

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS DE ENGENHARIAS E CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PRODUÇÃO VEGETAL

SÁVIO TAVARES FERREIRA BORGES

**EFEITO DOS SISTEMAS DE COLHEITA DA CANA-DE-AÇÚCAR SOBRE O
ESTOQUE DE CARBONO NO BRASIL E QUALIDADE DO SOLO EM ALAGOAS**

Rio Largo - AL

2023

SÁVIO TAVARES FERREIRA BORGES

**EFEITO DOS SISTEMAS DE COLHEITA DA CANA-DE-AÇÚCAR SOBRE O
ESTOQUE DE CARBONO NO BRASIL E QUALIDADE DO SOLO EM ALAGOAS**

Dissertação apresentada à coordenação do Programa de Pós-Graduação em Agronomia: Produção Vegetal, CECA/UFAL, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. Stoécio Malta Ferreira Maia

Rio Largo - AL

2023

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Campus de Engenharias e Ciências Agrárias
Bibliotecário Responsável: Erisson Rodrigues de Santana - CRB4 - 1512

B732e Borges, Sávio Tavares Ferreira.

Efeito dos sistemas de colheita da cana-de-açúcar sobre o estoque de carbono no Brasil e qualidade do solo em Alagoas. / Sávio Tavares Ferreira Borges. – 2023.

130f.: il.

Orientador: Stoécio Malta Ferreira Maia.

Dissertação (Mestrado em Agronomia – Produção Vegetal) – Programa de Pós - Graduação em Agronomia, Área de concentração em Produção Vegetal, Campus de Engenharias e Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas. Rio Largo, 2023.

Inclui bibliografia

1. Matéria orgânica do solo. 2. Qualidade do solo. 3. Emissão de gases do efeito estufa. 4. Mitigação
- I. Título.

CDU: 633.61(981.35)

Aos meus pais, Maria Betânia Tavares Ferreira
Borges e José Francisco Borges.

Dedico

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pelo objetivo alcançado e por me guiar em todos os momentos difíceis.

Aos meus pais, Maria Betânia Tavares Ferreira Borges e José Francisco Borges, pelo apoio, incentivo e toda ajuda fornecida. Amo vocês.

Ao meu irmão Arthur Luy Tavares Ferreira Borges pelo incentivo, ajuda, amizade e companheirismo.

A toda minha família que sempre me deu apoio, em especial a minha avó Vanda.

Ao meu orientador, Stoécio Malta Ferreira Maia por ter me aceitado como seu orientado e confiado em meu trabalho, pelo apoio, ensinamentos, paciência, amizade e incentivo.

Aos amigos e colegas de laboratório Crislâny Canuto e Aldair Medeiros pela ajuda valiosa nas coletas de campo e em laboratório e por todo apoio.

Aos meus amigos Marcel, Pedro e Carlos.

A Universidade Federal de Alagoas (UFAL) e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia-Produção Vegetal (PPGA) e a todos os professores.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia de Alagoas (IFAL), *Campus* Marechal Deodoro, por ter me dado a oportunidade de realizar as pesquisas no *Campus* e a todos os funcionários, servidores e colegas de laboratórios.

A todos, que de forma direta ou indireta, contribuíram para a conclusão deste trabalho.

