da fração de partículas livres ou agregados não estáveis em água de fluxo contínuo é menor em todas as profundidades, indicando que a matéria orgânica recente (C4) encontra-se no solo principalmente de forma agregada estável em água, evidenciando seu papel fundamental na estabilidade dos agregados. Constatou-se também, que quanto mais novo o macroagregado, maior o seu teor em carbono. Nos microagregados verificou-se o efeito contrário. Quanto mais velho o microagregado, maior o seu teor em carbono. Isso indica que o microagregado possui uma melhor proteção contra a decomposição de carbono, e também a capacidade de um aumento no teor de carbono, no decorrer do tempo, em virtude da assimilação de carbono mais novo. Conclui-se, que em termos de seqüestro de carbono de longa duração, é propício avaliar mecanismos de proteção do carbono recalcitrante dentro dos microagregados e estudar como técnicas agrícolas podem proteger melhor esta fração.

Palavras-chave: matéria orgânica do solo, efeito estufa, seqüestro de carbono, resíduos vegetais, cana-de-açúcar, agregados do solo

ABSTRACT

SZAKÁCS, G. G. J. **Soil carbon stocks and soil aggregation under sugar cane: the effect of green trash and climate in Central and Southern Brazil. 2007.** 105 f. Thesis (Doctoral) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

The study was divided in four parts. The first part investigated climate impact on soil carbon stocks in sugar cane fields cultivated without green trash burning. For this purpose, three contrasting climates were chosen in Central and Southern Brazil. The sequestration potential of soil organic carbon (SOC) was determined for each climate, calculating how much of the carbon derived from deposited green trash remains in the soil every year. To obtain this rate, SOC stocks of sugar cane fields cultivated with and without green trash burning were compared. The annual difference (0-30 cm) did not differ significantly between climates: 1, 97 Mg ha⁻¹ (Northern Climate), 2,00 Mg ha⁻¹ (Central Climate) and 1,70 Mg ha⁻¹ (Southern Climate). The climates did not show significant differences between their average annual temperatures and their annual precipitation. Nevertheless, a slightly smaller gain of SOC stocks in the Southern Climate leads to the conclusion that higher latitudes tend to stock slightly less COS due to higher annual precipitation. The second part evaluated the impact of green trash deposition on soil aggregate stability, which was calculated according to Six et al. (2000a). Soil aggregate stability under sugar cane fields cultivated with green trash burning had an average increase of 15,3% for soil depth 0-30 cm. The third part studied soil aggregate stability between sugar cane and natural forest vegetation. The forest soil revealed

significantly higher (7,2 times) aggregate stability, supposedly due to higher organic matter content and more soil biota. The forth part examined the origin of carbon inside water-stable aggregates to determine which aggregation form provides better protection against carbon decomposition. The top soil layer showed a significant difference in $\delta^{13}\text{C}$ between macro-aggregates (10% more $\delta^{13}\text{C}$) and micro-aggregates which means that more carbon derived from green trash (C4) was incorporated in macro-aggregates. $\delta^{13}\text{C}$ of free soil particles or water-unstable aggregates is smaller for all soil layers indicating that fresh organic matter (green trash) is predominantly encountered in a water stable aggregated form in the soil. Furthermore, a correlation analysis revealed that more recent macro-aggregates had higher C content. The opposite was observed for micro-aggregates: the older the micro-aggregate, the higher its carbon content, leading to the conclusion that micro-aggregates protect carbon better against decomposition and are also capable to enrich their carbon pool through C assimilation. Given its long-term soil carbon sequestration potential, it is recommended to investigate carbon protection mechanisms for the recalcitrant C pool in micro-aggregates and also to study how agricultural techniques could improve the protection of the recalcitrant C pool.

Keywords: soil organic matter, greenhouse effect, soil carbon sequestration, green trash, sugar cane, soil aggregates.

LISTA DE FIGURAS

	Página
1 Seleção e localização das áreas de estudo.....	25
2 Amostragem indeformada de solo.....	28
3 SOC de canaviais e de uma mata nativa no clima norte.....	36
4 SOC de canaviais e de uma mata nativa no clima sul.....	36
5 SOC de canaviais no clima centro.....	37
6 Precipitação média mensal e temperatura média mensal dos canaviais em estudo no período entre o início da mecanização da colheita até a amostragem..	52
7 Aumento da precipitação no clima sul em setembro e outubro.....	54
8 Estabilidade de agregados em solos de canaviais sem e com a queima da palhada.....	68
9 Agregação em solos de canaviais sem e com a queima da palhada na camada 0-30 cm.....	69
10 Correlação entre o teor de carbono e macroagregados em solos de canaviais e uma mata nativa para a profundidade 0-30 cm.....	71

11 Estabilidade de agregados no solo de um canavial e uma mata nativa.....	72
12 $\delta^{13}\text{C}$ de macroagregados, microagregados e da fração não agregada ou não estável em água no solo de um canavial sem a queima da palhada.....	83
13 Teor de carbono nos macroagregados, microagregados e na fração não agregada ou não estável em água no solo de um canavial sem a queima da palhada.....	85
14 Correlação entre o teor de carbono e $\delta^{13}\text{C}$ nos macroagregados e microagregados no solo de um canavial sem a queima da palhada.....	87

LISTA DE TABELAS

Página

1 Distribuição latitudinal do clima do centro-sul do Brasil, representada por três regimes climáticos.....	26
2 Histórico dos canaviais em estudo.....	26
3 Número adequado de repetições para a determinação de estoques de COS.....	30
4 Tipo de colheita, regime climático, propriedades de solo (0-30cm) e suas correlações com os estoques de carbono no solo.....	38
5 Teste t de significância ($p < 5\%$) entre os 3 regimes climáticos para as variáveis: teor de carbono em solos de canaviais com (C_{CQ}) e sem (C_{SQ}) a queima da palhada (0-30 cm), precipitação média anual (P) e temperatura média anual (T).....	51
6 Estocagem de carbono no solo por meio da palhada depositada.....	53
7 Número adequado de repetições para a determinação da estabilidade de agregados.....	64
8 Teste t de significância ($p < 5\%$) entre canaviais sem e com a queima da palhada (Pradópolis) e entre canaviais e mata nativa (Goianésia) para a profundidade 0-30 cm para as variáveis: estabilidade de agregados (EA), macroagregados e	

microagregados.....	68
9 Estabilidade e forma da agregação do solo em canaviais com e sem a queima da palhada para a profundidade 0-30 cm.....	70
10 Estabilidade e forma da agregação do solo em um canavial e uma mata nativa para a profundidade 0-30 cm.....	73
11 Teste t de significância ($p < 5\%$) entre $\delta^{13}\text{C}$ e teor de carbono nos macroagregados e microagregados no solo de um canavial sem a queima da palhada para a profundidade 0-30 cm.....	82
12 Média de estoques de carbono nos solos de canaviais e matas nativas nos três regimes climáticos.....	104
13 Densidade média nos solo de canaviais e matas nativas nos três regimes climáticos estudados.....	105

SUMÁRIO

Página

RESUMO

ABSTRACT

1	INTRODUÇÃO.....	18
2	Seleção e caracterização das estudados	
2.1	Seleção das áreas em estudo.....	23
2.2	Potencial de seqüestro de carbono orgânico por meio do manejo de cana-de-açúcar sem a queima de palhada.....	27
2.3	Amostragem	
2.3.1	Amostragem de solo.....	27
2.3.2	Número de amostras.....	28
2.3.3	Malha de amostragem.....	30
2.3.4	Georeferenciamento da amostragem.....	31
2.4	Análise física-química	
2.4.1	Granulometria do solo.....	31
2.4.2	Análise química do solo.....	32
2.5	Carbono	
2.5.1	Cálculo do estoque de carbono.....	32
2.5.2	Determinação da densidade.....	33
2.5.3	Correção da profundidade.....	33
2.5.4	Preparo das amostras.....	34
2.5.5	Análise do teor de carbono.....	34
2.5.6	Correlação entre atributos químico-físicos e climáticos com os estoques de carbono no solo.....	35

2 RESULTADOS	
2.6 Estoques de carbono no solo.....	36
2.7 Atributos físico-químicos e climáticos dos solos em estudo.....	38
2.7.1 Correlação entre clima e estoques de COS.....	39
2.7.2 Correlação entre teor de argila e estoques de COS.....	39
2.7.3 Correlação entre atributos químicos e estoques de COS.....	39
3 Avaliação do efeito de clima sobre o estoque de carbono em solos sob cultura de cana-de-açúcar com e sem a queima da palhada na região centro-sul de Brasil	
RESUMO.....	40
ABSTRACT.....	42
3 INTRODUÇÃO.....	44
3 MATERIAL e MÉTODOS	
3.1 Cálculo da precipitação mensal.....	48
3.2 Cálculo da temperatura mensal.....	48
3.3 Cálculo da palhada depositada.....	48
3.4 Carbono da palhada não estocado no solo.....	49
3.5 Análise estatística.....	50
3 RESULTADOS e DISCUSSÃO	
3.6 Teste de significância.....	51
3.7 Efeito do clima sobre a decomposição da palhada de cana-de-açúcar.....	51
3.7.1 Temperatura.....	52
3.7.2 Precipitação.....	52
3.7.3 Dinâmica do carbono da palhada em relação ao solo.....	52

	3
CONCLUSÕES.....	55
4 Avaliação do impacto de não queimar a palhada de cana-de-açúcar sobre a estabilidade de agregados no solo	
RESUMO.....	55
ABSTRACT.....	57
4 INTRODUÇÃO.....	58
4 MATERIAL e MÉTODOS	
4.1 Seleção das áreas de estudo e a amostragem.....	63
4.2 Número de amostras.....	64
4.3 Caracterização da estabilidade de agregados	
4.3.1 Potencial de maior estabilidade de agregados por meio do manejo de cana-de-açúcar sem queima da palhada.....	64
4.3.2 Preparo das amostras.....	65
4.3.3 Fracionamento em água de fluxo contínuo.....	65
4.4 Agregação do solo.....	66
4.5 Análise estatística.....	67
4 RESULTADOS e DISCUSSÃO	
4.6 Teste de significância.....	68
4.7 Estabilidade de agregados no solo em relação ao tipo de colheita.....	68
4.8 Estabilidade de agregados no solo em canaviais vs. vegetação nativa no clima norte.....	72
4 CONCLUSÕES.....	74

5 Análise da proteção de carbono nos agregados estáveis e instáveis em solos ocupados por cultura canavieira

RESUMO.....	75
ABSTRACT.....	77
5 INTRODUÇÃO.....	78
5 MATERIAL e MÉTODOS	
5.1 Seleção das áreas de estudo e a amostragem.....	80
5.2 Determinação de $\delta^{13}\text{C}$	80
5.3 Determinação de $\delta^{13}\text{C}$ dos agregados instáveis em água ou não agregados	81
5.4 Determinação de C dos agregados instáveis em água ou não agregados.....	81
5.5 Análise estatística.....	82
5 RESULTADOS e DISCUSSÃO	
5.6 Teste de significância.....	82
5.7 Avaliação da proteção de carbono no solo contra a sua decomposição em relação a sua forma de agregação.....	83
5 CONCLUSÕES.....	88
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	89
REFERÊNCIAS.....	93
APÊNDICE.....	104

1 INTRODUÇÃO

A assinatura da “United Nations Framework Convention on Climate Change” (UNFCCC) pelo Brasil e outros 150 países, em junho 1992, no Rio de Janeiro, sinalizou o amplo reconhecimento de que as mudanças climáticas constituem uma ameaça para o meio ambiente e o desenvolvimento sustentável no mundo.

As mudanças climáticas são agravadas pelo aumento do efeito estufa (=aumento da temperatura atmosférica) acima do nível desejável, principalmente devido ao aumento dos gases CO_2 , CH_4 e N_2O na atmosfera. Esses gases absorvem parcialmente a radiação solar, o que resulta no aumento de sua energia cinética (= aumento de temperatura). Desses gases, o CO_2 tem, com aproximadamente 60%, a maior participação nas mudanças climáticas (COLE et al., 1995). Por meio da fotossíntese, as plantas absorvem o CO_2 atmosférico e ajudam a reduzir o efeito estufa. Na fotossíntese, o CO_2 , em conjunto com energia solar e H_2O , produz $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$, substância fundamental na formação de biomassa. Quando a biomassa se degrada, uma parte pode ser transferida ao solo, passando a ser chamada de matéria orgânica no solo (MOS). A MOS é composta, em média, por aproximadamente 50% de carbono orgânico no solo (COS).

O balanço global de carbono atualmente sugere que aproximadamente 3 Pg C dos 8 Pg C que são emitidos por fontes antropogênicas a cada ano são reabsorvidos pela biosfera terrestre, totalizando entre 1450 e 1600 Pg (1 pentagrama = 10^{15} gramas) de carbono armazenado até um metro de profundidade nos solos do globo terrestre (IPCC, 2000). Essa quantidade é três vezes maior do que a quantidade armazenada na biomassa aérea vegetal global e representa o dobro da quantidade de CO_2 existente na atmosfera (IPCC, 2000).

Uma das práticas agrícolas que estimula a acumulação de COS é a incorporação da palhada remanescente nos solos em sistema de colheita de cana crua. O Protocolo de Quioto reconhece, no artigo 3.4, os solos agrícolas como sumidouro de gases do efeito estufa, o que gerou o interesse crescente de estudar qual o papel do solo agrícola na remoção de CO₂ da atmosfera (processo conhecido como seqüestro de carbono); e como o manejo do solo influencia a quantidade de carbono orgânico no solo (COS) seqüestrado. As negociações no âmbito do protocolo de Quioto em 2001 aumentaram a probabilidade de que o seqüestro de carbono em solos agrícolas seja incluído como elemento no orçamento nacional de carbono a partir de 2012. (FAO, 2001). Ademais, o Protocolo estabeleceu três mecanismos para ajudar os países do Anexo I (países desenvolvidos signatários do protocolo de Quioto) a cumprir seus compromissos de redução de emissões de CO₂ até 2012 (5% a menos do que as emissões de 1990), a saber:

O *Comércio de Emissões* (CE), que estipula as regras para a compra e venda de créditos de CO₂ entre os países de Anexo I; as *Implementações Conjuntas* (IC), que possibilitam e fomentam a implementação de projetos que visam à redução de emissões de CO₂ entre os países listados no Anexo 1; e finalmente, os *Mecanismos de Desenvolvimento Limpo* (MDL), que representam o equivalente às implementações conjuntas, porém são voltados a projetos realizados entre os países do Anexo I e outros países, como o Brasil. Os MDLs prevêm que um país do Anexo I pode creditar a redução de emissões de CO₂ feita em um país colaborador no seu próprio inventário de CO₂.

A partir do início da segunda fase (2012), o Protocolo de Quioto oferecerá, se aprovado, apoio financeiro para solos agrícolas; por meio de MDLs quando forem utilizadas técnicas favoráveis à mitigação de CO₂, CH₄ ou N₂O.

Em 1998 a “Organização Mundial de Meteorologia” (WMO) e o “Programa Ambiental das Nações Unidas” (UNEP) estabeleceram o “Painel Intergovernamental de Mudança Climática”(IPCC), que tem como objetivo avaliar as informações científicas, técnicas e sócio-econômicas relevantes para a compreensão das mudanças climáticas, assim como seus impactos e as opções de adaptação e mitigação. O painel é constituído por vários pesquisadores de todo o mundo. O Prof. Dr. Carlos Cerri, como membro desse painel, e associado do Laboratório de Biogeoquímica Ambiental do CENA/USP, vem desenvolvendo pesquisas voltadas ao seqüestro do COS por meio de atividades agro-silvo-pastoris, tais como plantio direto, florestamento/reflorestamento, pastagens, soja e cana-de-açúcar.

A cultura da cana-de-açúcar é responsável por 11% do material vegetal residual de colheita produzido anualmente no mundo (IPCC, 1995), o que evidencia o seu importante potencial na transferência de carbono ao solo. Tradicionalmente, o canavial é submetido à queima previamente à colheita, a fim de facilitar as operações de corte, geralmente manual, carregamento e transporte da matéria-prima. A quase totalidade (98%) das emissões de gases resultantes da queima de resíduos agrícolas no Brasil provém da cana-de-açúcar (EMBRAPA, 1999).

O mesmo estudo supracitado também estimou as emissões provenientes da queima de resíduos de cana-de-açúcar no Brasil em 120 Gg para CH₄, 2516 Gg para CO₂, 6 Gg para N₂O e 214 Gg para NO_x (1 gigagrama = 10⁹ gramas = 1000 toneladas), no período de 1986 a 1996. Com exceção de 1996, nesse período praticou-se exclusivamente a colheita de cana-de-açúcar com queima da parte vegetal residual.

Estudos realizados por Lal et al. (1995) concluíram que o manejo de resíduos, associado às técnicas de manejo e conservação do solo, seria responsável por uma mitigação do CO₂ atmosférico da ordem de 3,2 Pg a⁻¹ no mundo inteiro.

Em consideração dessas circunstâncias, o governo do Estado de São Paulo criou leis com a finalidade de eliminar gradativamente a prática da colheita com a queimada do canavial. O Decreto Lei Estadual nº 47.700, de 11 de março de 2003, regulamenta a Lei nº 11.241, de 19 de setembro de 2002 (SIGAM, 2007), que dispõe sobre a eliminação gradativa da queima da palhada da cana-de-açúcar e dá providências correlatas, é de grande interesse agrícola e ecológico pois estabelece prazos, procedimentos, regras e proibições que visam regulamentar as queimadas em práticas agrícolas.

Cabe salientar que a liberação de CO₂ durante a queimada do canavial não é considerada como uma emissão líquida de carbono, já que durante o ciclo fotossintético seguinte, ocorre a absorção de CO₂ atmosférico, estimada por Silva (1996) em 15 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ em canaviais (1Mg = 10⁶ gramas = 1 tonelada). Cerca de 7,5 Mg desse carbono está depositado na forma de palhada seca, que forma uma camada de 10-12 cm de espessura.

Desse 7,5 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹, cerca de 1 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ é seqüestrado nos solos de canaviais sem queima (CAMPOS, 2003). Esse ganho em carbono no solo pode ser explorado economicamente por meio de MDLs do protocolo de Quioto, e outras políticas de financiamento de seqüestro de carbono.

O cultivo de cana-de-açúcar ocupa aproximadamente 5,4 milhões de hectares, com uma produção anual de 386,6 milhões de Mg de cana-de-açúcar, sendo 336,9 milhões de Mg (87,1%) no centro-sul do Brasil (UNICA, 2007).

Aproximadamente 75% dos canaviais no Brasil possuem uma topografia com menos de 12% declividade. Isso possibilita a colheita mecanizada (RIPOLI, 2004), eliminando a necessidade de queima da palhada antes da colheita, e evitando assim a liberação imediata da maior parte do C em forma de CO₂. O acúmulo de palha sobre o solo leva a uma introdução parcial de C no solo, induzindo um seqüestro de COS.

Considerando-se um seqüestro inicial de carbono de 1 Mg C ha⁻¹ a⁻¹ em canaviais sem queima (CAMPOS, 2003), esses 75% (~4,05 milhões de hectares) representam aproximadamente 4,05 milhões de Mg de seqüestro de COS por ano.

Sabendo-se que uma tonelada de C está sendo negociada em aproximadamente US\$ 1 por Mg CO₂ (LAL, 2004), o potencial econômico de seqüestro de COS por meio da mecanização da colheita de cana-de-açúcar no Brasil totaliza aproximadamente 4,05 milhões de US\$ por ano. Conforme mencionado, o CO₂ em conjunto com a energia solar e água produz C₆H₁₂O₆ (por meio da fotossíntese), substância que é o ponto de partida do COS.

Tanto a água como a energia solar são fatores climáticos, o que ressalta a importância do clima sobre o seqüestro de COS. Na análise da literatura, não foram encontrados estudos específicos sobre a influência do clima no seqüestro de carbono em colheitas mecanizadas de cana-de-açúcar no Brasil.

Portanto, o objetivo principal do estudo tem caráter inédito, ao avaliar o potencial de seqüestro de carbono em canaviais, não somente em função do manejo (sem queima versus com queima da palhada remanescente), mas também em função de regimes climáticos contrastantes no centro-sul do Brasil.

Os resultados contribuem para a regionalização das informações científicas sobre o potencial de seqüestro de COS em canaviais de colheita mecanizada no

centro-sul do Brasil, abrindo espaço para possíveis financiamentos por meio de MDLs no segundo período de comprometimento do Protocolo de Quioto, ou no âmbito de outras políticas ambientais.

O estudo foi dividido em 4 capítulos. O primeiro capítulo caracteriza as áreas de estudo de modo geral e conforme seus estoques de carbono.

O segundo capítulo aborda a influência do clima sobre a estocagem de carbono proveniente da palhada de cana-de-açúcar.