Sou muito grato a todos vocês, **MUITO OBRIGADO!!**

RESUMO

O cultivo de cana-de-açúcar é uma das principais atividades agrícolas do Brasil, dentre os sistemas de colheita da cultura, a mecanizada vem ganhando espaço, principalmente em substituição à colheita com prévia despalha a fogo. A colheita mecanizada deposita sobre a superfície do solo material orgânico, que pode favorecer o aumento de carbono orgânico do solo (COS). Com isso, o objetivo com este trabalho foi avaliar os impactos promovidos pela conversão de cana-de-açúcar com queima (CQ) para cana-de-açúcar com colheita mecanizada (CM) e a conversão de vegetação nativa (VN) para os sistemas CQ e CM sobre os estoques de COS no Brasil, por meio da derivação de fatores de mudança nos estoques de COS, e compartimentos da matéria orgânica do solo (MOS) em Alagoas. Este estudo contemplou amostragens de solo e uma revisão de literatura com dados de COS em áreas de cana-de-açúcar no Brasil. As amostragens de solo ocorreram em áreas de cana-de-açúcar (CQ e CM) e VN. As amostras foram coletadas em cinco repetições por área de estudo nas profundidades de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-50 cm. Foram determinados os estoques de COS, fracionamento físico da MOS, mineralização do carbono, carbono microbiano, densidade, granulometria e complexo sortivo do solo. Brevemente, os fatores de mudança de COS (fatores de emissão), mostraram que a conversão CQ-CM no Brasil, variaram entre $1,03 \pm 0,15$ a $1,21 \pm 0,10$, ou seja, os ganhos oscilaram entre 3% e 21% em função do tempo de conversão, profundidade e da região. Os fatores de mudança nos estoques de COS indicam que a conversão CQ-CM no Sudeste aumenta os estoques de COS em 17% e 16% nas camadas 0-30 e 0-50 cm, respectivamente, após 10 anos de conversão, valor superior ao encontrado no Nordeste (9% e 3%) para a mesma camada e tempo de conversão. A conversão VN-CM, promove reduções nos estoques de COS, apresentando fator variando entre $0,65 \pm 0,07$ a $0,80 \pm 0,04$. A conversão VN-CQ, promove reduções nos estoques de COS, apresentando razão de resposta variando entre $0,65 \pm 0,15$ a $0,85 \pm 0,16$. Os resultados para as alterações nos compartimentos da MOS em Alagoas mostraram que a conversão de VN em áreas de cultivo de cana-de-açúcar, independente do sistema de colheita, reduziu os estoques de COS entre 7% e 62%, reduziu a qualidade do solo devido as alterações de propriedades importantes do solo, tais como, a redução da matéria orgânica particulada (MOP), aumento da densidade do solo e redução da biomassa microbiana (Cmic), sendo corroboradas por índices, como por exemplo, elevados valores do quociente metabólico (qCO_2) e grau de compactação do solo (GCS) e menores valores do índice de estabilidade estrutural (IEE). A conversão CQ-CM apresentou aumento no COS em algumas áreas, entre 2% e 9%. No geral, apresentou melhorias para as propriedades do solo, como, MOP,

densidade e C_{mic} , confirmado por índices que mostram melhoria, por exemplo, menor GCS e maior IEE. Entretanto, não foi um consenso, visto que algumas áreas de CM mostraram valores piores para as propriedades do solo em comparação com CQ.

Palavra-chave: matéria orgânica do solo; qualidade do solo; emissão de gases do efeito estufa; mitigação.

ABSTRACT

The cultivation of sugarcane is one of the main agricultural activities in Brazil, among the crop harvesting systems, the mechanized one has been gaining space, mainly in substitution to the harvest with prior straw removal by fire. Mechanized harvesting deposits organic material on the soil surface, which may favor the increase of soil organic carbon (SOC). Thus, the objective of this work was to evaluate the impacts promoted by the conversion of sugarcane with burning (CQ) to sugarcane with mechanized harvest (CM) and the conversion of native vegetation (VN) to the systems CQ and CM on SOC stocks in Brazil, by deriving change factors in SOC stocks, and soil organic matter (SOM) compartments in Alagoas. This study included soil sampling and a literature review with COS data in sugarcane areas in Brazil. Soil sampling took place in sugarcane areas (CQ and CM) and VN. Samples were collected in five replicates per study area at depths of 0-10, 10-20, 20-30 and 30-50 cm. COS stocks, physical fractionation of SOM, carbon mineralization, microbial carbon, density, granulometry and soil sorption complex were determined. Briefly, the COS change factors (emission factors) showed that the CQ-CM conversion in Brazil ranged from 1.03 ± 0.15 to 1.21 ± 0.10 , that is, gains ranged from 3 % and 21% depending on conversion time, depth and region. The factors of change in the COS stocks indicate that the CQ-CM conversion in the Southeast increases the COS stocks by 17% and 16% in the 0-30 and 0-50 cm layers, respectively, after 10 years of conversion, a value higher than the found in the Northeast (9% and 3%) for the same layer and conversion time. The VN-CM conversion promotes reductions in COS stocks, with a factor ranging from 0.65 ± 0.07 to 0.80 ± 0.04 . The VN-CQ conversion promotes reductions in COS stocks, with response ratios ranging from 0.65 ± 0.15 to 0.85 ± 0.16 . The results for changes in SOM compartments in Alagoas showed that VN conversion in sugarcane cultivation areas, regardless of the harvesting system, reduced COS stocks between 7% and 62%, reduced the quality of the soil due to changes in important soil properties, such as the reduction of particulate organic matter (POM), increase of soil density and reduction of microbial biomass (C_{mic}), being corroborated by indices, such as, for example, high values of the quotient metabolic (qCO_2) and degree of soil compaction (DSC) and lower values of the structural stability index (SSI). The CQ-CM conversion showed an increase in COS in some areas, between 2% and 9%. In general, it showed improvements for soil properties, such as POM, density and C_{mic} , confirmed by indices that show improvement, for example, lower DSC and higher SSI. However, it was not a consensus, as some areas of CM showed worse values for soil properties compared to CQ.

Keyword: soil organic matter; soil quality; emission of greenhouse gases; mitigation.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura 1 – Localização dos municípios onde foram conduzidos os estudos utilizados para derivar os fatores de mudança nos estoques de carbono no Brasil.....	41
Figura 2 - Fatores de mudança dos estoques de COS estimados para as conversões VN-CQ (A), VN-CM (B) e CQ-CM (C).....	50
Figura 3 - Variável respostas entre os estoques de COS encontrado nos sistemas sob vegetação nativa (VN), cana com colheita mecanizada (CM) e cana com queima (CQ) das observações individuais e agrupadas por tempo de uso da terra (≤ 10 e > 10 anos): VN-CQ, n=31; VN-CM, n=95; CQ-CM, n=84.	52

CAPÍTULO II

Figura 1 - Mapa do Estado de Alagoas com foco nos municípios de Campo Alegre e São Miguel dos Campos.	71
Figura 2 - Trincheiras para coleta das amostras de solo.....	74
Figura 3 - Coleta da amostra de densidade do solo.	80
Figura 4 - Índice de estabilidade estrutural do solo dos locais nos tratamentos de cana com colheita mecanizada, cana com queima e vegetação nativa, nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-50 cm.	87
Figura 5 - Estoques de C dos locais e nos tratamentos de cana com colheita mecanizada, cana com queima e vegetação nativa, nas camadas de 0-30 e 0-50 cm.	90
Figura 6 - Estoques de C nas frações da MOS (MOP - matéria orgânica particulada, MOAM - matéria orgânica associada aos minerais) nos locais e nos tratamentos de cana com colheita mecanizada, cana com queima e vegetação nativa, nas camadas de solo de 0-30 e 0-50 cm. .	93
Figura 7 - Contribuição das frações da matéria orgânica do solo MOS (MOP - matéria orgânica particulada, MOAM - matéria orgânica associada aos minerais) nos estoques de C, nos locais e nos tratamentos de cana com colheita mecanizada, cana com queima e vegetação nativa, nas camadas de solo de 0-30 e 0-50 cm.	95
Figura 8 - Índice do grau de compactação do solo dos locais nos tratamentos de cana com colheita mecanizada, cana com queima e vegetação nativa, nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-50 cm.	99
Figura 9 - Emissões de C-CO ₂ cumulativas nos tratamentos de cana com colheita mecanizada, cana com queima e vegetação nativa dos locais, na camada de 0-10 cm, após 50 dias de incubação.	102