O terceiro capítulo avalia o impacto da palhada sobre a estabilidade de agregados no solo e o último capítulo examina em que forma de agregação se encontra a fração recalcitrante de carbono.

2 Seleção e caracterização das áreas estudadas

2.1 Seleção das áreas em estudo

Para deduzir melhor o efeito da queima da palhada e o do clima sobre o estoque de COS, tentou-se encontrar áreas de estudo no centro-sul de Brasil, que responde por 87% da produção de cana-de-açúcar no Brasil (UNICA, 2007).

Para obter dados representativos, decidiu-se estudar canaviais que abrangem a inteira amplitude latitudinal do centro-sul do Brasil, junto com canaviais do maior pólo de plantação de cana-de-açúcar, o que permitiria avaliar o efeito climático sobre a estocagem de COS no centro-sul do Brasil. Além disso, para deduzir o efeito da queimada da palhada e o efeito climático sobre o estoque de COS, foram considerados os seguintes critérios de seleção:

1. Áreas localizadas em usinas de cana-de-açúcar, devido à maior probabilidade de existência de históricos detalhados das áreas em estudo.

2. Áreas ocupadas por plantações de cana-de-açúcar há pelo menos 15 anos, a fim de atribuir com mais precisão o COS ao uso atual da terra.
3. Usinas que possuem canaviais com e sem a queima da palhada.
4. Áreas caracterizadas pelo mesmo tipo de solo, pois o teor de argila influencia a capacidade de estocar COS.
5. Áreas sem adubação orgânica, devido à entrada de C ocasionada por esta prática.

Para seleção das áreas que atendiam ao primeiro critério utilizou-se o “Mapa Brasil de Unidades Produtoras de Açúcar e Alcool – 2001”, criado por *GEOMAPAS Editora de Mapas e Guias LTDA* e a “Malha Municipal Digital – 2003” do “Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística” (IBGE). O primeiro mapa forneceu informações sobre os municípios nos quais estão localizadas as usinas de cana-de-açúcar.

O municípios foram extraídos da malha municipal do Brasil e posteriormente cruzados com o mapa “Unidades Climáticas do Brasil” do IBGE (código 1.16), que indica os principais regimes climáticos para o cultivo de cana-de-açúcar no Brasil.

A seguir, foi feito um levantamento dos regimes climáticos que representam o limite superior e inferior do centro-sul do Brasil, e do regime climático da região de Ribeirão Preto, que concentra a maior parte dos canaviais no Brasil.

Os municípios desses três regimes climáticos foram cruzados com o “Mapa de Solos do Brasil”, criado pela “Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária” (EMBRAPA) em parceria com o IBGE, para identificar municípios com o mesmo tipo de solo, satisfazendo o quarto critério, e para definir o solo de ocorrência mais freqüente (Latossolo).

A figura a seguir mostra os três municípios escolhidos para o estudo, assim como os mapas que foram utilizados para a seleção:

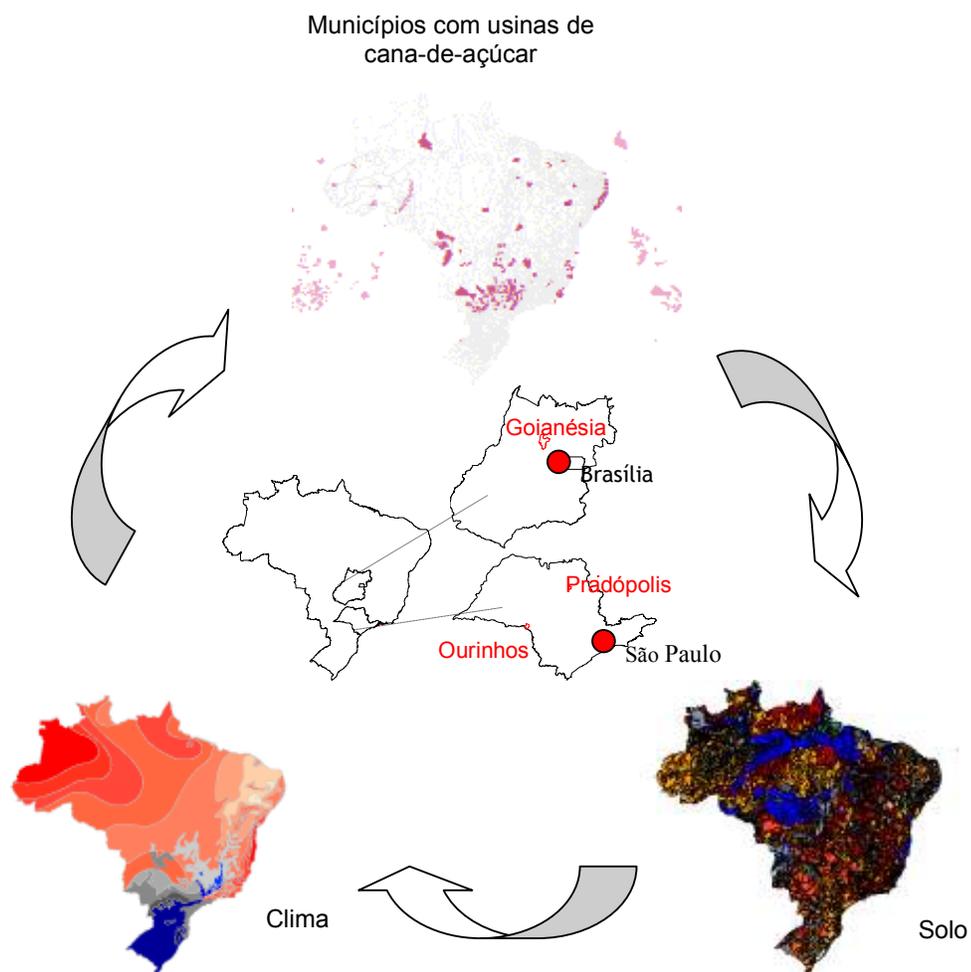


Figura 1 - Seleção e localização das áreas de estudo

Para uma melhor compreensão, os três regimes climáticos estão sendo denominados clima norte (Goianésia), clima centro (Pradópolis) e clima sul (Ourinhos).

A tabela a seguir mostra as características climáticas dos três regimes climáticos escolhidos para o estudo, utilizando a classificação climática do IBGE e de Köppen.

Tabela 1. Distribuição latitudinal do clima do centro-sul do Brasil, representada por três regimes climáticos.

Clima Norte (Goianésia)	Clima Centro (Pradópolis)	Clima Sul (Ourinhos)
Temperatura: Quente	Temperatura: Subquente	Temperatura: Subquente
Umidade: Semi Úmido	Umidade: Úmido	Umidade: Super Úmido
Período de Seca: 4 a 5 meses	Período de Seca: 3 meses	Período de Seca: Subseca
Classificação Köppen: Aw	Classificação Köppen: Aw	Classificação Köppen: Cwa

A: climas megatérmicos (temperatura média do mês mais frio superior a 18°C)

w: chuvas de verão (mês menos chuvoso com precipitação inferior a 60mm)

C: climas mesotérmicos (temperatura média do mês mais frio inferior a 18°C e superior a -3°C, ao menos um mês com média igual ou superior a 10°C)

a: verões quentes (mês mais quente com média igual ou superior a 22°C)

Para satisfazer os critérios dois até cinco, o pesquisador contatou usinas localizados nos regimes climáticos escolhidos. Após a análise de vários históricos foram escolhidas três usinas, que melhor atendam aos critérios de três a cinco.

A tabela a seguir mostra o histórico dos canaviais em estudo:

Tabela 2. Histórico dos canaviais em estudo.

Clima	Corte	Palhada depositada (anos)	Cultura anterior	Variedade	Trato de Soqueira e Reforma	Solo	Canavial (anos)
Norte	CQ	-	Pasto	SP79 1011	Tríplice / Aração	LV	>15
	SQ	3	Pasto	SP80 3480		LV	>15
Centro	CQ	-	Mata Nativa	SP80 1842	Tríplice / Aração	LR	> 15
	SQ	6	Mata Nativa	SP80 1842		LR	> 15
Sul	CQ	-	Café	SP80 3280	Tríplice / Aração	LR	33
	SQ	4	Café	SP90 3414		LR	33

SQ = Canaviais sem queima da palhada

CQ = Canaviais com queima da palhada

LR = Latossolo Roxo

LV = Latossolo Vermelho

2.2 Potencial de seqüestro de carbono orgânico por meio do manejo de cana-de-açúcar sem a queima de palhada

Em cada regime climático, foi feita a comparação do estoque de COS de canaviais sem queima versus com queima para avaliar se existe um estoque significativamente maior de COS nos canaviais sem a queima da palhada.

Ademais, foram amostrados estoques de COS em matas nativas localizadas dentro das usinas, a fim de avaliar o potencial de seqüestro de carbono do agrossistema cana-de-açúcar em comparação com a vegetação natural.

Para maior representatividade, o COS, a estabilidade de agregados, a palhada remanescente, a textura e os atributos químicos mostrados constituem a média de dois canaviais para cada tipo de colheita e em cada regime climático.

2.3 Amostragem

2.3.1 Amostragem de solo

Efetuaram-se duas amostragens verticais distintas. A primeira coletou as seguintes camadas:

0-5 cm / 5-10 cm / 10-20 cm / 20-30 cm

Essa amostragem avaliou o teor de COS e a densidade do solo. Em vista da alta variabilidade de COS nos primeiros centímetros do solo, a camada 0-10 cm foi subdividida em duas camadas. A segunda amostragem caracterizou o solo. A determinação da densidade foi feita nas trincheiras principais e nas mini-trincheiras, com um anel de 10 cm (diâmetro) x 5 cm (profundidade) para as camadas **0-5 cm** e **5-10 cm** e um anel de 10 cm (diâmetro) x 10 cm (profundidade) para as camadas **10-**

20 cm até 90-100 cm, fornecendo amostras indeformadas para a obtenção da densidade do solo. Estas amostras foram feitas da seguinte maneira:



Delimitação das referentes camadas
Por meio de pregos cravados



Remoção do solo superior até a camada
a ser amostrada



Introdução do cilindro no solo



Remoção do solo lateral e abaixo do
Cilindro



Retiragem da amostra



Armazenagem da amostra numa bandeja
de alumínio com tampa

Figura 2 – Amostragem indeformada de solo

2.3.2 Número de amostras

Definiu-se, a priori, o número adequado de repetições de amostragem para avaliar o estoque de COS e a estabilidade de agregados. Utilizou-se o número de

repetições (15) de Luca (2001), cujos dados se referem a canaviais da Usina de Cana-de-Açúcar São Martinho, também incluída neste estudo.

Após a obtenção de todos os estoques de COS e da estabilidade de agregados, determinou-se o número adequado de repetições para ambos os parâmetros em cada gleba para cada camada, considerando-se que pode haver diferenças na variabilidade dos dois parâmetros dependendo da gleba e da camada em estudo.

Aplicou-se a seguinte fórmula, utilizada por vários autores, entre outros, McBratney & Webster (1983), Peterson & Calvin (1986), e Schindwein & Anghinoni (2000), a fim de determinar o número mínimo de repetições necessárias para obter valores estatisticamente representativos:

$$n = \left[\frac{t \times CV}{d} \right]^2 \quad (1)$$

onde n = número de amostras necessárias para obter um valor estatisticamente representativo, aplicando a probabilidade de 95% = nível de confiança ($\alpha = 0,05$).

(2)

$$CV = \text{coeficiente de variação} = \frac{\sigma}{\bar{x}}$$

σ = desvio padrão do tamanho amostral

\bar{x} = média do tamanho amostral

d = limite de variação em torno da média (*effect size*)

$t = 1,96$ (*bicaudal*); obtido na distribuição de t de Student, com ∞ graus de liberdade e probabilidade $(1 - \alpha)$, sendo α o nível de confiança 0,05.

A tabela a seguir apresenta os resultados obtidos na determinação do número adequado de repetições para COS e para a estabilidade de agregados.

Tabela 3. Número adequado de repetições para a determinação de estoques de COS.

Número adequado de repetições														
Profundidade (cm)	Clima Norte					Clima Centro					Clima Sul			
	SQ	CQ	MN	SQ	CQ	SQ	CQ	SQ	CQ	MN				
0-5	7	3	14	13	11	2	5	4	11	4	12	2	3	13
5-10	3	4	14	9	7	2	3	8	9	4	3	3	5	7
10-20	13	2	15	6	9	2	4	13	15	5	2	5	8	8
20-30	13	6	16	7	6	7	9	10	21	3	5	11	15	7
Média	6	12	8	4	11	5	7	9	8	5	7	9	8	8
Média Total	8													

Foi usado o valor padrão de $d = 10\%$, usado por Davis et al. (1995) e Schlindwein & Anghinoni (2000).

Cada valor foi calculado por meio de 15 repetições

SQ = Canaviais sem a queima da palhada

CQ = Canaviais com a queima da palhada

MN = Mata nativa

Como o número de 15 repetições não foi ultrapassado, determinou-se, este número como adequado para a determinação do estoque de COS e da estabilidade de agregados em cada gleba estuda.

2.3.3 Malha de amostragem

A malha de amostragem de COS e da estabilidade de agregados de cada canavial formou uma grade regular com um espaçamento de aproximadamente 20m entre todos os pontos de amostragem, com 11 mini-trincheiras e uma trincheira principal. Determinou-se o teor de COS e a estabilidade de agregados nas 11 mini-trincheiras e nas 4 paredes da trincheira principal, resultando nas 15 repetições descritas no item 2.3.2.

Para converter o teor de COS em estoque de COS, determinou-se a densidade do solo nas profundidades 0-5 cm / 5-10 cm / 10-20 cm / 20-30 cm em duas paredes (linha e entrelinha) da trincheira principal e em duas mini-trincheiras. Na profundidade 30-100cm, a densidade do solo foi determinada nas 4 paredes da trincheira principal.

2.3.4 Georeferenciamento da amostragem

As coordenadas exatas das trincheiras principais de cada canal em estudo foram obtidas por meio de um sistema global de posicionamento (GPS), garantindo a possibilidade de reamostragem no local exato, caso um número maior de repetições (veja item 2.3.2) houvesse sido determinado.

2.4 Análise física-química

2.4.1 Granulometria do solo

Executou-se uma análise granulométrica para confirmar a homogeneidade de textura dos solos dos canais comparados, tendo em conta que o teor de argila influencia fortemente o teor de COS. A determinação foi feita pelo método modificado do densímetro (Bouyoucos).

A análise consiste em dispersar a amostra de solo em agitador elétrico de 1200 RPM e em seguida transferir a amostra para um cilindro de sedimentação. Após a suspensão ter sido homogeneizada por um minuto, efetua-se a leitura da densidade com hidrômetro a vários intervalos de tempo, conforme EMBRAPA (1997).

Para as camadas até a profundidade de 30 cm foram usadas três amostras compostas, constituídas por 5 amostras individuais; sendo que, para as camadas de 30 – 100 cm foram usadas quatro amostras individuais.

2.4.2 Análise química do solo

O pH foi apurado por meio de eletrodo combinado imerso em suspensão solo:líquido (CaCl₂), usando 10ml de solo e 25ml de solução CaCl₂ 0,01 M.

O P disponível e os cátions trocáveis (K⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺) foram extraídos em resina trocadora de íons (RAIJ; QUAGGIO, 1983). O P disponível foi quantificado por espectrofotometria e os teores de K⁺ por espectrometria de chamas. O Ca²⁺ e Mg²⁺ foram determinados por espectrofotômetro de absorção atômica. A acidez potencial do solo foi determinada pelo método da EMBRAPA (1997), através da extração do H⁺ + Al³⁺ com uma solução de Ca(OAc)₂ 1,0 mol L⁻¹ tamponada a pH 7,0. A CTC potencial a pH 7,0 e a saturação de bases foram calculadas. Para a determinação dos atributos químicos foi usado o mesmo esquema de número e tipo de amostras da análise granulométrica (veja item 2.4.1).

2.5 Carbono

2.5.1 Cálculo do estoque de carbono

Os estoques de carbono foram calculados conforme Moraes et al. (1996):

(3)

$$e. \text{cos} = p \times c \times d$$

e. cos = estoque de carbono orgânico no solo (Mg ha⁻¹)

p = densidade do solo na camada estudada (g cm⁻³)

c = teor de carbono orgânico no solo (%)

d = profundidade da camada estudada (cm)

O apêndice A relaciona o total dos estoques de carbono levantados neste estudo.

2.5.2 Determinação da densidade

A densidade foi calculada por meio da seguinte fórmula:

(4)

$$p = \frac{m}{V}$$

p = densidade da amostra ($g\ cm^{-3}$)

m = peso seco (ao ar) da amostra (g)

V = volume da amostra (cm^3)

O volume da amostra foi determinado pelo volume conhecido do anel. O peso foi determinado após a secagem ao ar por um período mínimo de 4 semanas.

O total das densidades levantadas encontra-se no apêndice B.

2.5.3 Correção da profundidade

A comparação de estoques de COS requer massas iguais de COS. Os diferentes usos de terra e manejos de solo afetam a densidade de solo. Portanto, as profundidades que apresentam a mesma massa de COS podem variar entre diferentes áreas de estudo. Como as profundidades de amostragem são pré-estabelecidas, é necessário calcular a profundidade “verdadeira”, que representa a massa de COS em relação à massa de COS de uma referência. Utilizou-se uma das áreas de estudo como referência (densidade $1,0\ g/cm^3$), e calcularam-se as profundidades das outras áreas estudadas em função da densidade da referência (ELLERT; BETTANY, 1995):

(5)

$$profundidade\ (amostra) = \frac{massa\ (ref)}{densidade\ (amostra)}$$

onde:

$massa(ref) = densidade\ (ref) \times profundidade\ (ref)$

2.5.4 Preparo das amostras

As amostras foram secas ao ar, destorroadas e, em seguida, peneiradas a 2 mm. Depois, as amostras foram espalhadas numa bandeja, e as raízes grossas foram retiradas, pois o carbono proveniente delas não é considerado parte do estoque de carbono no solo.

Em seguida, as amostras foram divididas em quatro partes aproximadamente iguais. As duas partes diagonais foram retiradas e o restante foi bem misturado. Esse procedimento foi repetido até se obter uma quantidade de aproximadamente 20g, sempre garantindo, porém, que tal quantidade fosse representativa para fins de medição do teor de carbono.

Para a retirada das raízes finas da sub-amostra, foi utilizada a técnica de estática elétrica. Uma régua de plástico foi carregada eletro-estaticamente por meio da esfregação de luvas de couro e colocada sobre a sub-amostra. A régua carregada tem o poder de atrair as raízes finas, sem atrair as partículas do solo.

Dessa sub-amostra homogênea e livre de raízes foi tirada uma quantidade de aproximadamente 6 gramas para moagem com moinho analítico, até que o material resultante passasse inteiramente por uma peneira de 100 *mesh* (espaçamento de 150 μm).

2.5.5 Análise do teor de carbono

O teor de carbono no solo foi determinado por combustão a seco no analisador elementar LECO CN-2000.

2.5.6 Correlação entre atributos físico-químicos e climáticos e os estoques de carbono

Calculou-se o coeficiente médio da correlação Pearson para os atributos químico-físicos, comparando-os aos seus correspondentes estoques de COS, em cada profundidade e em cada regime climático.

Depois se tirou a média dos coeficientes para cada tratamento (canavial sem queima e com queima). O coeficiente da correlação Pearson para os atributos climáticos foi calculado, comparando-se a média anual de temperatura e precipitação de cada regime climático com a média dos estoques de carbono na profundidade 0-30 cm para cada tratamento (canavial sem queima e com queima) do respectivo regime climático.