Figura 10 - Taxas de decomposição do COS nos tratamentos de cana com colheita mecanizada, cana com queima e vegetação nativa dos locais, na camada de 0-10 cm, após 50 dias de incubação.	104
Figura 11 - Estoque de C da biomassa microbiana do solo nos tratamentos de cana com colheita mecanizada, cana com queima e vegetação nativa dos locais, na camada de 0-20 cm.	107
Figura 12 - Quociente metabólico (qCO_2) de solos nos tratamentos de cana com colheita mecanizada, cana com queima e vegetação nativa dos locais, na camada de 0-10 cm.	108
Figura 13 - Coeficiente microbiano ($qMIC$) de solos nos tratamentos de cana com colheita mecanizada, cana com queima e vegetação nativa dos locais, na camada de 0-10 e 10-20 cm.	109
Figura 14 - Análise de componentes principais na fazenda Pindoba, camada 0-10 cm.	111
Figura 15 - Análise de componentes principais na fazenda Santa Isabel, camada 0-10 cm.	112
Figura 16 - Análise de componentes principais na fazenda São João, camada 0-10 cm.	113

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I

Tabela 1 – Estudos utilizados para avaliar a conversão de vegetação nativa (VN) para cana-de-açúcar com queima (CQ).....	44
Tabela 2 – Estudos utilizados para avaliar a conversão de vegetação nativa (VN) para cana-de-açúcar com colheita mecanizada (CM).	45
Tabela 3 – Estudos utilizados para avaliar a conversão de cana-de-açúcar com queima (CQ) para cana-de-açúcar com colheita mecanizada (CM).....	46
Tabela 4 – Efeito da mudança de uso da terra e manejo no balanço negativo do carbono do solo, potencial de acúmulo de carbono e tempo de retorno para as conversões VN-CQ, VN-CM e CQ-CM no Brasil.....	54

CAPÍTULO II

Tabela 1 - Dados da amostragem de solo e descrição da área de estudo.....	73
Tabela 2 - Dados da caracterização química dos solos em área de cana-de-açúcar com colheita mecanizada, cana-de-açúcar com queima e vegetação nativa nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-50 para os sistemas CM12, CM17, CM3, CM9, CM4, CM8, CQ e VN.....	76
Tabela 3 - Caracterização granulométrica e textura dos solos em área de cana-de-açúcar com colheita mecanizada, cana-de-açúcar com queima e vegetação nativa nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-50 cm para os sistemas CM12, CM17, CM3, CM9, CM4, CM8, CQ e VN. ..	79
Tabela 4 - Teor de C dos locais e nos tratamentos de cana com colheita mecanizada, cana com queima e vegetação nativa, nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-50 cm.	86
Tabela 5 - Densidade do solo dos locais e nos tratamentos de cana com colheita mecanizada, cana com queima e vegetação nativa, nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-50 cm.....	98
Tabela 6 - Emissões total de C-CO ₂ nos tratamentos de cana com colheita mecanizada, cana com queima e vegetação nativa dos locais, na camada de 0-10 cm, após 50 dias de incubação.	101
Tabela 7 - Teor de C da biomassa microbiana do solo nos tratamentos de cana com colheita mecanizada, cana com queima e vegetação nativa dos locais, na camada de 0-10 e 10-20 cm.	106