2 RESULTADOS

2.6 Estoques de carbono no solo

As figuras a seguir mostram os estoques de COS de canaviais com e sem queima da palhada e de matas nativas nos três regimes climáticos:

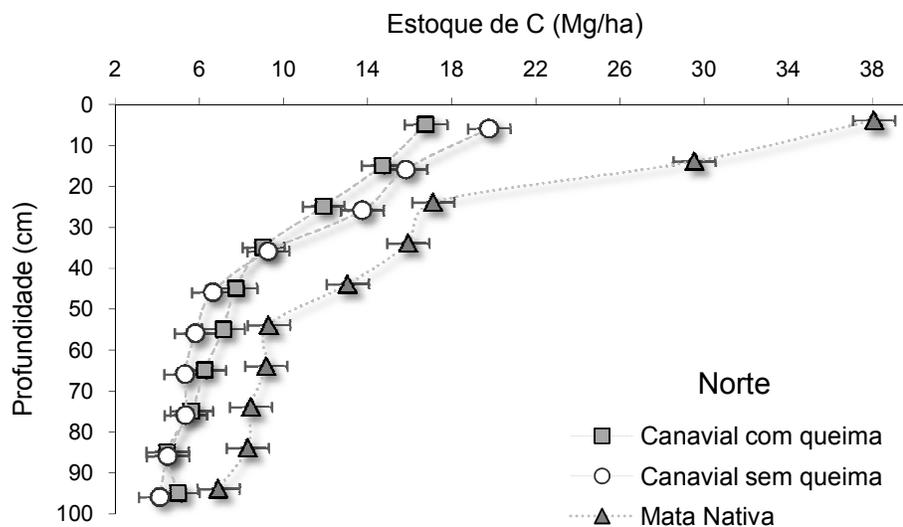


Figura 3 – SOC de canaviais e de uma mata nativa no clima norte

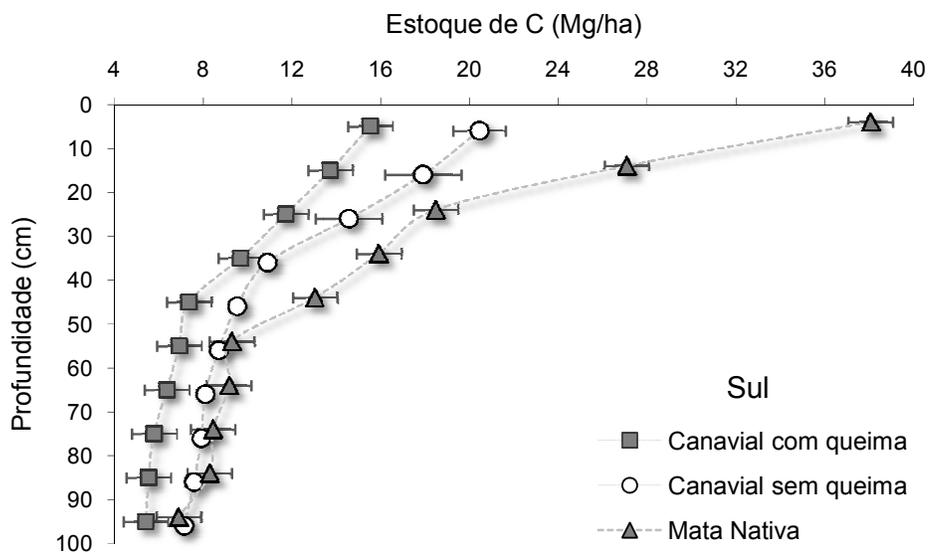


Figura 4 – SOC de canaviais e de uma mata nativa no clima sul

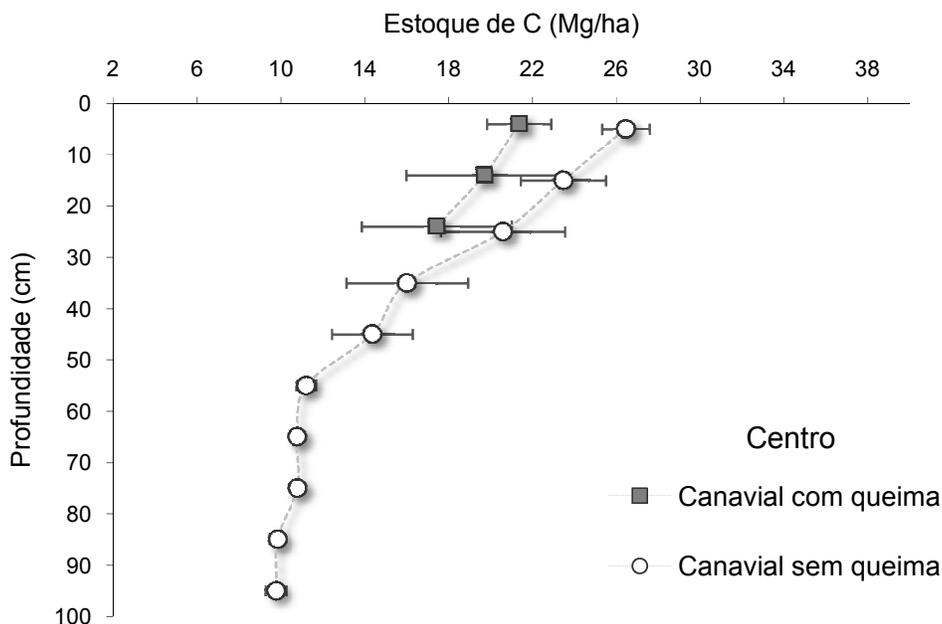


Figura 5 – SOC de canaviais no clima centro

Observação: Ausência de dados de mata nativa e da profundidade de 40-100 cm para os canaviais com queima da palhada no clima centro

Nos três regimes climáticos observou-se um maior estoque de COS nas camadas superiores dos canaviais sem queima da palhada; em relação aos canaviais com queima da palhada. Na camada 0-30 cm, detectou-se uma diferença de 6,0 Mg/ha para o clima norte, 6,8 Mg/ha para o clima sul e 12,0 Mg/ha para o clima centro, resultando em um aumento anual de 1,97 mg/ha no clima norte (três anos de colheita mecanizada), 1,70 Mg/ha no clima sul (quatro anos de colheita mecanizada) e 2,0 Mg/ha no clima centro (seis anos de colheita mecanizada).

A partir da camada 0-30 cm, os estoques de COS continuam a diminuir com a profundidade, porém não existe mais uma diferença pronunciada conforme o tipo do tratamento. Os solos das matas nativas mostraram diferenças significativas de estoques de COS até 60 cm de profundidade, com ênfase nos primeiros 20 centímetros. Isso demonstra que a mata nativa possui um potencial de seqüestro de

carbono mais elevado do que o agrossistema de cana-de-açúcar com queima da palhada.

Em relação ao agrossistema cana-de-açúcar sem queima da palhada, faz-se necessário monitorar a evolução do aumento de COS por meio da deposição da palhada nos próximos anos, para verificar se este agrossistema consegue se aproximar da vegetação natural em termos de estoques de carbono no solo.

2.7 Atributos físico-químicos e climáticos dos solos em estudo

A tabela a seguir mostra os principais atributos físicos e químicos dos solos em estudo, juntamente com dados de temperatura média anual e precipitação anual e suas correlações com o estoque de COS.

Tabela 4. Tipo de colheita, regime climático, propriedades do solo (0-30 cm) e suas correlações com os estoques de carbono no solo.

Clima	Temp (°C)	Precip. (mm)	Corte	Propriedades do solo									
				C	Argila	K	Ca	Mg	H + Al	SB	CTC	P	pH
				Mg/ha	%			mmol/dm ³				mg/dm ³	CaCl ₂
Norte	24,4 ±0,36	1417 ±206,4	CQ	43,4 ±2,13	56,2 ±1,38	1,2 ±0,17	12,5 ±1,09	9,75 ±1,52	56,3 ±10,2	23,5 ±2,56	79,9 ±7,57	4,8 ±0,66	4,4 ±0,10
			SQ	49,3 ±1,91	50,81 ±0,99	1,1 ±0,04	27,9 ±19,6	10,8 ±4,30	33,3 ±8,92	42,8 ±28,9	75,9 ±20,0	16,9 ±12,73	5,1 ±0,42
Centro	23,2 ±0,34	1420 ±129,1	CQ	58,5 ±2,59	66,8 ±0,69	7,6 ±0,44	33,1 ±3,86	11,9 ±0,66	40,2 ±3,74	52,5 ±4,77	92,5 ±6,72	7,3 ±1,46	5,5 ±0,13
			SQ	70,5 ±1,82	70,4 ±2,72	6,8 ±1,06	19,7 ±2,08	7,8 ±1,15	45,5 ±1,28	34,1 ±3,23	79,9 ±2,46	5,9 ±0,33	5,2 ±0,06
Sul	23,2 ±0,39	1527 ±261,5	CQ	46,1 ±1,46	71,8 ±0,22	2,1 ±0,24	25,0 ±4,78	10,9 ±2,55	44,0 ±6,29	38,0 ±7,26	82,0 ±2,13	8,0 ±0,88	4,9 ±0,20
			SQ	52,9 ±1,40	71,4 ±1,02	1,9 ±0,77	32,5 ±4,05	15,3 ±4,04	39,4 ±2,91	49,5 ±8,05	89,1 ±5,35	6,3 ±0,64	5,1 ±0,16
	SQ	SQ		SQ	SQ	SQ	SQ	SQ	SQ	SQ	SQ	SQ	SQ
	-0,63	-0,33	Correlação com C	-0,74	0,80	0,69	0,70	-0,2	0,74	0,82	SQ 0,63	0,53	
	CQ	CQ		CQ	CQ	CQ	CQ	CQ	CQ	CQ	CQ	CQ 0,55	CQ
	-0,64	-0,33		-0,50	0,53	0,39	0,40	0,27	0,45	0,62			-0,17

Temperatura: média anual para o período que vai do início da mecanização da colheita até a data de amostragem

Precipitação: Soma anual para o período que vai do início da mecanização da colheita até a data de amostragem

SQ = Canaviais sem queima da palhada

CQ = Canaviais com queima da palhada

Carbono: média de 30 repetições

Outras propriedades do solo: 6 repetições, compostas por 5 amostras individuais

± = desvio padrão dos valores

2.7.1 Correlação entre o clima e os estoques de COS

As correlações entre a temperatura anual e o estoque de COS revelaram uma correlação negativa moderada ($r = -0,63/-0,64$), superando a correlação da precipitação anual com os estoques de COS ($r = -0,33$).

Quanto maior a temperatura ou a precipitação, menor o estoque de carbono. Considera-se o número de três observações (três regimes climáticos) insuficiente para deduzir regressões ou equações.

Em vista da grande importância do clima sobre a estocagem de COS, recomenda-se investigar as correlações entre fatores climáticos e estoques de COS com um maior número de observações, o que permitiria estabelecer correlações e talvez até regressões entre o clima e os estoques de COS, com o intuito de deduzir melhor o impacto do clima no seqüestro de carbono no solo.

2.7.2 Correlação entre o teor de argila e os estoques de COS

A correlação entre a fração de argila e os estoques de COS foi negativa ($r = -0,75/-0,50$). Isto se deve ao fato de que a fração de argila tende a aumentar com a profundidade, enquanto o teor de carbono tende a diminuir com a profundidade.

2.7.3 Correlação entre os atributos químicos e os estoques de carbono

A capacidade de troca catiônica (CTC) mostrou a maior correlação com o estoque de carbono ($r = 0,82/0,62$). A importância fundamental da matéria orgânica para a CTC em solos tropicais com cargas variáveis foi evidenciado por Rajj (1969) e Silva et al. (1994), que constataram uma participação de 70-85% da matéria orgânica na CTC.

3 Avaliação do efeito do clima sobre o estoque de carbono em solos cultivados com cana-de-açúcar com e sem queima da palhada na região centro-sul do Brasil

RESUMO

No capítulo 3 foi avaliado o impacto do clima no seqüestro de carbono em solos de canaviais sem queima da palhada antes da colheita. Foram escolhidos três regimes climáticos do centro-sul do Brasil, abrangendo quase toda extensão longitudinal dessa região que responde por aproximadamente 87% da produção de cana-de-açúcar no Brasil.

Para destacar melhor o efeito do clima sobre as variações de estoques de COS, foram escolhidos canaviais com determinantes similares de estocagem de carbono no solo, tais como teor de argila, topografia, adubação não orgânica e manejo.

O potencial de seqüestro de COS foi determinado, em cada regime climático, de acordo com a taxa anual de carbono remanescente no solo proveniente da palhada depositada.

Para obter essa taxa, compararam-se os estoques de COS em canaviais com e sem queima da palhada, a fim de calcular o ganho anual de COS em canaviais sem queima da palhada. Esse ganho anual foi comparado com a entrada anual de carbono via palhada depositada, indicando a taxa anual de carbono remanescente.

A deposição anual de carbono por meio da palhada foi de 3,94 Mg C ha⁻¹ (clima norte), 4,02 Mg C ha⁻¹ (clima centro) e de 3,53 Mg C ha⁻¹ (clima sul).

O ganho anual de COS em canaviais cultivados sem queima da palhada foi de 1,97 Mg ha⁻¹ (clima norte), 2,00 Mg ha⁻¹ (clima centro) e de 1,70 Mg ha⁻¹ (clima

sul), indicando uma taxa anual de carbono remanescente de 50% (clima norte e centro) e de 48% (clima sul).

Considerando-se que o volume de palhada depositado no clima sul é cerca de 10% (clima norte) a 11% (clima centro) menor, e que no regime climático em questão, a estocagem de COS foi 15% inferior, pode-se concluir que houve uma maior taxa de decomposição da palhada no clima sul.

Como a temperatura média anual no clima centro e no clima sul são iguais (23,2°C), é possível deduzir que a maior pluviosidade anual do clima sul (107 mm a mais) pode ter sido a causa da taxa de decomposição mais elevada.

Considerando-se que no clima norte e centro, a diferença entre a palhada depositada e o ganho de COS são muito semelhantes (apenas 1,45% a mais no clima centro), pode-se deduzir que a taxa de decomposição de carbono nos dois regimes climáticos foi similar; pressupondo-se que a taxa de transferência do carbono depositado para o solo também seja semelhante entre os dois sistemas. Como houve uma diferença maior na média anual de temperatura (5% mais alta no clima norte) do que na precipitação (0,2%), pode-se concluir que a temperatura mais elevada no clima norte não aumentou a decomposição da matéria orgânica.

No clima sul, constatou-se maior precipitação e taxas de decomposição de matéria orgânica mais altas. Isso fortalece a hipótese de que a decomposição da palhada remanescente em canaviais do centro-sul do Brasil é mais influenciada pela pluviosidade do que pela temperatura.

No que diz respeito ao seqüestro de COS em plantações de cana-de-açúcar no centro-sul do Brasil, espera-se que o potencial seja mais elevado em regiões mais secas, com certa independência do regime de temperatura. Tampouco se observaram diferenças acentuadas de temperatura entre o norte e o sul (1,2°C de

diferença na temperatura média anual), a despeito da distância longitudinal de aproximadamente 850 km entre os dois regimes.

ABSTRACT

In Chapter 3, the author evaluates climate impact on soil carbon sequestration focusing sugar cane plantations that do not burn green trash before harvesting. Three climates from the center and south of Brazil were chosen, spanning nearly the entire longitudinal extension of this region, which accounts for approximately 87% of the national production of sugar cane.

With the purpose of specifying climate effect on soil organic carbon (SOC) sequestration, the author selected sugar cane fields with similar drivers for soil carbon stocks, such as similar clay content, topography, non-organic fertilization and soil management practices.

The potential for SOC sequestration was determined for each climate regime by calculating the annual rate of remaining soil carbon derived from deposited green trash. To calculate the annual gain of COS in sugar cane fields, the author compared SOC stocks of sugar cane fields that burn green trash to those that do not burn green trash. The annual gain was then compared to the annual volume of carbon entering the soil through the deposition of green trash, with the objective of determining the annual rate of remaining carbon in the soil.

Annual carbon obtained as a result of deposition of green trash was 3,94 Mg ha⁻¹ (northern climate); 4,02 Mg ha⁻¹ (Central Climate) and 3,53 Mg ha⁻¹ (Southern Climate).

The annual gain of COS in sugar cane fields without green trash burning was estimated at 1, 97 Mg ha⁻¹ (Northern climate), 2,00 Mg ha⁻¹ (Central Climate) and

1,70 Mg ha⁻¹ (Southern Climate). These figures represent a remaining carbon rate of 50% (northern and central climates) and of 48% (southern climate).

In the Southern Climate, deposition of green trash was found to be respectively 10% and 11% smaller than in the Northern and Central Climates. Additionally, levels of stored COS were 15% lower in the Southern Climate, leading to the conclusion that the rate of decomposition of green trash is higher in the southern climate, as compared to the other climates under study.

Average annual temperatures were found to be identical in the Central and Southern Climates (23,2°C), leading to the assumption that higher annual rainfall in the Southern Climate (107mm more) may have caused the higher rate of carbon decomposition.

In the comparison between the Northern and Central Climates, the difference between the ratio of deposited green trash volume and COS gain was found to be quite small (only 1.45% more in the central climate). Consequently, one can deduce that carbon decomposition rates under both regimes were similar; assuming that carbon-soil transfer rates were also similar. As the difference between annual mean temperatures is larger (5% greater in the northern climate) than the difference in precipitation (0.2%), one can conclude that the higher temperatures found in the Northern Climate did not lead to an increase in the rate of decomposition of organic matter.

The finding that higher decomposition rates of organic matter in the southern climate were accompanied by higher annual precipitation strengthens the hypothesis that rainfall exerts more influence on decomposition of remaining green trash than temperature. With regard to SOC sequestration in sugar cane–plantations located in Central and Southern Brazil, higher sequestration potential is expected to occur in

drier regions, regardless of their temperature regime. Southern and Northern temperatures showed little variation (difference of $1,2^{\circ}\text{C}$ in mean annual temperatures), in spite of the fact that both regimes are located approximately 850 km away from each other.

3 INTRODUÇÃO

No processo de decomposição da matéria orgânica no solo, os microorganismos utilizam o carbono da matéria orgânica para a sua própria respiração, transformando carbono em CO_2 , volatilizado na atmosfera. Essa forma de respiração corresponde a cerca de $2/3$ do CO_2 no solo. Aproximadamente $1/3$ do CO_2 presente no solo é formado pela respiração radicular e da macrofauna (BLUME, 1992). Esse conjunto de processos respiratórios recebe o nome de respiração de solo.

Totalizando 68–80 Pg C ao ano, a respiração de solo constitui o segundo maior fluxo global de carbono entre o ecossistema e a atmosfera (RAICH et al., 2002). Esse total é mais de 10 vezes superior à taxa atual de queima de combustíveis fósseis e indica que o solo recicla, a cada ano, aproximadamente 10% do CO_2 da atmosfera. Portanto, as mudanças e transformações dos estoques de carbono no solo exercem um papel considerável no combate ao aumento da concentração de CO_2 na atmosfera.

Quando a taxa líquida de entrada de carbono no solo supera a taxa líquida de saída configura-se o seqüestro de carbono no solo, com conseqüente redução do CO_2 atmosférico. Se a entrada de COS por meio da deposição de material vegetal morto é constante, a velocidade e a capacidade de decomposição por microorganismos determinam o potencial de seqüestrar COS.

A velocidade e a capacidade de decomposição por atividade microbiana dependem do regime climático, das características físico-químicas do solo, do tecido do material vegetal e da quantidade de COS introduzido, Oliveira et al. (1999).

Em escala regional, as taxas de decomposição podem ser explicadas, em primeiro plano, por variáveis climáticas e, em segundo plano, por propriedades do solo e variáveis que influenciam a qualidade da serrapilheira (FIORETTO et al., 1998), sem haver necessidade de invocar diferenças funcionais das comunidades microbianas. O regime climático possui um papel especialmente importante na atividade microbiana, pois afeta a temperatura do solo, o balanço hídrico e a oxigenação do solo (BLUME, 1992).

O impacto da temperatura sobre as taxas de mineralização de carbono no solo foi investigado em vários estudos (NADELHOFFER et al., 1991).

A relação entre temperatura de solo e respiração de solo é expressa pelo índice Q_{10} . A fórmula $Q_{10} = 2$ significa que a taxa de respiração do solo se duplica com um aumento de 10°C no solo. Na maioria dos solos cuja faixa de temperatura situa-se entre 5°C até 35°C verifica-se a ocorrência de uma aproximação com esta relação ($Q_{10} = 2$) (KATTERER et al., 1998). Entretanto, Quemada e Cabrera (1997) observaram um decréscimo de cerca de 20% na mineralização de carbono quando a temperatura de incubação do solo subiu de 20°C para 28°C . A atividade microbiana também ocorre fora da faixa de temperatura de 5°C até 35°C , mas menos pronunciadamente (LOMANDER et al., 1998).

A decomposição de frações mais lábeis ou mais recalcitrantes da matéria orgânica depende do tipo de comunidade microbiana em ação. A ativação de comunidades microbianas é parcialmente controlada pela temperatura. A dependência da temperatura indica que determinações apenas da composição

química do material seriam insuficientes para caracterizar a proteção do substrato contra a decomposição.

Geralmente, as frações lábeis deterioram-se mais rapidamente sob temperaturas elevadas (REICHSTEIN et al., 2000). Porém, o aumento da temperatura no solo modificar as transformações do substrato, a ponto de haver uma maior produção de material recalcitrante em temperaturas altas.

Inicialmente, o aquecimento do solo causa um aumento da mineralização de C, mas um mecanismo de feedback de longo prazo pode reduzir a mobilização de C no solo. Liski et al. (1999) observaram que a decomposição da matéria orgânica antiga não é sensível à temperatura porque os compostos de carbono formam complexos com material húmico, mais resistentes à decomposição.