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	15
2	OBJETIVOS	18
2.1	GERAL.....	18
2.2	ESPECÍFICOS	18
3	REVISÃO DE LITERATURA	19
3.1	Cana-de-açúcar.....	19
3.2	Sistemas de colheita da cana-de-açúcar	20
3.3	Carbono orgânico do solo	22
	REFERÊNCIAS	26
	CAPÍTULO I	32
	RESUMO.....	32
	ABSTRACT	34
1	INTRODUÇÃO	35
2	MATERIAL E MÉTODOS.....	38
2.1	Áreas de estudo	38
2.2	Amostragem de solo e análises	38
2.3	Revisão de literatura	40
2.4	Análise estatística	41
2.5	Tempo de retorno	42
3	RESULTADOS.....	44
3.1	Fatores de mudança do COS.....	44
3.2	Balanço de carbono e tempo de retorno.....	53
4	DISCUSSÃO	55
5	CONCLUSÃO	59
	REFERÊNCIAS	60
	CAPÍTULO II.....	66
	RESUMO.....	66
	ABSTRACT	67
6	INTRODUÇÃO	68
7	MATERIAL E MÉTODOS.....	71
7.1	Caracterização da área de estudo	71
7.2	Amostragem de solo	71
7.3	Análises Químicas.....	74

7.4	Análise granulométrica e classificação textural	78
7.5	Densidade do solo	80
7.6	Fracionamento físico da matéria orgânica do solo.....	81
7.7	Mineralização de Carbono	81
7.8	Carbono microbiano	82
7.9	Carbono total.....	82
7.10	Análise estatística	84
8	RESULTADOS.....	85
8.1	Conteúdo de carbono orgânico do solo	85
8.2	Estoques de carbono do solo.....	88
8.3	Estoque de C das frações da matéria orgânica particulada e associada a minerais	91
8.4	Densidade do solo (Ds)	96
8.5	Mineralização do Carbono	100
8.6	Carbono da biomassa microbiana	105
8.7	Relação dos sistemas de uso da terra com a qualidade do solo.....	110
9	DISCUSSÃO	114
9.1	Conteúdo e estoques totais de carbono orgânico do solo	114
9.2	Fracionamento físico da matéria orgânica do solo.....	116
9.3	Densidade do solo	117
9.4	Atributos biológicos do solo.....	118
9.5	Análise de componentes principais	121
10	CONCLUSÃO	123
	REFERÊNCIAS	124
	APÊNDICE	132

1 INTRODUÇÃO GERAL

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) pertence à família Poaceae e ao gênero *Saccharum*, que engloba várias espécies, embora essa cultura não possua centro de origem exato, acredita-se ser nativa do sudeste da Ásia (CESNIK, 2007; MENANDRO, 2016). É uma planta do ciclo fotossintético C4 muito eficiente na transformação da radiação solar em biomassa e possui ciclo longo de 12 a 18 meses, havendo quatro estágios fenológicos: brotação e emergência, perfilhamento, crescimento e maturação dos colmos (CERRI et al., 2011; MENANDRO, 2016). Seus principais produtos comerciais são o açúcar e o álcool, com produção estimada para a safra 2022/2023 de 33,89 milhões de toneladas de açúcar e 25,83 bilhões de litros de etanol, dos quais 10,42 bilhões de litros são de etanol anidro e 15,41 bilhões de litros de etanol hidratado (CONAB, 2022). Entretanto, também é utilizada por pequenos e médios produtores para a fabricação de açúcar mascavo, cachaça, rapadura e para alimentação animal, como por exemplo, de ruminantes e suínos (OLIVEIRA et al., 2018).

A produtividade média da cana-de-açúcar é de 100 toneladas por hectare de material vegetal, incluindo colmo, folhas secas e brotos, entretanto, alguns produtores conseguem produtividades superior a 150 toneladas por hectare, por decorrência de práticas agrícolas que impulsionam melhorias na qualidade física, química e biológica do solo (OLIVEIRA et al., 2018). Por sua vez, o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com produção estimada para a safra de 2022/2023 de 572,9 milhões de toneladas de colmo industrializáveis em uma área aproximada de 8,12 milhões de hectares (CONAB, 2022). As estimativas para a safra 2022/2023 relatam que São Paulo é o maior produtor de cana-de-açúcar do Brasil, com produção estimada de 283,4 milhões de toneladas, seguido de Goiás, com produção estimada de 72,5 milhões de toneladas, por sua vez, o Estado de Alagoas é o maior produtor da região Nordeste, com produção estimada de 19,1 milhões de toneladas (CONAB, 2022).