Em consideração às últimas três citações, pode-se concluir que o aumento da temperatura no solo aumenta a respiração microbiana por meio da decomposição da fração lábil do substrato. No entanto, existe a possibilidade de aumentar a fração recalcitrante, o que criaria um potencial de seqüestro de CO₂ até em solos de temperaturas elevadas, com taxas de respiração mais altas.

Além do efeito da temperatura, outros fatores devem ser considerados. Sabe-se que a maioria dos microorganismos necessita de O₂ e H₂O para o seu anabolismo. Esses dois fatores são mutuamente influenciáveis, porque competem pelo mesmo espaço, isto é, os poros do solo. O excesso de água nos poros diminui a aeração no solo, prejudicando o desenvolvimento de microorganismos. Por outro lado, a falta de água no solo gera o mesmo efeito (CAMPBELL, 1978).

Magid et al. (1999) mostrou que a mineralização de carbono é geralmente estimulada pela secagem e pelo umedecimento do solo, particularmente durante o processo de reumidificação de solos secos. Isso se deve ao fato de que a secagem

e o umedecimento do solo provocam a ruptura de macroagregados por decomposição física, facilitando assim o acesso dos microorganismos ao COS contido no macroagregado (BLUME, 1992).

A temperatura e a precipitação controlam a ativação de diferentes comunidades microbianas para a decomposição dos vários compostos bioquímicos existentes nos tecidos vegetais.

As diferentes comunidades microbianas reagem de forma distinta à umidade no solo. Quando há menos umidade no solo, nota-se um aumento do número de fungos em relação ao número de bactérias. A umidade crescente provoca o efeito contrário: as comunidades bacterianas aumentam e as comunidades de fungos decrescem proporcionalmente (BLUME, 1992).

Os tecidos vegetais podem ser fracionados em celulose, hemicelulose, lignina, proteína, materiais hidrossolúveis e materiais éter-solúveis (ABRAMO FILHO, 1995). Na palhada de cana-de-açúcar em fase inicial de decomposição, os materiais celulósicos (celulose + hemicelulose) correspondem a 75%, e a lignina a 4% - 8% dos tecidos (OLIVEIRA et al., 2002).

Para avaliar a taxa de decomposição de tecidos vegetais, os teores de lignina, celulose, hemicelulose e polifenóis possuem importância específica (THORBURN et al., 2001).

A celulose e hemicelulose são decompostas a uma velocidade bem maior do que a lignina, sendo que esta última, juntamente com o N são apontados como agentes controladores da taxa de decomposição de substratos vegetais (SANGER et al., 1996). Essa constatação é compatível com a observação de que, na palhada de cana-de-açúcar, a maior perda de carbono ocorre por meio da descarboxilase dos conteúdos celulares e da hemicelulose (OLIVEIRA et al., 2002).

A análise de um mesmo tipo de solo não constatou que os estoques da palhada sejam influenciados pela variedade da cana-de-açúcar e nem pelo volume variável de palhada depositada sobre o solo (CAMPOS, 2003). Após três anos, ocorre uma estabilização no estoque de palhada, com valores entre 3,5 e 4,5 Mg MS / ha. (CAMPOS, 2003)

A decomposição microbiana de COS depende principalmente do clima, do tecido vegetal a ser decomposto, do manejo e do tipo de solo. Portanto, para a dedução do efeito do clima, os demais fatores devem ser homogêneos.

3 MATERIAL e MÉTODOS

Para melhor correlacionar o clima com a dinâmica de COS em função da palhada remanescente da colheita mecanizada, utilizaram-se dados climáticos e referentes à palhada, no período compreendido entre o início da mecanização e a data de amostragem.

3.1 Cálculo da precipitação mensal

A precipitação mensal foi calculada por meio de coletores de precipitação nas fazendas onde se situam os canaviais estudados.

3.2 Cálculo da temperatura mensal

A média da temperatura mensal foi calculada utilizando-se os dados fornecidos pelas estações meteorológicas das sedes de cada usina.

3.3 Cálculo da palhada depositada

O peso da palhada seca foi calculado usando o peso do colmo verde (dados provenientes das usinas) e dados de umidade e peso seco do colmo, da ponteira e da folha verde da variedade de cana-de-açúcar SP81-3250 nas usinas de cana-de-açúcar Santa Adélia (Jaboticabal) e São Luiz – Dedini (Pirassununga), no Estado de

São Paulo (FRANCO, 2007). Franco (2007) calculou uma umidade média de 73,5% nos colmos verdes em 16 canaviais nas duas usinas supramencionadas, concluindo que o peso do colmo seco equivale a 23,5% do peso do colmo verde. Além disso, determinou-se no mesmo estudo o peso seco do colmo, do ponteiro e da folha, o que permitiu estabelecer uma relação entre o peso da palhada seca (ponteiro + folha) e o peso do colmo seco. Concluiu-se que o peso da palhada seca equivale a 38% do peso do colmo seco.

A fórmula a seguir mostra como foi calculado o depósito anual da palhada remanescente nos canaviais em estudo, considerando-se que não existem diferenças significativas na relação do peso do colmo e da palhada entre as distintas variedades de cana-de-açúcar (CAMPOS, 2003):

(6)

$$P_s = 0,38 \times C_s$$

$$C_s = 0,265 \times C_v; \quad (0,38 \times 0,265 = 0,1007)$$

Portanto:

$$P_s = 0,10 \times C_v$$

P_s = palhada seca depositada ($Mg \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$)

C_s = colmo seco ($Mg \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$)

C_v = colmo verde ($Mg \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$),

Observação: do peso do colmo verde subtraiu-se 4% de impurezas.

3.4 Carbono da palhada não estocado no solo

Analisando-se a deposição anual da palhada e o ganho anual de COS nos canaviais sem queima da palhada, pode-se deduzir a quantidade de carbono da palhada que não foi estocado no solo. Definiu-se que o teor de carbono na palhada de cana-de-açúcar é de aproximadamente 41,3%. O valor foi obtido pela média dos

dados de Vitti et al. (2002) (40,2%), de Oliveira et al. (2002) (45,0%) e Faroni et al. (2003) (39,1%), resultando na seguinte fórmula:

(7)

$$Cne = 0,413 \times Ps - \Delta C$$

onde:

Cne = Carbono não estocado da palhada para o solo ($Mg\ ha^{-1}\ a^{-1}$)

Ps = Palhada seca ($Mg\ ha^{-1}\ a^{-1}$)

ΔC = Aumento de COS em canaviais sem a queima da palhada ($Mg\ ha^{-1}\ a^{-1}$)

3.5 Análise estatística

Foi aplicado um teste t de significância. O teste t avaliou se existe uma diferença significativa (nível de confiança $\alpha = 0,05$) entre as médias algorítmicas das seguintes variáveis:

- médias aritméticas dos estoques de COS (0-30 cm) de canaviais sem queima de palhada entre cada regime climático.
- médias aritméticas dos estoques de COS (0-30 cm) de canaviais com queima de palhada entre cada regime climático.
- médias aritméticas da precipitação anual entre cada regime climático.
- médias aritméticas da temperatura anual entre cada regime climático.

3 RESULTADOS e DISCUSSÃO

3.6 Teste de significância

Tabela 5. Teste t de significância ($p < 5\%$) entre os 3 regimes climáticos para as variáveis teor de carbono em solos de canaviais com (C_{CQ}) e sem (C_{SQ}) queima da palhada (0-30 cm), precipitação média anual (P) e temperatura média anual (T)

	Clima Norte					Clima Centro					Clima Sul			
	C_{SQ}	C_{CQ}	P	T		C_{SQ}	C_{CQ}	P	T		C_{SQ}	C_{CQ}	P	T
Clima Centro	0,14	0,22	0,78	0,07	Clima Sul	0,23	0,32	0,57	0,89	Clima Norte	0,72	0,78	0,58	0,13
	ns	ns	ns	ns		ns	ns	ns	ns		ns	ns	ns	ns

CSQ = Canaviais sem queima da palhada

CCQ = Canaviais com queima da palhada

P = Precipitação média anual para o período compreendido entre o início da mecanização da colheita e a data de amostragem

T = Temperatura média anual para o período compreendido entre o início da mecanização da colheita e a data de amostragem

ns = média aritmética das duas variáveis não é significativamente desigual com um nível de confiança $\alpha = 0,05$

3.7 Efeito do clima sobre a decomposição da palhada de cana-de-açúcar

O gráfico a seguir mostra a média da precipitação mensal e temperatura mensal nos canaviais em estudo:

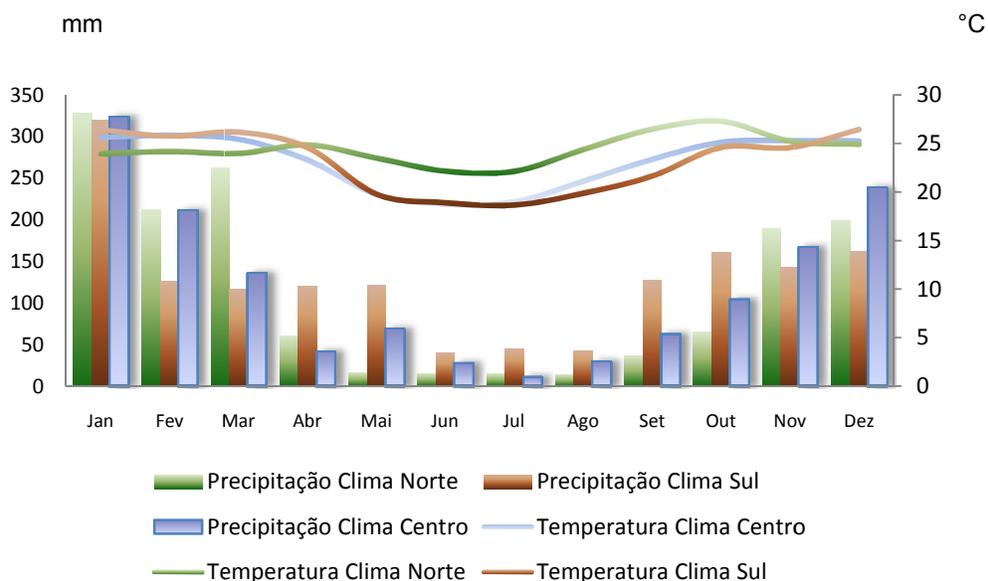


Figura 6 - Precipitação média mensal e temperatura média mensal dos canaviais em estudo no período entre o início da mecanização da colheita até a amostragem

3.7.1 Temperatura

Não foram encontradas diferenças significativas entre a temperatura média anual ($\overline{23,3}^{\circ}\text{C}$) do clima centro (região de Ribeirão Preto) e do clima sul (região de Ourinhos). O clima norte (região de Goianésia) tem uma temperatura média anual mais elevada ($\overline{24,4}^{\circ}\text{C}$). As temperaturas mensais do clima centro/sul possuem pequenas diferenças entre março – abril (Clima Sul $\overline{1,3}^{\circ}\text{C}$ mais alto) e entre agosto - outubro (clima centro $\overline{1,2}^{\circ}\text{C}$ mais alto). Em relação aos climas de centro/sul, o clima norte apresenta uma temperatura mais baixa ($\overline{2,1}^{\circ}\text{C}$) entre janeiro – março e uma temperatura mais alta entre maio – outubro ($\overline{3,75}^{\circ}\text{C}$).

3.7.2 Precipitação

Nos meses de seca, entre junho - agosto, os canaviais do clima norte receberam irrigação de 20 mm por mês. A irrigação foi incluída nos dados de precipitação. A precipitação anual difere pouco entre o clima norte (1417 mm, sendo 60 mm de irrigação) e o clima centro (1420 mm), porém há diferenças na distribuição das chuvas. No clima centro, houve mais precipitação entre maio – dezembro, em relação ao clima norte (Δ 156 mm); e no clima norte houve mais precipitação entre janeiro – abril, em relação ao clima centro (Δ 153 mm). A precipitação anual do clima sul mostra-se significativamente maior (1527 mm), especialmente entre abril – outubro, em relação aos climas centro (Δ 314 mm) e norte (Δ 435 mm).

3.7.3 Dinâmica do carbono da palhada em relação ao solo

O gráfico a seguir mostra o aumento anual de COS (Δ C) em canaviais de colheita mecanizada para cada regime climático, a quantidade anual de carbono que não foi transferido para o solo e os fatores determinantes de COS:

Tabela 6. Estocagem de carbono no solo por meio da palhada depositada.

Clima	Corte	Palhada depositada (anos)	C (Mg ha ⁻¹)	C da palhada remanescente no solo ao ano (Mg ha ⁻¹ a ⁻¹)	Variedade	Palhada seca (Mg ha ⁻¹ a ⁻¹)	C palhada não remanescente no solo ao ano (Mg ha ⁻¹ a ⁻¹)	Solo	Canavial (anos)
Norte	CQ	-	43,4 ±2,13	1,97	SP79 1011	-	1,97 (= 50%)	LV	>15
	SQ	3	49,3 ±1,91	(50%)	SP80 3480	9,55 ±1,61		LV	>15
Centro	CQ	-	58,5 ±2,59	2,00	SP80 1842	-	2,01 (= 50%)	LR	> 15
	SQ	6	70,5 ±1,82	(50%)	SP80 1842	9,70 ±3,12		LR	> 15
Sul	CQ	-	46,1 ±1,46	1,70	SP80 3280	-	1,85 (= 52%)	LR	33
	SQ	4	52,9 ±1,40	(48%)	SP90 3414	8,59 ±2,10		LR	33

SQ = Canaviais sem queima da palhada, CQ = Canaviais com queima da palhada

LR = Latossolo Roxo, LV = Latossolo Vermelho

Palhada seca: média do peso total anual de cada canavial no período compreendido entre o início da mecanização da colheita e a data de amostragem

Carbono: média de 30 repetições

Outras propriedades do solo: 6 repetições, compostas por 5 amostras individuais

± = desvio padrão dos valores

O clima norte ($\Delta C = 1,97$) e o clima centro ($\Delta C = 2,00$) mostram taxas idênticas de carbono remanescente da palhada no solo (50%), ao passo que o clima sul ($\Delta C = 1,70$) revela uma taxa um pouco menos pronunciada (48%), decorrente da menor deposição de palhada (11% a menos) e da taxa mais elevada de decomposição da palhada depositada (aproximadamente 2% maior).

Considerando-se que a palhada depositada do clima sul é de 10% (clima norte) a 11% (clima centro) menor e que neste regime climático se estocou 15% a menos de COS, pode-se concluir que houve uma maior taxa de decomposição da palhada no clima sul. Como a temperatura média anual no clima centro e no clima sul é igual (23,2°C), pode-se deduzir que a maior pluviosidade anual do clima sul (107mm a mais) pode ter causado a decomposição maior. Além disso, vários estudos mostraram que a mineralização de carbono é geralmente estimulada pela

secagem e pelo umedecimento do solo, particularmente no processo de reumidificação de solos secos (MAGID et al., 1999).

Isso se deve ao fato de que a secagem e o umedecimento do solo provocam a ruptura de macroagregados por decomposição física, facilitando assim o acesso dos microorganismos ao COS contido no macroagregado. (BLUME, 1992). Houve um aumento significativo de precipitação em setembro e outubro no clima sul (barra marrom), em relação aos climas norte e centro.

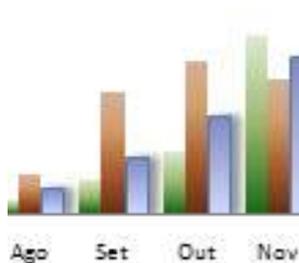


Figura 7: Aumento da precipitação no clima sul em setembro e outubro

Como a diferença entre a palhada depositada e o ganho de COS é muito semelhante (apenas 1,45% a mais no clima centro) entre o clima norte e centro, pode-se deduzir que a taxa de decomposição de carbono nos dois regimes climáticos foi similar, pressupondo-se uma taxa semelhante de transferência de carbono depositado para o solo. Como se percebe uma diferença maior na média anual de temperatura (5% maior no clima norte) do que na precipitação (0,2%), pode-se concluir que temperatura mais elevada no clima norte não aumentou a taxa de decomposição da matéria orgânica.

A constatação de que a maior precipitação no clima sul levou a uma maior decomposição da matéria orgânica fortalece a hipótese de que a decomposição da palhada remanescente em canaviais do centro-sul do Brasil é mais influenciada pela pluviosidade do que pela temperatura.

3 CONCLUSÕES

Não foram constatadas diferenças significativas entre a temperatura média anual e a precipitação (incluindo 60mm de irrigação no clima norte) dos regimes climáticos do norte e do centro. Isso resultou numa deposição de matéria seca da palhada e em taxas de carbono remanescente no solo quase idênticas, ou seja, taxas de decomposição de carbono similares.

O clima centro e o clima sul não apresentaram diferenças significativas de temperatura, apesar de haver uma diferença significativa no nível de precipitação. A diferença de precipitação pode ter causado a taxa de carbono remanescente 2% menor que foi observada nos solos dos canaviais do clima sul.

De acordo com essa hipótese, no que se refere à ação do clima, a decomposição da palhada depositada em plantações de cana-de-açúcar no Centro-Sul do Brasil está sendo controlada principalmente pela precipitação.

4 Avaliação do impacto de não queimar a palhada de cana-de-açúcar sobre a estabilidade de agregados no solo

RESUMO

Na primeira parte do capítulo 4, avaliou-se o impacto da palhada depositada sobre a estabilidade de agregados em solos de canaviais cuja palhada não é queimada antes da colheita.

O estudo foi conduzido no município de Pradópolis no Estado de São Paulo (clima centro). Para destacar melhor o efeito da palhada depositada sobre a estabilidade de agregados, foram escolhidos dois canaviais com determinantes similares no que diz respeito à estabilidade de agregados, tais como teor de argila,

adubação não orgânica e manejo de solo. A estabilidade de agregados foi calculada por meio do peso dos microagregados e macroagregados estáveis em água de fluxo contínuo. No solo de canaviais cuja palhada não é queimada, a estabilidade de agregados aumentou em média 15,3% por ano na profundidade 0-30 cm.

O aumento é causado pela maior formação de macroagregados através do agrupamento de microagregados pela matéria orgânica da palhada depositada. No parágrafo a seguir, descreve-se a evolução da distribuição de agregados no solo. Em seis anos, a participação dos microagregados diminuiu de 47% para 33%. Já a participação dos macroagregados cresceu de 28% para 44%. Isso representa uma redução de 2,3% ao ano em microagregados e um aumento de 2,7% ao ano em macroagregados. O aumento da estabilidade de agregados ressalta o papel dos canaviais sem queima da palhada versus canaviais com queima da palhada no combate ao efeito estufa.

A segunda parte do capítulo 4 avaliou a diferença de estabilidade de agregados entre um canavial com queima da palhada e uma mata nativa do Cerrado. Entre os dois locais de estudo há uma distância de somente 1,5 km, o que assegura a semelhança dos fatores que contribuem para a agregação do solo, isto é, mesmo tipo de solo, teor de argila e condições climáticas. O estudo foi realizado no município de Goianésia no Estado de Goiás (clima norte). O solo da mata nativa mostrou uma estabilidade de agregados significativamente maior (7,2 vezes maior) do que o canavial com queima da palhada. Acredita-se que a maior estabilidade de agregados no solo da mata nativa resulte de seus atributos físico-químicos (maior teor de argila e carbono) e, principalmente, da maior presença de biota no solo, especialmente minhocas e a micorriza.

Conclui-se que os agrossistemas de cana-de-açúcar sem queima tendem a aumentar a estabilidade de agregados no solo. Ressalvando-se a crença de que estes não podem alcançar o patamar dos solos sob mata nativa nesse quesito, pois solos de monoculturas tendem a ter uma biota menos pronunciada e variada do que aqueles encontrados sob mata nativa no Cerrado.

ABSTRACT

The first part of chapter 4 discusses the impact of deposited green trash on the stability of aggregates in soils cultivated with sugar cane. The study was conducted in the County of Pradópolis, State of São Paulo, (Central Climate). With the purpose of specifying the effect of green trash on aggregate stability, the author selected two sugar cane fields with similar characteristics; such as clay content, topography, non-organic fertilization and soil management practices.

Aggregates stability was calculated by weighing micro-aggregates and macro-aggregates, both stable under continuous water flow. Aggregates stability in the soil of sugar cane fields without green trash burning showed an average increase of 15.3% per year for soil depth 0-30 cm. The higher rate of macro-aggregate formation is believed to be the cause for this increase. This higher rate results from the clustering of micro-aggregates in organic matter created by the deposition of green trash in sugar cane fields where green trash burning does not occur.

The participation of micro-aggregates diminished from 47% to 33% in six years. As for the participation of macro-aggregates, there was an increase from 28% to 44%. These figures represent a reduction of 2.3% per year in micro-aggregates and an increase of 2.7% per year in macro-aggregates. The increase in aggregate stability heightens the importance of managing sugar cane plantations without burning green trash, with the goal of mitigating the greenhouse effect.