Em diversas culturas agrícolas, incluindo a cultura da cana-de-açúcar, os métodos de colheitas antigos foram gradativamente substituídos pelos sistemas de colheita mecanizada (BRAUNBECK; OLIVEIRA, 2006). A colheita com queima prévia da palhada está sendo gradativamente substituída pela colheita mecanizada. Esta mudança tem sido impulsionada por Leis, mas também por outros fatores, tais como, a comercialização da palhada, a escassez de mão obra nas áreas rurais, facilidade no gerenciamento das operações e busca por produtos de baixo impactos ambientais (BRAUNBECK; OLIVEIRA, 2006; MENANDRO, 2016; SAIANI; PEROSA, 2016). Esta mudança vem ocorrendo em níveis distintos entre as regiões brasileiras. Por exemplo, na região Centro-Sul o avanço com a colheita mecanizada é mais pronunciado, visto que os relevos propiciam essa prática. Logo, 97,3% da colheita nessa região brasileira já

ocorre com o uso de máquinas agrícolas e sem queima da palhada, enquanto na região Nordeste, em função do relevo mais acidentado e certa disponibilidade de mão de obra, apenas 22,9% da colheita é mecanizada e sem queima (CONAB, 2022).

Com o sistema de colheita mecanizado e sem queima da cana-de-açúcar a deposição de material seco sob a superfície do solo varia entre 10 e 20 t ha⁻¹ ano⁻¹, advinda das folhas secas e verdes, dos ponteiros e pedaços de colmo (OLIVEIRA et al., 1999; GAVA et al., 2003; CERRI et al., 2011; PEREIRA et al., 2022). A deposição desse material sobre o solo resulta em uma série de benefícios, como, aumento da infiltração e retenção da água, diminuição da evaporação, aumento da capacidade de troca de cátions (CTC), redução da erosão, favorece o controle de plantas daninhas e com a decomposição e mineralização do material orgânico torna-se fonte de nutrientes para as plantas (OLIVEIRA et al., 1999; SILVA NETO et al., 2018; PEREIRA et al., 2022). Por outro lado, algumas complicações também podem ser constatadas com essa técnica, como o aumento da densidade do solo pela intensidade de tráfego de máquinas e pode aumentar a incidência de pragas (SALVI et al., 2007; SILVA et al., 2008; SOUZA et al., 2008, 2015; MENANDRO, 2016).

Adicionalmente, diversos estudos relatam o aumento na quantidade de carbono orgânico do solo (COS) em áreas que adotaram a colheita mecanizada, devido deposição de palhada sobre o solo (SIGNOR, 2010; LUCA et al., 2018; BARROS et al., 2021; FARIAS et al., 2022). Os resíduos da colheita são de fundamental importância para melhorar o acúmulo de C no solo (VILLAMIL et al., 2015; GMACH et al., 2021), tornando-se uma estratégia em potencial para reduzir as emissões de gases do efeito estufa (GEE) e conter o aquecimento global, visto que, conforme o Painel Intergovernamental para Mudanças Climáticas (IPCC, 2021), entre 1850 e 2020, houve aumento da temperatura média da superfície terrestre de aproximadamente 1 °C.

O acúmulo de C do solo não considera apenas o aumento de C do solo, mas o fluxo e a variação das emissões de outros GEE, como por exemplo o metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O), e geralmente é expresso em unidade “equivalente em Carbono (Ceq)” (CERRI et al., 2019). As pesquisas sobre o fluxo do GEE nas áreas de cultivo de cana-de-açúcar são recentes no Brasil, porém, na região Centro-Sul do país as avaliações estão mais avançadas. Neste sentido, Galdos et al. (2010) estudando o fluxo de GEE nos sistemas brasileiros de produção de etanol derivado da cana-de-açúcar, constataram que quando todas as emissões do sistema agrícola são computadas, há uma grande diferença nas emissões entre os sistemas de colheita, para a colheita com queima prévia da palhada foi encontrado emissão de 2.209,2 kg Ceq ha⁻¹ ano⁻¹ e para o sistema com colheita mecanizada 558,5 kg Ceq ha⁻¹ ano⁻¹.