The second part of chapter 4 discusses aggregate stability differences between the soil of a sugar cane field with green trash burning and a native tropical forest of the Cerrado (savannah) region, both located in the County of Goianésia in the State of Goiás. The distance between the two locations is 1,5 km, ensuring similar soil aggregation factors, such as soil type, clay content and climate factors. The soil of the native forest showed a significantly higher level of aggregate stability (7,2 times higher) when compared to the sugar cane field.

The author believes that this higher soil aggregate stability results from physical-chemical attributes (higher clay and carbon content) found in native forest areas and to the augmented presence of soil biota, especially earthworms and micorriza. The author concludes that soils used for cultivating sugar without green trash burning tend to enhance aggregate stability. However, in terms of aggregate stability, monoculture soils such as sugar cane are no match for soils covered with native tropical forest vegetation of the Brazilian Cerrado (savannah). This is due to the fact that monoculture soils show a smaller presence and diminished variety of soil biota.

4 INTRODUÇÃO

Amézketa (1999) afirma que a agregação do solo é o processo pelo qual agregados de diferentes tamanhos se agrupam e permanecem coesos em resultado da ação de diferentes agentes inorgânicos e orgânicos.

A agregação do solo é influenciada principalmente por estes quatro fatores:

- Fauna do solo;
- Microorganismos do solo;
- Raízes;
- Agentes inorgânicos.

Fauna do solo:

As minhocas influenciam os agregados de solo por meio da escavação e formação de galerias (BROWN, 2000). Esses organismos aumentam a estabilidade de micro- e macroagregados por meio de 3 mecanismos:

- Colagem mecânica por agrupamentos vasculares das plantas ingeridas;
- Crescimento fúngico após a excreção nas galerias;
- Proliferação, no intestino, de microagregados provenientes dos materiais vegetais (Brown, 2000).

Microorganismos no solo:

Jastrow et al. (1998) observaram que as hifas externas exercem a maior influência na quantidade de macroagregados. Em solos argilosos e ricos em óxidos, as bactérias e os fungos desempenham importante papel na agregação, ao produzir polissacarídeos e outros colantes. (DENEFF; SIX, 2003). Quando o pH é baixo, os fungos são os principais microorganismos decompositores de matéria orgânica (THURMAN, 1985).

A micorriza e os fungos saprofitos são os microorganismos de maior relevância na formação e estabilização dos agregados, podendo, no entanto, as bactérias também exercer significativa influência na agregação, especialmente em micro-escala.

Raízes:

As raízes estabilizam agregados ao exudarem certos materiais, em especial mucilagens (secreção rica em polissacarídeos). As mucilagens produzidas pelas raízes promovem diretamente a colagem das partículas do solo.

O grau de influência do processo de exudação das raízes na estrutura de solos varia de acordo com a produção e composição da mucilagem, os quais são determinados pelos seguintes fatores:

- Regime hídrico (influência aumenta com baixa umidade no solo);
- Espécies de plantas;
- Tempo (influência diminui ao longo do tempo);
- Profundidade do solo (influência diminui com a profundidade).

Agentes inorgânicos:

Relatou-se que os óxidos são os agentes colantes dominantes em solos ricos em óxidos (LAMAR; BRESSON, 1989). O efeito agregador do óxido é notado principalmente no nível dos microagregados (IGWE et al. 1999), mas também a macroagregação foi relacionada ao conteúdo de óxido. (IMHOFF et al. 2002).

Os óxidos podem atuar como agentes colantes de três maneiras:

- Materiais orgânicos são adsorvidos na superfície de óxidos (OADES et al, 1989).
- Ocorrência de ligação eletrostática entre óxidos com cargas positivas e minerais de argila com cargas negativas (EL-SWAFY , 1975).
- A camada de óxidos na superfície dos minerais forma pontes entre as partículas primárias e secundárias (MUGGLER et al., 1999)

O ultimo processo é provavelmente o principal responsável pela maior estabilidade de macroagregados em solos ricos em óxidos. O tipo de agregação tem importante papel na proteção da matéria orgânica, ou seja, no seqüestro de COS (LIGO, 2003).

A matéria orgânica do solo inclui uma diversidade de compostos orgânicos, cujas taxas de decomposição dependem das complexas interações de processos

biológicos, químicos e físicos no solo (LIGO, 2003). A interação de MOS com minerais de carga variável contribui para preservar a estocagem de MOS, aprimorando o potencial de solos tropicais e subtropicais atuarem como sumidouro do CO₂ atmosférico (BAYER, 2001).

A MOS produziu cinco a nove vezes mais C e contribuiu com 69-80% do CO₂ atmosférico seqüestrado pelo solo, quando associada a minerais. O aumento da matéria orgânica é parcialmente determinado pelo vínculo entre a reciclagem de macroagregados, a formação de microagregados e a estabilização de C dentro dos microagregados (SIX, 2000b).

Plante (2002) sugere que a relação entre a proteção física da MOS e a reciclagem de macroagregados depende das condições da MOS. No que se refere à MOS estabilizada, quanto mais lenta a reciclagem de macroagregados, maior é o nível de proteção. A entrada de resíduos vegetais estimula a reciclagem de macroagregados e diminui o tempo necessário para a formação de microagregados.

Na maioria dos ecossistemas, especialmente agro-ecossistemas, a macro-agregação apresenta forte componente sazonal (PERFECT, 1990), estimando-se o tempo médio de residência dos macroagregados em 27 dias (PLANTE, 2002). Dentro dos macroagregados ocorre a formação de microagregados, que são importantes para a estabilização do carbono ao longo do tempo nos solos tropicais (especialmente no que se refere à fração mineral desses microagregados) (DENEFF, 2007).

Tisdall & Oades (1982) e Oades (1984) apresentam um modelo conceitual de estrutura do solo que descreve a associação da matéria orgânica com três tipos de unidades físicas existentes nos solos, a saber: partículas primárias (areia, silte e argila); microagregados (0,050 – 0,250mm de diâmetro) e macroagregados

(>0,250mm de diâmetro). Além disso, três tipos de agentes cimentantes atuam na agregação do solo: a) *agente transitório*- composto de polissacarídeos derivados de tecido microbiano e vegetal, facilmente decomposto pela população microbiana; b) *agente temporário*- composto de raízes e hifas, principalmente micorriza; c) *agente persistente*-composto de material húmico em associação com compostos amorfos de Fe e Al e metais catiônicos polivalentes. Os metais agem como ponte entre argila – matéria orgânica e entre matéria orgânica – matéria orgânica (EDWARDS; BRENNER, 1967).

Os macroagregados são constituídos por microagregados unidos por ligações temporárias (raízes e hifas fúngicas e polissacarídeos temporários). Além dos microagregados formados fora dos macroagregados, existe também, de forma predominante, a criação de novos microagregados dentro dos macroagregados (OADES, 1984). A decomposição de restos orgânicos de raízes e hifas que estão incorporadas nos macroagregados produz mucilagem. Esta, por sua vez, reage com argilas incrustando o fragmento orgânico e torna a matéria orgânica mais oclusa e inacessível aos microorganismos.

O resultado final é um microagregado unido por uma matriz de material húmico e mucilagens. A formação de microagregados dentro de macroagregados foi comprovada em estudos de isótopos, onde C marcado foi redistribuído de macroagregados para microagregados ao longo do tempo (ANGERS et al., 1997; GALE et al., 2000; OADES, 1984; ELLIOTT & COLEMAN, 1988). Após o declínio dos materiais lábeis, materiais mais recalcitrantes (por exemplo lignina) se integram a estruturas compactas na forma de microagregados organo-minerais (SHIPITALO, 1989).

Vários estudos verificaram um aumento na respiração do solo após a ruptura dos agregados, sugerindo que os agregados têm a função de proteger a matéria orgânica fisicamente contra o ataque microbiano. A degradação dos agentes ligantes dentro dos macroagregados suscita a perda da estabilidade do macroagregado e a liberação de microagregados estáveis pela quebra do macroagregado em vários microagregados (GUGGENBERGER et al., 1994).

Portanto, a abundância de macroagregados sugere uma maior proteção do C contra a decomposição microbiana. Assim, a relação de macroagregados versus microagregados pode ser usada como uma medida relativa da decomposição de macroagregados, ou seja, da estabilidade de agregados (SIX et al., 2000). Espera-se um aumento do número de macroagregados nos canaviais de colheita mecanizada devido à maior entrada de matéria orgânica— matéria prima da agregação no solo.

A avaliação da estabilidade de agregados em canaviais sem e com palhada remanescente permitirá avaliar se a colheita mecanizada confere ao carbono uma melhor proteção física contra a biodegradação, diminuindo a liberação de COS em forma de CO₂ para a atmosfera.

4 MATERIAL e MÉTODOS

4.1 Seleção das áreas de estudo e amostragem

Os critérios utilizados para a seleção das áreas são os mesmos empregados para a determinação de COS. As sub-amostras usadas para determinar a estabilidade de agregados provêm da amostra usada na determinação de COS. Isso possibilita investigar a correlação entre a estabilidade de agregados e o teor de C no solo.

Para mais detalhes, consultar os itens 2.1 e 2.3 no capítulo 2.

4.2 Número de amostras

Tabela 7. Número adequado de repetições para a determinação da estabilidade de agregados

Profundidade (cm)	Número adequado de repetições			
	Clima Norte		Clima Centro	
	CQ	MN	SQ	CQ
0-5	1	11	1	13
5-10	11	12	7	18
10-20	4	3	4	10
20-30	1	4	7	12
Média	4	8	5	13
Média Total	7,5			

Utilizou-se $d = 20\%$, devido à alta variabilidade do parâmetro. Isso resultou em um número alto de repetições (30) com $d = 10\%$
 SQ = Canaviais sem queima da palhada
 CQ = Canaviais com queima da palhada
 MN = Mata nativa

4.3 Caracterização da estabilidade de agregados

4.3.1 Potencial de maior estabilidade de agregados por meio do manejo de cana-de-açúcar sem queima de palhada

A matéria orgânica constituída por microagregados dentro de macroagregados é mais suscetível à decomposição pela ruptura dos macroagregados. Nesse processo de decomposição, o COS se torna gradualmente desprovido de proteção física e cada vez mais suscetível à decomposição pela atividade microbiana, podendo se transformar em CO_2 atmosférico.

Portanto, é possível avaliar a proteção contra a decomposição do COS comparando-se a relação entre o peso de macroagregados e microagregados de um canalial sem queima versus um canalial com queima, usando a seguinte fórmula:

(8)

$$\text{Estabilidade de Agregados} = \frac{\text{Macroagregados}_p}{\text{Microagregados}_p}$$

onde:

$\text{Macroagregados}_p = \text{Peso dos macroagregados}$

$\text{Microagregados}_p = \text{Peso dos microagregados}$

4.3.2 Preparo das amostras

O pesquisador separou uma fração das amostras usadas na determinação de COS. Estas frações constituíram as amostras, que foram secas ao ar. A seguir, as amostras foram destorroadas, peneiradas a 6 mm e divididas em quatro partes aproximadamente iguais em uma bandeja. As duas partes diagonais foram retiradas e o restante foi bem misturado. Esse procedimento foi repetido até se obter uma quantidade de aproximadamente 20g.

Por fim, foi retirada uma sub-amostra de 5 g para a determinação da estabilidade dos agregados.

4.3.3 Fracionamento em água de fluxo contínuo

Os 5 g da sub-amostra foram divididos em duas frações:

- Matéria orgânica dentro de macroagregados; tamanho: 250 – 6000 μm .
- Matéria orgânica particulada dentro de microagregados: tamanho: 53 – 250 μm .

Aplicou-se a metodologia de Six et al. (2000). O solo é mergulhado em um fracionador com um fluxo de água deionizada (400 ml/min), passando por duas peneiras de 250 μm e 53 μm . O fracionador é agitado com 150 rpm por 2,5 minutos

com 50 esferas de aço inox (diâmetro = 4mm) sobre a peneira de 250 μm . As esferas de aço inox provocam a ruptura parcial dos macroagregados mais frágeis e a liberação dos microagregados dentro dos macroagregados. Os macroagregados são retidos na peneira de 250 μm na forma de macroagregados estáveis, enquanto um fluxo contínuo de água assegura a transferência dos microagregados para a peneira de 53 μm .

O material sobre a peneira de 53 μm é peneirado em água para isolar apenas a fração de microagregados estáveis em água. O material que passou pela peneira de 53 μm é constituído por argila e silte livre e também por microagregados rompidos instáveis em água de fluxo contínuo. A fração restante sobre a peneira de 53 μm é constituído por microagregados estáveis em água de fluxo contínuo e areia. Para separar a areia, a fração restante foi homogeneizada por dispersão, usando água deionizada, e 5% de sódio hexametáfosfato (agitação por 12h). A seguir, o soluto foi passado em uma peneira de 53 μm . Tendo em vista que a fração de areia não é parte constituinte de agregados, considerou-se o soluto, que passou a peneira de 53 μm , como o total de microagregados.

Por fim, as duas frações de microagregados e macroagregados foram secas por três dias à 60 °C e pesadas em seguida. A relação entre os pesos das duas frações determinou a estabilidade relativa dos agregados.

4.4 Agregação do solo

Para calcular a participação de macroagregados, microagregados e da fração não agregada em água de fluxo contínuo, foram utilizados os pesos dos macroagregados e dos microagregados, obtidos pelo fracionamento em água de fluxo contínuo, de acordo com a seguinte fórmula:

$$\%_{Macro} = \frac{P_{Macro}}{P_{inicial}}; \%_{Micro} = \frac{P_{Micro}}{P_{inicial}}; \%_{N.A.} = 100 - (\%_{Macro} + \%_{Micro})$$

onde:

$\%_{Macro}$ = participação de macroagregados no solo

P_{Macro} = peso seco dos macroagregados

$P_{inicial}$ = Peso seco inicial da amostra total (5g)

$\%_{Micro}$ = participação de microagregados no solo

P_{Micro} = peso seco dos microagregados

$\%_{N.A.}$ = participação da fração de agregados não estáveis em água de fluxo contínuo

4.5 Análise estatística

Foi aplicado um teste t de significância. O teste t avaliou se existe uma diferença significativa (nível de confiança $\alpha = 0,05$) entre as médias aritméticas das seguintes variáveis:

- Médias aritméticas da estabilidade de agregados (0-30 cm) de um canalial sem queima da palhada versus um canalial com queima da palhada para o clima centro_(Pradópolis).
- Médias aritméticas da porcentagem de macroagregados no solo (0-30 cm) de um canalial sem queima da palhada versus um canalial com queima da palhada para o clima centro (Pradópolis).
- Médias aritméticas da porcentagem de microagregados no solo (0-30 cm) de um canalial sem queima da palhada versus um canalial com queima da palhada para o clima centro (Pradópolis).
- Médias aritméticas da estabilidade de agregados (0-30 cm) de um canalial com queima da palhada versus uma mata para o clima norte (Goianésia).
- Médias aritméticas da porcentagem de macroagregados no solo (0-30 cm) de um canalial com queima da palhada versus uma mata nativa para o clima norte (Goianésia).
- Médias aritméticas da porcentagem de microagregados no solo (0-30 cm) de um canalial com queima da palhada versus uma mata nativa para o clima norte (Goianésia).

4 RESULTADOS e DISCUSSÃO

4.6 Teste de significância

Tabela 8. Teste t de significância ($p < 5\%$) entre canaviais sem e com a queima da palhada (Pradópolis) e entre canaviais e uma mata nativa (Goianésia) para a profundidade 0-30 cm para as variáveis: estabilidade de agregados (EA), macroagregados e microagregados.

Pradópolis	CQ			Goianésia	CQ		
SQ	0,0003 *	0,0001 *	0,002 *	MN	0,0004 *	0,002 *	0,0001 *
	EA	Macro	Micro		EA	Macro	Micro

SQ = Canavial sem queima da palhada

CQ = Canaviais com queima da palhada

MN = Mata nativa

EA = Estabilidade de agregados

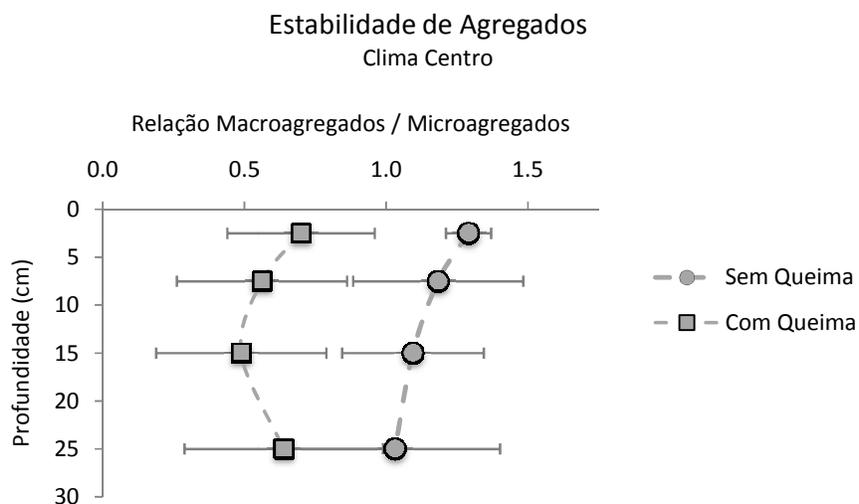
Macro = Macroagregados

Micro = Microagregados

* = média algorítmica das duas variáveis é significativamente desigual com um nível de confiança $\alpha = 0,05$

4.7 Estabilidade de agregados no solo em relação ao tipo de colheita

A figura a seguir mostra a diferença na estabilidade de agregados entre um canavial com e um canavial sem deposição da palhada no regime climático do centro.



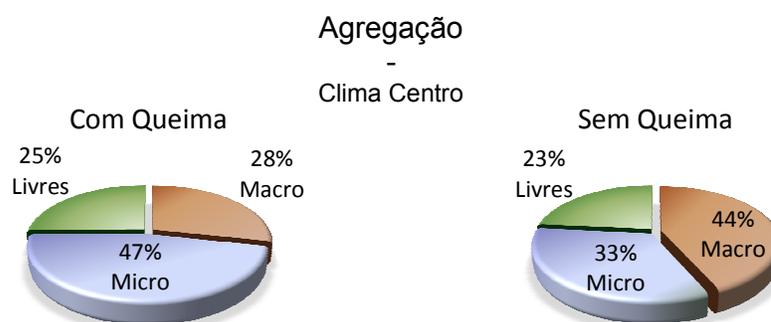
Cada valor representa a média de 3 amostras, compostas por 5 amostras individuais

As barras horizontais representam o erro padrão

Figura 8 – Estabilidade de agregados em solos de canaviais sem e com a queima da palhada

No solo do canavial sem queima da palhada, a estabilidade de agregados aumentou em média 15,3% por ano na profundidade 0-30 cm. Esse aumento é causado pela maior taxa de formação de macroagregados resultante do depósito da matéria orgânica da palhada em canaviais sem queima da palhada.

Nos dois canaviais houve um decréscimo similar e contínuo da estabilidade em função da profundidade, excetuando-se a camada 20-30 cm no canavial com queima da palhada. Esse decréscimo foi provavelmente causado pela introdução da matéria orgânica por cima, favorecendo a formação de macroagregados nas camadas superficiais. A figura a seguir mostra a diferença na distribuição de micro- e macroagregados em um canavial com queima da palhada e um canavial sem queima da palhada:



A fração "Livres" se refere aos agregados instáveis em água e partículas não agregadas
 Micro = Microagregados
 Macro = Macroagregados

Figura 9 – Agregação em solos de canaviais sem e com a queima da palhada na camada 0-30 cm

Os dois tipos de canavial não apresentaram discrepâncias significativas no que se refere à participação das partículas de agregações instáveis em água de fluxo contínuo. Portanto, conclui-se que o aumento dos macroagregados no canavial com a deposição da palhada ocorreu devido ao agrupamento de microagregados individuais e conseqüente criação de macroagregados, e não pela formação de macroagregados derivados de partículas livres, parcialmente oriundas de agregados instáveis em água de fluxo contínuo.

A interligação dos microagregados pode ocorrer mediante ligações eletrostáticas entre óxidos incorporados nos microagregados, com cargas positivas e a matéria orgânica proveniente da palhada depositada, com cargas negativas.

A participação de macroagregados cresceu aproximadamente 2,7% por ano, ao passo que a participação dos microagregados caiu 2,3% ao ano. A tabela a seguir mostra a evolução da estabilidade de agregados e da participação de agregados no solo, juntamente com o ganho anual de carbono no solo e a deposição anual de palhada em canaviais sem e com queima:

Tabela 9. Estabilidade e forma de agregação do solo em canaviais com e sem a queima da palhada na profundidade 0-30 cm.

Clima	Corte	Palhada depositada (anos)	Estabilidade de Agregados	Δ Estabilidade de Agregados (ao ano)	Δ Macro (%) (ao ano)	Δ Micro (%) (ao ano)	Δ C (Mg/ha) (ao ano)	Palhada seca (Mg ha ⁻¹) (ao ano)	Argila %
Centro	CQ	-	0,60 ±0,30	0,09 (15,3%)	-	-	2,69 (4,7%)	-	66,8 ±0,43
	SQ	6	1,15 ±0,25		2,7	-2,3		9,70 ±3,12	67,8 ±1,15

SQ = Canaviais sem queima da palhada

CQ = Canaviais com queima da palhada

Δ Macro = Diferença porcentual de macroagregados, média de 3 repetições, compostas por 5 amostras individuais

Δ Micro = Diferença porcentual de microagregados, média de 3 repetições, compostas por 5 amostras individuais

Palhada seca: média do peso total anual de cada canavial no período compreendido entre o início da mecanização da colheita e a data de amostragem

Carbono: média de 15 repetições

Argila: média de 3 repetições, compostas por 5 amostras individuais

± = desvio padrão

O estoque de COS aumentou 2,69 Mg ha⁻¹ ao ano na mesma profundidade (0-30 cm), o que representa um ganho de 4,7%.

A comparação do ganho anual de COS (4,7%) com o ganho anual da estabilidade de agregados (15,3%); e dos macroagregados (2,7%) e a perda anual dos microagregados (-2,3%), possibilitou verificar se existe uma boa correlação entre o teor de carbono e o de macroagregados no solo.

O gráfico a seguir mostra a correlação entre o teor de carbono no solo e a porcentagem de macroagregados no solo em canaviais com e sem queima da palhada, nos climas do centro e do norte, e também na mata nativa do clima norte.

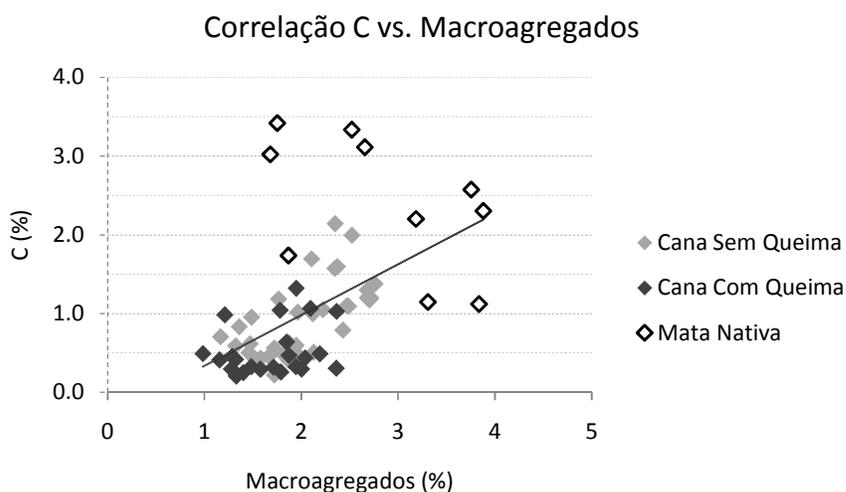


Figura 10 – Correlação entre o teor de carbono e macroagregados em solos de canaviais e uma mata nativa na profundidade 0-30 cm

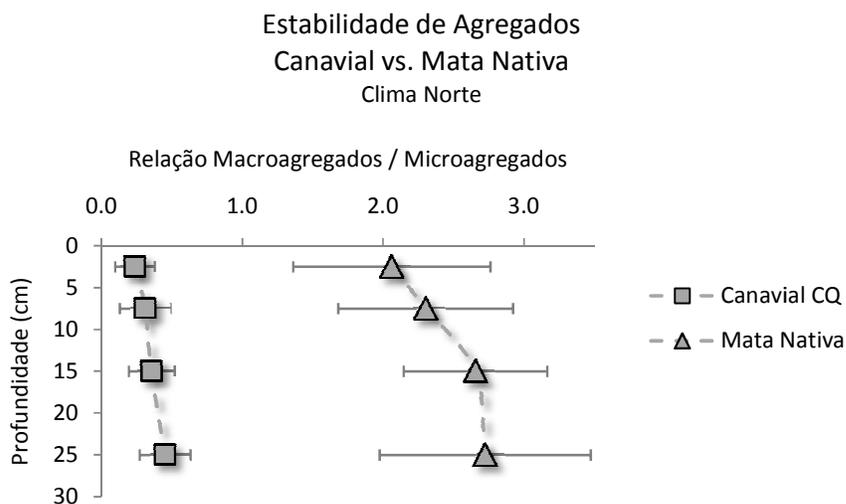
O coeficiente de correlação do produto do momento Pearson calculou uma correlação de $r = 0,65$ para o total dos dados das três situações. O gráfico aponta que a correlação tende a ser menos forte na mata nativa. Os dados da mata nativa se concentram de forma homogênea em torno da linha de regressão, indicando que a mata nativa acompanha a correlação dos canaviais, porém com uma variabilidade maior.

Não se constatou uma diferença significativa na correlação calculada para o canavial sem queima e o canavial com queima da palhada. Isso mostra que a deposição da palhada não somente aumenta o carbono no solo, como também estimula a formação de macroagregados, constatando-se a existência de uma relativa linearidade entre esses dois atributos. Castro et al., (1998) também

encontraram uma relação significativa e positiva entre o carbono orgânico total do solo e a estabilidade de agregados de um Oxisolo do Estado de Paraná.

4.8 Estabilidade de agregados no solo de canaviais vs. solos de vegetação nativa no clima norte

A figura a seguir mostra a estabilidade de agregados no solo de canaviais (sem e com queima da palhada) comparada com a estabilidade de agregados no solo de uma mata nativa próxima aos canaviais (1,5km) e sujeita a condições climáticas semelhantes:



Cada valor representa a média de três amostras, compostas por cinco amostras individuais
As barras horizontais representam o erro padrão

Figura 11 – Estabilidade de agregados no solo de um canavial e de uma mata nativa

A estabilidade de agregados no solo da mata nativa é 7,2 vezes maior do que no canavial com queima da palhada. Para uma discussão mais aprofundada, apresentamos abaixo uma tabela com parâmetros que influenciam a estabilidade de agregados:

Tabela 10. Estabilidade e forma da agregação do solo em um canavial com queima

da palhada e uma mata nativa na profundidade 0-30 cm.

Clima	Vegetação	Estabilidade de Agregados	Macroagregados (%)	Microagregados (%)	Fração instável em água ou livre (%)	C Mg/ha (30cm)	Argila %
Norte	Cana	0,34 ±0,05	17,4 ±1,28	50,5 ±6,98	32,1 ±7,08	43,39 ±2,13	55,2 ±1,38
	Mata	2,44 ±0,64	55,5 ±7,58	24,3 ±6,81	20,2 ±4,42	84,72 ±3,12	66,0 ±2,3

SQ = Canaviais sem queima da palhada

CQ = Canaviais com queima da palhada

Δ Macro = Diferença percentual de macroagregados, média de três repetições, compostas por cinco amostras individuais

Δ Micro = Diferença percentual de microagregados, média de três repetições, compostas por cinco amostras individuais

Palhada seca: média do peso total anual de cada canavial para o período compreendido entre o início da mecanização da colheita e a data de amostragem

Carbono: média de 15 repetições

Argila: média de três repetições, compostas por cinco amostras individuais

± = desvio padrão

A acentuada diferença de estabilidade de agregados entre o solo do canavial e o da mata nativa não pode ser explicada unicamente pelo maior teor de carbono, promovendo a agregação (1,95 vezes maior na mata nativa). Nem tampouco pelo maior teor de argila, que pode formar complexos com óxidos e a matéria orgânica, promovendo também a agregação (1,15 vezes maior na mata nativa).

Além desses dois fatores, acredita-se que o conjunto da fauna do solo (especialmente minhocas), das raízes e dos microorganismos do solo sejam responsáveis pela maior estabilidade de agregados verificada no solo da mata nativa. A Micorriza e os fungos saprofíticos são os microorganismos mais importantes para a formação e estabilização de agregados. Os macroagregados são constituídos por microagregados unidos por ligações temporárias (raízes e hifas fúngicas e polissacarídeos temporários). A micorriza, associação simbiótica entre hifas fúngicas e raízes, ocorre em maior escala na presença de raízes de árvores em vez de plantas.

4 CONCLUSÕES

No solo do canavial sem queima da palhada, a estabilidade de agregados aumentou em média 15,3% por ano na profundidade 0-30 cm.

Esse aumento é causado pela maior taxa de formação de macroagregados, resultante do agrupamento de microagregados. O agrupamento de microagregados, por sua vez, é favorecido pelo depósito da matéria orgânica da palhada nos canaviais sem queima.

A correlação entre o teor de carbono no solo e a estabilidade de agregados mostrou que a deposição da palhada não somente aumenta o carbono no solo, como estimula a formação de macroagregados; constatando-se também a existência de relativa linearidade entre eles.

O aumento da estabilidade de agregados ressalta o importante papel importante dos canaviais sem queima da palhada versus canaviais com queima da palhada no combate ao efeito estufa. Porém, ao se analisar uma vegetação nativa do Cerrado (mata nativa), verificou-se uma estabilidade de agregados superior (7,2 vezes maior) à do canavial com queima da palhada. Acredita-se que a alta estabilidade de agregados no solo da mata nativa seja resultado de atributos físico-químicos (maior teor de argila e de carbono) e da maior presença de biota do solo, especialmente minhocas e a micoriza. Conclui-se que agrossistemas de cana-de-açúcar sem queima tendem a melhorar a estabilidade de agregados, melhorando as taxas de sequestro de carbono no solo.

No entanto, acredita-se que esse agrossistema não pode alcançar o patamar de solos sob mata nativa nesse quesito, uma vez que os solos ocupados por monoculturas tendem a ter uma biota menos pronunciada e variada do que os solos sob mata nativa

5 Análise da proteção de carbono nos agregados estáveis e instáveis em solos ocupados por cultura canavieira

RESUMO

O capítulo 5 avaliou a origem do carbono nos agregados estáveis e instáveis em água de fluxo contínuo a fim de determinar qual fração de carbono, em que tipo de agregação, possui melhor proteção contra a decomposição, mitigando assim a emissão de CO₂ para a atmosfera.

A análise de $\delta^{13}\text{C}$ avaliou a origem do carbono em um canavial do município de Goianésia no Estado de Goiás (clima norte). Houve uma diferença na quantidade de $\delta^{13}\text{C}$ de macroagregados e microagregados na camada superior, com profundidade de até 7 cm. Nessa camada, os macroagregados possuem um índice de $\delta^{13}\text{C}$ (10%) maior do que os dos microagregados. A constatação indica que nessa camada há mais carbono derivado da cobertura vegetal atual (C4), ou seja, a incorporação da palhada ocorre mais pronunciadamente nos macroagregados do que nos microagregados.

O $\delta^{13}\text{C}$ da fração dos agregados instáveis em água de fluxo contínuo é menor em todas as profundidades. Isso indica que a matéria orgânica fresca (C4) encontra-se no solo principalmente sob forma agregada estável em água de fluxo contínuo, o que evidencia o seu papel fundamental na estabilidade dos agregados no solo. Constatou-se que o $\delta^{13}\text{C}$ no macroagregado aumenta com um maior teor de carbono. Isso leva a conclusão de que quanto mais novo o macroagregado, maior é seu teor de carbono. O fato indica que o macroagregado sofre perdas sucessivas de carbono no decorrer do tempo.

Nos microagregados, verificou-se um efeito contrário. Quanto mais velho o microagregado, maior é seu teor de carbono. Atribui-se o fato ao nível de proteção dos microagregados contra a decomposição do carbono. Isso indica que o teor de carbono de um microagregado dotado de uma fração recalcitrante de carbono pode aumentar no decorrer do tempo, em virtude da assimilação de carbono mais novo.

Conclui-se que a melhor proteção contra a decomposição do carbono encontra-se dentro dos microagregados mais antigos, estáveis em água de fluxo contínuo. O fracionamento possibilita também avaliar quanto de carbono C3 e C4 pode ser encontrado na forma de agregação instável em água de fluxo contínuo. O carbono dessa fração é mais suscetível à decomposição, ao contrário do carbono agregado (nos macroagregados ou microagregados), que possui uma proteção contra a decomposição mais eficiente em virtude da macroagregação.

No que se refere ao seqüestro de carbono de longa duração, conclui-se que é fundamental avaliar a proteção do carbono recalcitrante dentro dos microagregados e estudar como as técnicas agrícolas podem proteger esta fração.

ABSTRACT

In Chapter 5, the author evaluates the origin of carbon in water stable/unstable aggregates to determine which form of aggregation creates better protection against carbon decomposition. $\delta^{13}\text{C}$ content was determined using soil samples collected from a sugar cane plantation in Goianésia County, State of Goiás (Northern Climate).

A significant difference in $\delta^{13}\text{C}$ was observed between macro-aggregates and micro-aggregates for the top soil layer (0-7 cm). In this layer, macro-aggregates had up to 10% more $\delta^{13}\text{C}$ than micro-aggregates. This leads to the conclusion that

carbon derived from current plant coverage was predominantly incorporated in macro-aggregates.

As for water unstable aggregates, $\delta^{13}\text{C}$ content was lower for all soil layers. This fact leads to the assumption that organic matter derived from fresh crop residues (C4) is mainly encountered under form of water-stable aggregates, highlighting their fundamental role in aggregate stability.

A correlation analysis revealed a positive correlation between the total C content and its $\delta^{13}\text{C}$ fraction in macro-aggregates, indicating that the more recent a macro-aggregate, the higher its C content. This fact indicates that macro-aggregates are affected by successive C losses as time advances.

Micro-aggregates showed the opposite behavior. The older a micro-aggregate, the higher its C content. This is explained by the micro-aggregates protection against C decomposition, leading to the conclusion that a micro-aggregate's recalcitrant C pool may increase along time through the assimilation of fresh carbon. Therefore, the most protected C pool is to be found in older water-stable micro-aggregates.

During fractioning, the author also calculated how much C3- and C4-derived carbon is associated with water-unstable aggregates. The carbon of this fraction is more sensitive to decomposition, unlike stable aggregated carbon, which is characterized by stronger protection against decomposition.

As far as soil carbon sequestration is concerned, the author highlights the fundamental importance of evaluating the level of protection of recalcitrant C pools in micro-aggregates and of studying the potential of increasing this pool through the adoption of specific agricultural techniques.

5 INTRODUÇÃO

As mudanças do uso da terra, tais como a conversão de ecossistemas naturais em agrossistemas, podem alterar de forma drástica as dinâmicas da matéria orgânica nos solos (SCHLESINGER, 1984), influenciando o fluxo de carbono entre o solo e a atmosfera.

Técnicas isotópicas que utilizam traçadores estáveis (^{13}C) são propícias ao estudo das dinâmicas de solo quando houve mudança no uso da terra (BERNOUX et al., 1998).

Tais técnicas baseiam-se na diferença da composição isotópica do carbono entre plantas do ciclo C3 e C4. Nas plantas de via fotossintética Calvin (C3), a difusão do CO_2 atmosférico que se dá ao longo da camada limite da folha tem um fracionamento de aproximadamente 4‰. Considerando-se a atmosfera como a única barreira para a absorção de CO_2 , a subtração de 4‰ do valor de $\delta^{13}\text{C}$ do CO_2 atmosférico (-8‰) resultaria em um valor isotópico para a planta C3 de -12‰. Porém, é preciso levar em conta a redução enzimática do CO_2 . O $\delta^{13}\text{C}$ médio das plantas C3 situa-se entre os dois extremos, i.e. em torno de -27‰, demonstrando que a variabilidade isotópica de $\delta^{13}\text{C}$ entre as plantas C3 depende do balanço entre a difusão e a demanda enzimática efetuada pelo CO_2 (ALMEIDA LOPES; BENEDITO-CECILIO, 2002).

Na via fotossintética de Hatch Slack (C4), a enzima reduz o CO_2 no valor isotópico de -2‰ para as plantas. Os valores isotópicos das plantas C4 mostram que o seu $\delta^{13}\text{C}$ mantém-se aproximadamente em -14‰ (de -7 a -16‰), valor um pouco mais baixo do que o de uma situação limitada apenas pela difusão do CO_2 . Isso ocorre devido à alta eficiência no uso do CO_2 (ALMEIDA LOPES; BENEDITO-CECILIO,

2002). A maior parte das plantas utilizam a via C3, já as gramíneas tropicais (inclusive cana-de-açúcar) utilizam a via C4. (CERRI; ANDREUX, 1990).

Nos ecossistemas das matas naturais, o carbono orgânico do solo provém exclusivamente de resíduos vegetais de plantas de ciclo C3. Após a instalação de canaviais, o carbono no solo apresenta duas origens: uma remanescente da vegetação anterior (C3 da mata) e outra produzida pela decomposição de seus resíduos vegetais atuais (C4 de cana-de-açúcar), criando condições para a avaliação da origem do COS (CAMPOS, 1998).

Alguns trabalhos sobre o $\delta^{13}\text{C}$ de matas nativas no Brasil constataram faixas de -27,225 ‰ até -26,825 ‰ (MELO, 2004); de -28,017 ‰ até -26,85 ‰ (MARTINS, em fase de elaboração); e de -27,500 ‰ (MORAES, 1996) na profundidade de 30cm.

Cerri e Andreux (1990) analisaram o $\delta^{13}\text{C}$ da palhada de cana-de-açúcar e determinou um valor médio de aproximadamente -13 ‰, subsidiando o estudo da dinâmica de carbono em canaviais. Considera-se oportuno utilizar a técnica isotópica de $\delta^{13}\text{C}$ também em nível de agregados com a finalidade de avaliar o potencial de seqüestro de carbono.

A agregação do solo interfere na decomposição da matéria orgânica (consultar a Introdução do capítulo 4). A técnica isotópica de $\delta^{13}\text{C}$ permite determinar se o carbono derivado da mata nativa é mais abundante nos macroagregados ou nos microagregados. O agregado que possui uma maior abundância do carbono derivado da mata nativa “protegeu” melhor este carbono contra a decomposição microbiana, estimulando o seqüestro de COS.

5 MATERIAL e MÉTODOS

5.1 Seleção das áreas de estudo e a amostragem

Os critérios utilizados para a seleção das áreas são os mesmos empregados na determinação de COS. As sub-amostras para a determinação da estabilidade de agregados provêm da amostra utilizada na determinação de COS. Isso possibilita investigar a correlação entre a estabilidade de agregados e o teor de C no solo.

Para mais detalhes, consultar os itens 1.1 e 1.2 no capítulo 2.

5.2 Determinação de $\delta^{13}\text{C}$

As subamostras foram pesadas em cápsula de estanho. Posteriormente, elas foram queimada em meio oxidante, e os gases produzidos separados por cromatografia gasosa, purificados e carreados por um fluxo contínuo de hélio. A concentração de C (%) e a razão $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ (‰) foram determinados nestes equipamentos: analisador elementar Carlo Erba EA 1110 acoplado a um espectrômetro de massa de razão isotópica, Finnigan Delta Plus.

Os erros analíticos foram de 5% para a concentração de C e 0,5% para a razão isotópica $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$.

O $\delta^{13}\text{C}$, ou seja, a relação $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ é expressa em valores por mil (‰) em relação a um padrão de referência, definido pela fórmula abaixo:

(10)

$$\delta^{13}\text{C} = \left(\frac{\delta^{13}\text{C} - \delta^{13}\text{C}_{\text{padrão}}}{\delta^{13}\text{C}_{\text{padrão}}} \right) \times 1000$$

onde:

$$\delta^{13}\text{C} = \text{Relação isotópica } ^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$$

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{padrão}} = \text{Relação padrão } ^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$$

O padrão (PDB Pee Dee Bellemnite) é um fóssil marítimo do período do Cretáceo localizado na Carolina do Sul, com uma relação $\delta^{13}\text{C} = 0,0112372$

Os materiais biológicos geralmente têm uma razão isotópica menor do que a razão isotópica do padrão, tornando o valor de δ negativo (MELO, 2004).

5.3 Determinação de $\delta^{13}\text{C}$ dos agregados instáveis em água ou não agregados

O $\delta^{13}\text{C}$ da fração não agregada foi calculado por meio da fórmula a seguir:

(11)

$$\delta^{13}C_{NA} = \frac{100 \times \delta^{13}C_{total} - (\delta^{13}C_{Macro} \times \%_{Macro}) - (\delta^{13}C_{Micro} \times \%_{Micro})}{\%_{N.A.}}$$

onde:

$\delta^{13}C_{N.A.}$ = $\delta^{13}\text{C}$ da fração não agregada

$\delta^{13}C_{total}$ = $\delta^{13}\text{C}$ da amostra integral

$\delta^{13}C_{Macro}$ = $\delta^{13}\text{C}$ dos macroagregados

$\delta^{13}C_{Micro}$ = $\delta^{13}\text{C}$ dos microagregados

$\%_{N.A.}$ = Participação da fração não agregada no solo

$\%_{Macro}$ = Participação de macroagregados no solo

$\%_{Micro}$ = Participação de microagregados no solo

5.4 Determinação de C dos agregados instáveis em água ou não agregados

(12)

$$C_{NA} = \frac{100 \times C_{total} - (C_{Macro} \times \%_{Macro}) - (C_{Micro} \times \%_{Micro})}{\%_{N.A.}}$$

onde:

$C_{N.A.}$ = C da fração não agregada

C_{total} = C da amostra integral

C_{Macro} = C dos macroagregados

C_{Micro} = C dos microagregados

$\%_{N.A.}$ = Participação da fração não agregada no solo

$\%_{Macro}$ = Participação de macroagregados no solo

$\%_{Micro}$ = Participação de microagregados no solo

5.5 Análise estatística

Foi aplicado um teste t de significância. O teste t avaliou se existe uma diferença significativa (nível de confiança $\alpha = 0,05$) entre as médias algorítmicas das seguintes variáveis:

- Médias aritméticas de $\delta^{13}C$ no solo (0-30 cm) entre macroagregados e microagregados de um canavial sem queima de palhada do clima norte (Goianésia).
- Médias aritméticas de teor de carbono no solo (0-30 cm) entre macroagregados e microagregados de um canavial sem queima de palhada do clima norte (Goianésia).

5 RESULTADOS e DISCUSSÃO

5.6 Teste de significância

Tabela 11. Teste t de significância ($p < 5\%$) entre $\delta^{13}C$ e teor de carbono nos macroagregados e microagregados no solo de um canavial sem queima da palhada para a profundidade 0-30 cm.

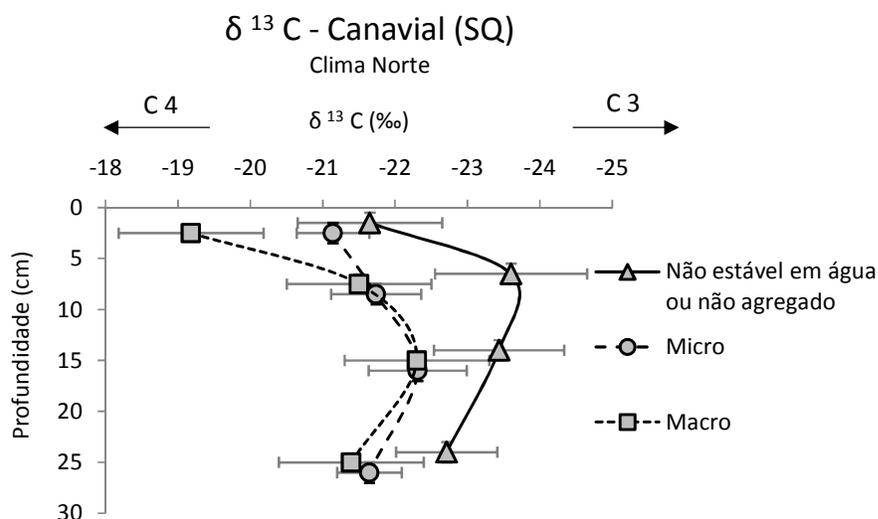
$\delta^{13}C$ (‰)	Micro	C (%)	Micro
Macro	0,44 ns	Macro	0,01 *

Macro = Macroagregados, Micro = Microagregados

ns = média algorítmica das duas variáveis não é significativamente desigual com um nível de confiança $\alpha = 0,05$

* = média algorítmica das duas variáveis é significativamente desigual com um nível de confiança $\alpha = 0,05$

5.7 Avaliação da proteção contra a decomposição do carbono no solo de acordo com a sua forma de agregação



Cada valor representa a média de três amostras, composta por cinco amostras individuais
As barras horizontais representam o erro padrão
C4 = carbono proveniente de plantas C4
C3 = carbono proveniente de plantas C3

Figura 12 - $\delta^{13}\text{C}$ de macroagregados, microagregados e da fração não agregada ou instável em água no solo de um canavial sem queima da palhada

A diferença de $\delta^{13}\text{C}$ entre os macroagregados e microagregados manifesta-se na camada superior (até aproximadamente 7cm), na qual os macroagregados possuem um $\delta^{13}\text{C}$ maior (10%) do que os microagregados, indicando mais carbono derivado da cobertura vegetal atual (C4).

Essa diferença provavelmente decorre da entrada da matéria orgânica da palhada (C4), mostrando que esta matéria orgânica fresca incorporou-se mais aos macroagregados do que aos microagregados, estimulando um aumento da estabilidade dos agregados. A estabilidade maior promove a mitigação de CO_2 , ao conferir uma melhor proteção física contra a decomposição do carbono na forma de CO_2 pela respiração microbiana.

A partir da profundidade de 7 cm, encontram-se semelhanças no $\delta^{13}\text{C}$ de macro- e microagregados. Isso indica que os microagregados não possuem mais carbono C3 do que os macroagregados, contrariando a hipótese de que os microagregados tendem a ter mais carbono antigo, proveniente de usos anteriores da terra (SIX, 2000).

Essa observação está em concordância com Ligo (2003). O referido autor tampouco observou uma diferença significativa de $\delta^{13}\text{C}$ entre macro- e microagregados em canaviais com e sem queima da palhada no Estado de São Paulo, tendo inclusive verificado que o $\delta^{13}\text{C}$ era ligeiramente menor na fração dos macroagregados (1,7% para ambos os canaviais). Até a profundidade de 15 cm houve um decréscimo de $\delta^{13}\text{C}$ em todas as frações, provavelmente causado pela entrada da palhada depositada (C4) por cima.

A partir desta profundidade, constatou-se um aumento de $\delta^{13}\text{C}$ em todas as frações, resultante do fracionamento durante a decomposição dos resíduos vegetais e da subsequente humificação (Agren et al., 1996). O húmus tem um $\delta^{13}\text{C}$ mais alto do que o do resíduo vegetal. O enriquecimento em ^{13}C em função da profundidade do solo foi observado por Cerri e Andreux (1990), e pode ser apontado como efeito do fracionamento durante a decomposição da matéria orgânica ao longo do perfil do solo (MARTINELLI et al., 1999).

O $\delta^{13}\text{C}$ da fração não agregada é mais baixo em todas as profundidades, indicando que a matéria orgânica fresca (C4) encontra-se principalmente de forma agregada no solo, fato que evidencia seu papel fundamental na agregação do solo. Acredita-se que a fração não agregada seja constituída por partículas primárias e secundárias (argila, silte, areia, óxidos de ferro e alumínio) e matéria orgânica,

oriundas de agregados instáveis em água de fluxo contínuo ou oriundas de forma livre no solo.

Considerando que a fração não agregada contém mais carbono C3, ou seja, antigo, conclui-se que o carbono “antigo” desta fração é o carbono C3, decomposto com relativa facilidade, ao contrário do carbono C3 existente em microagregados, que possui uma proteção contra a decomposição mais eficiente. Na figura a seguir, delinea-se o teor de carbono de cada fração, a fim de identificar em que tipo de agregação de solo se encontram os teores de carbono mais altos:

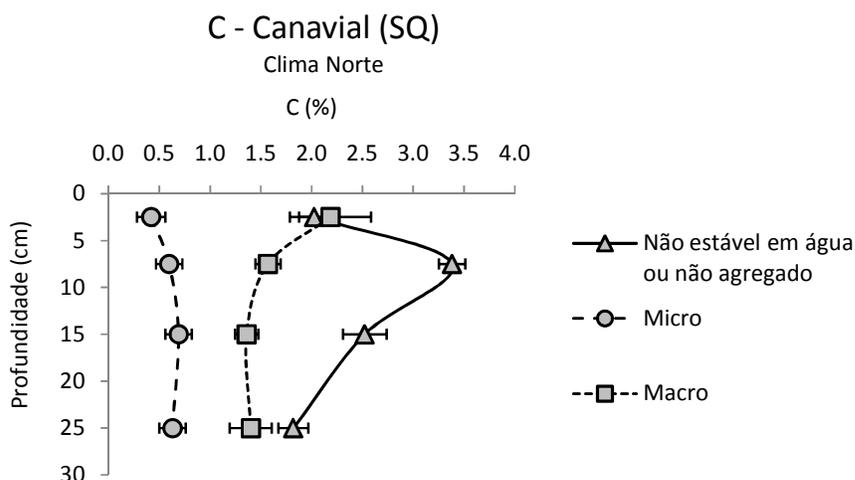


Figura 13 – Teor de carbono nos macroagregados, microagregados e na fração não agregada no solo de um canavial sem queima da palhada

Em todas as profundidades, os macroagregados exibem teores de carbono mais altos, em comparação com os microagregados, evidenciando-se um teor de carbono três vezes maior na profundidade 0-30 cm.

Na camada superficial (0-10 cm), existe uma diferença mais pronunciada entre o teor de carbono de macro e microagregados. Isso se deve provavelmente à maior incorporação, nos macroagregados, de matéria orgânica proveniente da

palhada depositada, como já foi relatado. Considerando que, a partir de 10 cm de profundidade, o carbono nos microagregados não é mais antigo do que o carbono nos macroagregados (ver figura 12), poderia chegar-se à conclusão de que o macroagregado protege melhor o carbono contra a decomposição, pois possui um teor de carbono mais alto.

Porém, acredita-se que a idade do carbono C3 nem sempre se presta à determinação da forma de agregação que confere melhor proteção contra a decomposição ao carbono. Isso porque a análise deve também incorporar a “qualidade” do carbono C3, ou seja, a sua recalcitrância contra a decomposição.

Observando os teores de carbono da fração não agregada, percebe-se que esta fração não somente possui carbono mais antigo (ver figura 12), como também teores de carbono mais elevados que os microagregados e macroagregados, em quase todas as camadas, excetuada a camada 0-5 cm.

A maior quantidade de carbono nessa fração poderia ser interpretada como efeito da participação considerável de resíduos vegetais pouco decompostos e raízes finas com alto teor de carbono na fração não agregada. Entretanto, a hipótese deve ser descartada, já que a análise desta fração revelou uma participação menor de carbono C4, fonte dos resíduos vegetais. Conseqüentemente, acredita-se que uma parte considerável de carbono foi exposta pela ruptura de agregados instáveis em água de fluxo contínuo, o que facilitou a sua decomposição microbiana e aumentou o seu potencial de emissão de CO₂ para a atmosfera.

Para avaliar o comportamento do carbono conforme a origem (C3 ou C4), efetuou-se uma regressão entre o teor de carbono e o $\delta^{13}\text{C}$ de macroagregados e microagregados.

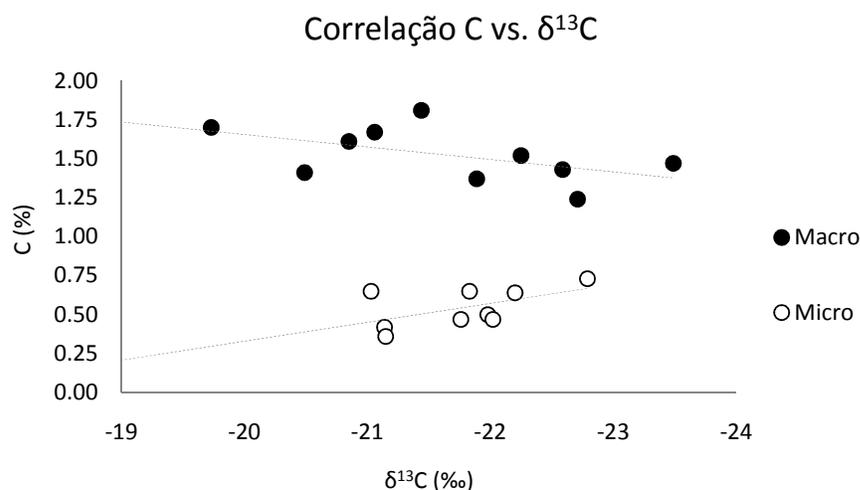


Figura 14 – Correlação entre o teor de carbono e $\delta^{13}\text{C}$ nos macroagregados e Microagregados no solo de um canavial sem queima da palhada

Na correlação feita com os macroagregados, o teor de carbono e $\delta^{13}\text{C}$ foram positivamente correlacionados. Quanto maior o $\delta^{13}\text{C}$, maior foi o teor de carbono. Isso leva à conclusão que, quanto mais novo o macroagregado, maior o seu teor de carbono. Isso indica que a matéria orgânica relativamente recente se agrega preferencialmente na forma de macroagregado, como já foi relatado. A regressão feita com os microagregados revelou uma regressão negativa. Quanto menor o $\delta^{13}\text{C}$, maior foi o teor de carbono.

Isso leva à conclusão que quanto mais velho o microagregado, maior o seu teor de carbono. Esse fato deve-se ao nível de proteção do carbono contra a sua decomposição. Os microagregados com maior parcela de carbono C3 possuem carbono C3 recalcitrante, difícil de ser decomposto, resultando em um teor mais elevado de carbono total, pois o pólo de carbono C4 nos microagregados tende a ser mais facilmente decomposto. A partir da profundidade de 7 cm, encontra-se um $\delta^{13}\text{C}$ bem semelhante entre macro- e microagregados. Isso indica que os microagregados não possuem mais carbono C3 do que os macroagregados,

contrariando a hipótese de que os microagregados tendem a ter mais carbono antigo, proveniente de usos anteriores da terra (SIX, 2000).

Em todas as profundidades, os macroagregados exibem teores de carbono mais altos, em comparação com os microagregados, evidenciando-se um teor de carbono três vezes maior na profundidade 0-30 cm.

5 CONCLUSÕES

Na camada superior do solo, a matéria orgânica fresca incorporou-se mais aos macroagregados do que aos microagregados, aumentando a estabilidade de agregados. Essa estabilidade aumentada promove a mitigação de CO₂, ao conferir uma melhor proteção contra a decomposição do carbono.

O $\delta^{13}\text{C}$ da fração dos agregados instáveis na água de fluxo contínuo é mais baixo em todas as profundidades. Isso indica que a matéria orgânica fresca (C4) no solo é encontrada principalmente sob forma agregada estável em água de fluxo contínuo, constatação que destaca o seu papel fundamental na estabilidade dos agregados no solo.

Quanto maior o $\delta^{13}\text{C}$ no macroagregado, isto é, a participação de carbono C4, maior foi o teor de carbono. Assim, pode-se concluir que quanto mais novo o macroagregado, maior é o seu teor de carbono e, além disso, que o macroagregado sofre perdas sucessivas de carbono ao longo do tempo. Nos microagregados, verificou-se o efeito contrário. Quanto mais velho o microagregado, maior foi o seu teor de carbono. Atribui-se o fato ao nível de proteção contra a decomposição do carbono. Isso indica que o teor de carbono de um microagregado dotado de uma fração recalcitrante de carbono pode crescer no decorrer do tempo, em virtude da assimilação de carbono mais novo.

Conclui-se, portanto, que o carbono mais bem protegido contra decomposição encontra-se dentro dos microagregados mais velhos, estáveis em água de fluxo contínuo. O fracionamento também possibilita avaliar quanto de carbono C3 e C4 encontra-se sob a forma de agregação instável em água de fluxo contínuo. O carbono dessa fração é mais suscetível à decomposição, ao contrário do carbono agregado (nos macroagregados ou microagregados), que possui uma proteção mais eficiente contra a decomposição pela macroagregação.

No que se refere ao seqüestro de carbono de longa duração, conclui-se que é fundamental avaliar a proteção do carbono recalcitrante dentro dos microagregados e estudar como as técnicas agrícolas podem proteger melhor esta fração.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A nova visão mundial sobre a conservação dos recursos naturais renováveis torna cada vez mais comum a adoção de práticas agrícolas conservacionistas, incluindo a prática de não queimar a palhada em canaviais antes da colheita.

Os efeitos do manejo sem queima da cana-de-açúcar foram claros no que se refere ao aumento da matéria orgânica do solo. O aumento foi significativo na camada superficial (0-10 cm) em todos os canaviais dos três regimes climáticos. A permanência desse carbono seqüestrado é fortemente controlada pelo clima, especificamente pela temperatura e precipitação, que influenciam a atividade microbiana de decomposição da matéria orgânica e a conseqüente liberação do carbono do solo na forma de CO₂ para atmosfera.

Esta pesquisa avaliou o impacto do clima sobre o seqüestro de carbono em canaviais sem queima da palhada. O centro-sul “canavieiro” do Brasil estende-se

longitudinalmente de 15° Sul até 24° Sul, e responde por 87,% da produção anual de cana-de-açúcar (UNICA, 2007) no Brasil. Nos regimes climáticos estudados, que representam o Norte (Goianésia), o Centro (Pradópolis) e o Sul (Ourinhos) dessa região, não foram revelaram diferenças significativas entre as respectivas temperaturas e precipitações médias anuais. Porém, o aumento anual de COS levemente menor no clima sul levou a conclusão que, no centro sul canavieiro do Brasil, a precipitação tem um impacto ligeiramente maior sobre a decomposição de carbono. Isso leva a crer que o potencial de seqüestro de carbono aumenta ligeiramente em latitudes mais baixas desta região, devido à menor precipitação.

Além do clima, analisou-se a agregação dos solos de canaviais sem queima da palhada. A estabilidade de agregados no solo do canavial sem queima da palhada aumentou de forma significativa na profundidade 0-30 cm. Esse aumento é causado pela taxa de formação de macroagregados mais alta, resultado do agrupamento de microagregados na matéria orgânica da palhada depositada. O aumento da estabilidade de agregados ressalta o papel importante de canaviais sem queima da palhada no combate ao efeito estufa. O aumento sucessivo da estabilidade de agregados por meio da entrada da matéria orgânica e pode levar à conclusão que a proteção contra a decomposição carbono fica cada vez melhor, aumentando sucessivamente o potencial de seqüestro de carbono. Essa observação é apoiada pelo fato de que Campos (2003) observou um aumento anual de COS de 1Mg/ha em um canavial com três anos de colheita mecanizada na mesma Usina em que foi conduzido o levantamento do clima centro. Relembrando que o presente estudo indicou um aumento anual de 2Mg/ha para a mesma profundidade (0-30 cm) em um canavial com seis anos de colheita mecanizada.

Em relação à vegetação nativa do Cerrado (mata nativa), constatou-se maior estabilidade de agregados no solo da mata nativa do que no canavial. Acredita-se que a estabilidade de agregados é maior no solo da mata nativa em resultado da ação da biota do solo, especialmente minhocas e micoriza.

Conclui-se que o agrossistema de cana-de-açúcar sem queima da palhada tende a elevar a estabilidade de agregados no solo, mas dificilmente alcançará o patamar de solos cobertos por mata nativa nesse quesito, uma vez que a biota dos solos ocupados por monoculturas tende a ser menos pronunciada. Dentro do contexto da agregação do solo, tentou-se também comparar o grau de proteção de carbono nos macroagregados e microagregados.

Quanto maior o $\delta^{13}\text{C}$ no macroagregado, ou seja, a participação de carbono C4, maior foi o teor de carbono. Isso permite concluir que quanto mais novo o macroagregado, maior é seu teor de carbono, o que indica a ocorrência de uma perda sucessiva de carbono no macroagregado à medida que o tempo passa. Nos microagregados verificou-se o efeito contrário. Quanto mais velho o microagregado, maior é seu teor de carbono. Esse fato se deve ao nível de proteção contra a decomposição do carbono, e indica que um microagregado dotado de uma fração recalcitrante de carbono pode ter o seu teor de carbono aumentado no decorrer do tempo, por meio da assimilação de carbono mais novo. No que se refere ao seqüestro de carbono de longa duração, conclui-se que é fundamental avaliar a proteção do carbono recalcitrante dentro dos microagregados e estudar como técnicas agrícolas podem aumentar esta fração.

As constatações aqui relatadas levam o autor a concluir que a entrada contínua de matéria orgânica por meio da palhada pode atuar de maneira significativa no seqüestro de carbono, aumentando a eficiência do agrossistema

cana-de-açúcar no combate ao efeito estufa, e apoiando a inclusão dos solos agrícolas nos Mecanismos de Desenvolvimento Limpo previstos para o segundo período de comprometimento do Protocolo de Quioto, a partir de 2012.

REFERÊNCIAS

ABRAMO FILHO, J. Decomposição da palhada da cana-de-açúcar em canavial colhido sem queima, mecanicamente. 1995. 91 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, Rio Claro. 1995.

ÅGREN, G. I.; BOSATTA, E.; BALESSENT, J. Isotope discrimination during decomposition of organic matter: a theoretical analysis. *Soil Science Society of America Journal*, v. 60, p. 1121-1126, 1996.

ALMEIDA LOPES, C.; BENEDITO-CECILIO, E. Variabilidade isotópica ($\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$) em produtores primários de ambientes terrestres e de água doce. *Acta Scientiarum*, Maringá, v. 24, p. 303-312, 2002.

AMÉZKETA, E. Soil aggregate stability: A review. *Journal of Sustainable Agriculture*, Binghamton, v. 14, p. 83-151, 1999.

ANGERS, D. A.; RECOUS, S.; AITA, C. Fate of carbon and nitrogen in water-stable aggregates during decomposition of $^{13}\text{C}^{15}\text{N}$ -labelled wheat straw in situ. *European Journal of Soil Science*, Oxford, v. 48, p. 295–300, 1997.

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PILLON, C. N.; SANGOI, L. Changes in soil organic matter fractions under subtropical no-tillage cropping systems. *Soil Science Society of America Journal*. Madison, v. 65, p. 1473-1478, 2001.

BERNOUX, M.; CERRI, C. C.; NEILL, C.; de MORAES, J. F. L. The use of stable carbon isotopes for estimating soil organic matter turnover rates. *Geoderma*, Amsterdam, v. 82, p. 43-58, 1998.

BLUME, H.-P. Bodenorganismen. In: SCHACHTSCHABEL, P. et al. *Lehrbuch der Bodenkunde*. Stuttgart: Enke, 1992, p. 77-89.

BROWN, G. G.; BAROIS, I.; LAVELLE, P. Regulation of soil organic matter dynamics and microbial activity in the drilosphere and the role of interactions with other edaphic functional domains. *European Journal Soil Biology*, Montrouge, v. 36, p. 177–198, 2000.

CAMPOS, D. C. *Processo de decomposição e acumulação da palhada resultante do sistema de colheita sem queima da cana-de-açúcar*. 2003. 115 f. Tese (Doutorado) - Escola Superior Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODABOSCHI, A. L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo Roxo distrófico, em função de sistemas de plantio direto, rotação de culturas e métodos de preparo das amostras. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 22, p. 527-538, 1998.

CERRI, C. C.; ANDREUX, F. Changes in organic carbon content in oxisols cultivated with sugar cane and pasture, based on ¹³C natural abundance measurement. In: Proceedings 14th International Congress of Soil Science, 1990, Kyoto, v. 4, p. 98-103.

COLE, V. et al. Agricultural options for mitigation of greenhouse gas emissions. In: WATSON R.T. et al. *Climate change 1995. Impacts, adaptations and mitigation of climate change: Scientific-technical analyses*. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. p. 747-771.

DAVIS, J. G. et al. Variability of soil chemical properties in two sandy Dunal soils of Niger. *Soil Science*, New Brunswick, v.159, p. 321-330, 1995.

DENEF, K.; SIX, J. Clay mineralogy modifies macroaggregate stabilization through active root growth, plant residues and associated microbial activity. *European Journal of Soil Science*, Oxford, 2003.

DENEF, K; ZOTARELLI, L.; BODDEY, R. M.; SIX, J. Microaggregate-associated carbon as a diagnostic fraction for management-induced changes in soil organic carbon in two Oxisols. *Soil Biology & Biochemistry*, Oxford, v. 39, p. 1165-1172, 2007.

EDWARDS, A. P.; BREMNER, J. M. Microaggregates in soils. *Journal of Soil Science*, Oxford, v. 18, p. 64–73, 1967.

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

ELLIOTT, E. T.; COLEMAN, C. A. Let the soil work for us. *Ecological Bulletins*, Oxford, v. 39, p. 23-32, 1988.

EL-SWAIFY, S. A.; EMERSON, W. W. Changes in the physical properties of soil clays due to precipitated aluminum and iron hydroxides. I. Swelling and aggregate stability after drying. *Soil Science Society of America Proceedings*, Madison, v. 39, p. 1056–1063, 1975.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA E AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. *Manual de métodos de análise de solo*. Rio de Janeiro: EMBRAPA, CNPS, 1997. 212 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA E AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. *Emissão de gases do efeito estufa provenientes da queima de resíduos agrícolas no Brasil*. Jaguariúna : Embrapa Meio Ambiente, 1999. 60 p.

ESTADO DE SÃO PAULO. O clima, aqui e lá fora. *Estado de São Paulo*, São Paulo, 25 out. 2002. p. A 2.

FAO. *World soil resources reports 96*: Soil carbon sequestration for improved land management. Rome, 2001.

FARONI, C. E.; VITTI, A. C.; GAVA, G. J. C.; MANZONI, C. S.; PENETTI, C. P.; TRIVELIN, P. C. O. Degradação da palha (^{15}N) de cana-de-açúcar em dois anos consecutivos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, Riberão Preto, 2003.

FIORETTO, A.; MUSACCHIO, A.; ANDOLFI, G.; DE SANTO, A. V. Decomposition dynamics of litters of various pine species in a Corsican pine forest. *Soil Biology & Biochemistry*, Oxford, v. 30, p. 721-727, 1998.

FNP CONSULTARIA E COMÉRCIO. *Agrianual 2002*. São Paulo, 2002. 536 p.

GALE, W. J.; CAMBARDELLA, C. A.; BAILEY, T. B. Root-derived carbon and the formation and stabilization of aggregates. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 64, p. 201-207, 2000.

GUGGENBERGER, G.; ZECH, W.; SCHULTEN, H. R. Formation and mobilization pathways of dissolved organic-matter - evidence from chemical structural studies of organic-matter fractions in acid forest floor solutions. *Organic Chemistry*, Oxford, v. 21, p. 51-66, 1994.

HAMER, U.; MARSCHNER, B. Priming effects of sugars, amino acids, organic acids and catechol on the mineralization of lignin and peat. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, Weinheim, v. 135, p. 177-183, 2002.

IGWE, C. A.; AKAMIGBO, F. O. R.; MBAGWU, J. S. C. Chemical and mineralogical properties of soils in southwestern Nigeria in relation to aggregate stability. *Geoderma*, Amsterdam, v. 92, p. 111–123, 1999.

IMHOFF, S.; DA SILVA, A. P.; DEXTER, A. Factors contributing to the tensile strength and friability of Oxisols. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 66, p. 1656–1661, 2002.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. Global perspective. In: WATSON, R. T. et al. (Ed.). *Land use, land-use change, and forestry*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. p. 25-50.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. *Climate change in 1994: radiative forcing of climate change*. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. 339 p.

JASTROW, J. D.; MILLER, R. M.; LUSSENHOP, J. Contributions of interacting biological mechanisms to soil aggregate stabilization in restored prairie. *Soil Biology & Biochemistry*, Oxford, v. 30, p. 905–916, 1998.

.

KATTERER, T.; REICHSTEIN, M.; ANDREN, O; LOMANDER, A. Temperature dependence of organic matter decomposition: a critical review using literature data analyzed with different models. *Biology and Fertility of Soils*, New York, v. 27, p. 258-262, 1998.

LAL, R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, Washington, v. 304, p. 1623-1627, 2004.

LAL, R. et al. World soils and greenhouse effect: An overview. In: _____ (Ed.). *Soils and global change*. Boca Raton: CRC Press, 1995. p. 1-7.

LAMAR, R.; BRESSON, L. M. Etat d'aggregation et role du fer dans des horizons fersiallitiques: analyse de donnees. *Science du Sol*, Paris, v. 27, p. 243–256, 1989.

LIGO, M. A. V. *Efeito do manejo da palhada da cana-de-açúcar sobre a dinâmica da matéria orgânica e sua relação com os agregados do solo*. 2003. 76 f. Tese (Doutorado) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

LISKI, J.; ILVESNIEMI, H.; MAKELA, A.; WESTMAN, C. J. CO₂ emissions from soil in response to climatic warming are overestimated - The decomposition of old soil organic matter is tolerant of temperature. *Ambio*, Stockholm, v. 2, p. 171-174, 1999.

LOMANDER, A.; KATTERER, T.; ANDREN, O. Modelling the effects of temperature and moisture on CO₂ evolution from top- and subsoil using a multi-compartment approach. *Soil Biology & Biochemistry*, Oxford, v. 30, p. 2023-2030, 1998.

LUCA, E. F. *Matéria orgânica e atributos do solo em sistemas de colheita com e sem queima da cana-de-açúcar*. 2002. 101 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

MAGID, J.; KJAERGAARD, C.; GORISSEN, A.; KUIKMAN, P. J. Drying and rewetting of a loamy sand soil did not increase the turnover of native organic matter, but retarded the decomposition of added C-14-labelled plant material *Soil Biology & Biochemistry*, Oxford, v. 31, p. 595-602, 1999.

MARTINELLI, L. A.; BALLESTER, M. V.; KRUSCHE, A. V.; VICTORIA, R. L.; de CAMARGO, P. B.; BERNARDES, M.; OMETTO, J. P. H. B. Landcover changes and delta C-13 composition of riverine particulate organic matter in the Piracicaba River Basin (southeast region of Brazil). *Limnology and Oceanography*, Waco, v. 44, p. 1826-1833, 1999.

MARTINS, S. C. Ciclagem de nutrientes no solo e na liteira na floresta ombrófila densa na serra do mar. Tese (Doutorado) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, em fase de elaboração.

McBRATNEY, A. B.; WEBSTER, R. How many observations are needed for regional estimation of soil properties? *Soil Science*, New Brunswick, v. 135, p. 177-183, 1983.

MELO, A. W. F. Avaliação do estoque e composição isotópica do carbono do solo no Acre. 2003. 90 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

MORAES, J. L. et al. Soil properties under Amazon forest and changes due to pasture installation in Rondônia, Brazil. *Geoderma*, Amsterdam, v. 70, p. 63-81, 1996.

MUGGLER, C. C. et al. Aggregation, organic matter, and iron oxide morphology in Oxisols from Minas Gerais, Brazil. *Soil Science*, New Brunswick, v. 164, p. 759–770, 1999.

NADELHOFFER, K. J.; GIBLIN, A. E.; SHAVER, G. R.; LAUNDRE, J. A. Effects of temperature and substrate quality on element mineralization in 6 arctic soils. *Ecology*, Washington, v. 72, p. 242-253, 1991.

OADES, J. M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. *Plant and Soil*, Dordrecht, v. 76, p. 319–337, 1984.

OADES, J. M.; GILLMAN, G. P.; UEHARA, G. Interactions of soil organic matter and variable-charge clays. In: COLEMAN, D. C.; OADES, J. M.; UEHARA, G. *Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems*. Honolulu: Hawaii Press, 1989. p. 69–95.

OLIVEIRA, M. W. et al. Decomposição e liberação de nutrientes da palhada de cana-de-açúcar em campo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 34, p. 2359-2362, 1999.

OLIVEIRA, M. W.; TRIVELIN, P. C. O.; KINGSTON, G.; BARBOSA, M. H. P.; VITTI, A. C.; Decomposition and release of nutrients from sugarcane trash in two agricultural environments in Brazil. *Australian Society of Sugar Cane Technologists Proceedings*, Cairns, v. 24, p. 40, 2002.

ORLANDO FILHO, J. et al. Efeitos do sistema de palha (cana crua x cana queimada) sobre algumas propriedades do solo. *STAB - Açúcar, Álcool e Subprodutos*, Piracicaba, v. 16, p. 30-34, 1998.

PERFECT, E. et al. Factors influence soil structural stability within a growing season. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 54, p. 173–179, 1990.

PETERSON, R. G.; CALVIN, L. D. Physical and mineralogical methods. In: KLUTE, A. *Methods of soil analysis: part 1*. Madison: ASA, 1986. p. 33-51.

PLANTE, A. F., MCGILL, W. B. Soil aggregate dynamics and the retention of organic matter in laboratory-incubated soil with differing simulated tillage frequencies. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v. 66, p. 79–92, 2002.

QUEMADA, M.; CABRERA, M. L. Temperature and moisture effects on C and N mineralization from surface applied clover residue. *Plant and Soil*, Dordrecht, v. 1, p. 127-137, 1997.

RAICH, J. W.; POTTER, C. S., BHAGAWATI, D. Interannual variability in global soil respiration, 1980-94. *Global Change Biology*. v. 8, p. 800-812, 2002.

RAIJ, B. A capacidade de troca de cátions das frações orgânica e mineral dos solos. *Bragantia*, Campinas, v. 28, p. 85–112, 1969.

RAIJ, B. van; QUAGGIO, J. A. *Métodos de análise de solo para fins de fertilidade*. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 1983. 16 p. (Circular, 63).

REICHSTEIN, M.; BEDNORZ, F.; BROLL, G.; KATTERER, T. Temperature dependence of carbon mineralisation: conclusions from a long-term incubation of subalpine soil samples. *Soil Biology & Biochemistry*, Oxford, v. 32, p. 947-958, 2000.

RIPOLI, M. L. C.; RIPOLI, T. C. C. . Breve histórico da colheita mecanizada da cana-de-açúcar no Brasil. *Álcoolbrás*, São Paulo, v. 84, p. 114-117, 2004.

SANGER, L. J. et al. Variability in the quality of *Pinus Sylvestris* needles and litter from sites with different soil characteristics: lignin and phenylpropanoid signature. *Soil Biology & Biochemistry*, Oxford, v. 28, p. 829-835, 1996.

SCHLESINGER, W. H. Soil organic matter: A source of atmospheric CO₂. *Scope*, v. 23, p. 117-127, 1984.

SCHLINDWEIN, J. A.; ANGHINONI, I. Variabilidade horizontal de atributos de fertilidade e amostragem do solo no sistema plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 24, p. 85-91, 2000.

SHIPITALO, M. J.; PROTZ, R. Chemistry and micromorphology of aggregation in earthworm casts. *Geoderma*, Amsterdam, v. 45, p. 357-374, 1989.

SISTEMA INTEGRADO DE GESTÃO AMBIENTAL - SIGAM. Disponível em: http://sigam.ambiente.sp.gov.br/sigam2/Legisla%C3%A7%C3%A3o%20Ambiental/Decreto%20Estadual%202003_47.700.pdf. Acesso em: 20 ago. 2007.

SILVA, J. E.; LEMANSKI, J., RESCK, D. V. S. Perdas de matéria orgânica e suas relações com a capacidade de troca catiônica em solos da região de cerrados do oeste baiano. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 18, p. 541–547, 1994.

SILVA, L. L. *Álcool e a nova ordem econômico mundial; frente parlamentar sucroalcooleira*. São Paulo: Segmento, 1996. p. 60-63.

SIX, J.; ELLIOTT, E. T.; PAUSTIAN, K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology & Biochemistry*, Oxford, v. 32, p. 2099-2103, 2000a.

SIX, J.; ELLIOTT, E. T.; PAUSTIAN, K. Soil structure and soil organic matter: II. A normalized stability index and the effect of mineralogy. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 64, p. 1042–1049, 2000b.

SIX, J. et al. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils—effects of no-tillage. *Agronomie*, Paris, v. 22, p. 755–775, 2002.

THORBURN, P. J.; PROBERT, M. E.; ROBERTSON, F. A. Modelling decomposition of sugar cane surface residues with APSIM-Residue. *Field Crops Research*, Amsterdam, v. 70, p. 223-232, 2001.

THURMAN, E. M. *Organic geochemistry of natural waters*. Dordrecht: Martinus Nijhoff, 1985, 1985. 497 p.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, Oxford, v. 62, p. 141–163, 1982.

UNIÃO DA INDÚSTRIA CANAVIEIRA DE SÃO PAULO - UNICA. Disponível em: <http://www.portalunica.com.br/portalunica/?Secao=referencia&SubSecao=estatisticas&SubSubSecao=producao%20Brasil>. Acesso em: 21 ago. 2007.

VITTI, A. C.; OLIVEIRA, M. W.; GAVA, G. J. C.; SARRÍES, G. A. Utilização de nitrogênio e produtividade da cana-de-açúcar (cana-planta) em solo arenoso com incorporação de resíduos da cultura. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 26, p. 637-646, 2002.

APÊNDICE

Apêndice A – Média de estoques de carbono nos solos de canaviais e matas nativas nos três regimes climáticos estudados

Estoques de carbono Mg/ha							
Profundidade (cm)	Clima Norte (Goianésia)			Clima Centro (Pradópolis)		Clima Sul (Ourinhos)	
	SQ	CQ	MN	SQ	CQ	SQ	CQ
00 – 05	10,4 ±1,5	8,0 ±1,5	22,0 ±3,7	13,8 ±1,25	11,1 ±1,5	10,7 ±1,5	8,7 ±0,7
05 - 10	9,4 ±0,7	8,8 ±1,7	18,1 ±2,4	12,7 ±1,0	10,3 ±1,5	9,8 ±0,9	8,3 ±0,8
10 - 20	15,8 ±2,9	14,7 ±2,9	27,1 ±4,1	23,5 ±2,0	19,7 ±3,7	17,9 ±1,7	15,7 ±2,0
20 - 30	13,8 ±2,5	11,9 ±2,5	18,5 ±2,3	20,6 ±3,0	17,4 ±3,6	14,6 ±1,5	13,4 ±2,5
30 - 40	9,3 ±0,3	9,1 ±1,7	15,9 ±1,5	16,0 ±2,9	-	10,9 -	10,7 ±1,3
40 - 50	6,7 ±0,1	7,7 ±0,8	13,1 ±0,4	14,4 ±1,9	-	9,5 ±0,2	9,2 ±0,1
50 - 60	5,8 ±0,1	7,1 ±1,3	9,3 ±0,1	11,2 ±0,5	-	8,7 ±0,2	8,7 ±0,1
60 - 70	5,3 ±0,1	6,3 ±0,1	9,2 ±0,5	10,8 ±0,2	-	8,1 ±0,4	7,3 ±0,1
70 - 80	5,4 ±0,2	5,6 ±0,3	8,5 ±1,2	10,8 ±0,3	-	7,9 ±0,2	7,3 ±0,1
80 - 90	4,5 ±0,4	4,5 ±0,1	8,3 ±1,6	9,9 ±0,4	-	7,6 ±0,4	6,5 ±1,3
90 - 100	4,1 ±0,2	5,0 ±0,6	6,9 ±0,6	9,8 ±0,5	-	7,1 ±0,3	6,3 ±0,1

SQ = Canaviais sem a queima da palhada

CQ = Canaviais com a queima da palhada

MN = Mata nativa

± = desvio padrão

Apêndice B – Densidade média dos solos de canaviais e matas nativas nos três regimes climáticos estudados

Densidade g/cm ³							
Profundidade (cm)	Clima Norte (Goianésia)			Clima Centro (Pradópolis)		Clima Sul (Ourinhos)	
	SQ	CQ	MN	SQ	CQ	SQ	CQ
00 – 05	0,85 ±0,07	1,09 ±0,14	0,79 ±0,09	1,05 ±0,05	1,17 ±0,10	1,19 ±0,14	1,28 ±0,09
05 - 10	1,21 ±0,05	0,99 ±0,12	0,88 ±0,06	1,04 ±0,14	1,22 ±0,01	1,19 ±0,09	1,36 ±0,06
10 - 20	1,38 ±0,04	1,24 ±0,06	1,06 ±0,00	1,07 ±0,09	1,24 ±0,15	1,12 ±0,08	1,30 ±0,09
20 - 30	1,30 ±0,05	1,19 ±0,09	1,09 ±0,01	1,04 ±0,10	1,14 ±0,13	1,18 ±0,22	1,33 ±0,08
30 - 40	1,17 ±0,06	1,19 ±0,06	0,98 ±0,05	1,00 ±0,16	-	1,23 -	1,28 ±0,30
40 - 50	1,18 ±0,01	1,11 ±0,07	1,04 ±0,01	0,96 ±0,05	-	1,20 ±0,09	1,25 ±0,28
50 - 60	1,17 ±0,05	1,14 ±0,03	0,99 ±0,04	1,07 ±0,05	-	1,26 ±0,20	1,23 ±0,10
60 - 70	1,13 ±0,06	1,12 ±0,03	0,98 ±0,04	1,05 ±0,01	-	1,34 ±0,22	1,13 ±0,16
70 - 80	1,11 ±0,01	1,11 ±0,01	1,29 ±0,52	1,02 ±0,00	-	1,09 ±0,24	1,09 ±0,16
80 - 90	1,06 ±0,0	1,08 ±0,00	0,97 ±0,00	1,00 ±0,05	-	1,08 ±0,16	1,14 ±0,09
90 - 100	1,18 ±0,03	1,17 ±0,04	0,93 ±0,03	0,99 ±0,01	-	1,09 ±0,18	1,09 ±0,09

SQ = Canaviais sem a queima da palhada

CQ = Canaviais com a queima da palhada

MN = Mata nativa

± = desvio padrão