O solo constitui em um compartimento chave para o processo de acúmulo de C, pois o estoque de carbono orgânico do solo tem participação importante no fluxo de GEE (CERRI et al., 2019). Segundo Lal (2004) há cerca do dobro de C em solos comparando-o com a atmosfera. Sendo o maior reservatório terrestre de carbono (C) que, por sua vez, encontra-se estocado na forma de matéria orgânica do solo (MOS). A MOS compreende cerca de 45-60% de sua massa como C orgânico do solo (COS) (LAL, 2004, 2016; DONG et al., 2021). Luca et al. (2018) apresentaram que no estado de São Paulo, Sudeste do Brasil, a conversão do sistema de colheita de cana-de-açúcar com queima para a colheita mecanizada resultou no aumento dos estoques de carbono do solo em uma média de 1,75% por ano, com a maior parte do acúmulo de C ocorrendo na superfície do solo, camada 0-5 cm.

No entanto, além da avaliação do carbono orgânico total (COT), existem outros métodos para o monitoramento da dinâmica da matéria orgânica do solo (MOS), pois são mais sensíveis a mudança de uso da terra e buscam compreender os compartimentos da MOS a fim de traçar estratégias de manejo que reduzam os impactos causados pelo setor agrícola (SOUZA et al., 2006; FONTANA et al., 2011; WENDLING et al., 2011). Entre as formas específicas de avaliação dos compartimentos da MOS, está relacionado à avaliação do fracionamento físico (Matéria orgânica particulada - MOP e matéria orgânica associada a minerais - MOAM), a determinação da biomassa microbiana (C_{mic}) e a mineralização do carbono ($C-CO_2$). Além destes, modelos matemáticos também são utilizados para entender a dinâmica dos estoques de COS em grande escala, como um país, permitindo avaliar o potencial de acúmulo e emissão de C por região, tipo de solo, profundidade e tempo, e fornece resultados no que se refere aos efeitos dos sistemas agrícolas sobre os impactos no COS (MAIA et al., 2009).

Na região Nordeste do Brasil os estudos que avaliam o impacto da conversão do sistema de colheita na cultura de cana-de-açúcar sobre os estoques de COS e qualidade da MOS são incipientes (RESENDE et al., 2006; VASCONCELOS et al., 2014; BARROS et al., 2021), quando comparado a outras regiões brasileiras, como o Sudeste. Assim sendo, é necessário aumentar as informações referente ao C do solo nessa região, para permitir a construção de modelos sobre os impactos das mudanças climáticas, refinar dados sobre C do solo que são necessários para a elaboração do inventário nacional de emissão e remoção dos GEE, contribuirão para a melhoria de políticas públicas nacionais, apresentar informações que ajudem a reduzir os impactos ambientais na cadeia produtiva da cana-de-açúcar além de ajudar a destacar a importância da sustentabilidade na produção de alimentos e biocombustíveis.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Avaliar o impacto da mudança de uso da terra de vegetação nativa para sistemas de produção com queima e sem queima da cana-de-açúcar e avaliar os impactos da mudança de manejo da conversão do sistema de cana-de-açúcar com queima para o sistema de colheita mecanizada em todo o Brasil por meio de fatores de mudança do COS. Além de avaliar os efeitos da mudança do uso da terra (vegetação nativa para cultivo de cana-de-açúcar com e sem queima) e da mudança de manejo da conversão do sistema de cana-de-açúcar com queima para o sistema de colheita mecanizada sobre os estoques de C do solo, e na dinâmica da matéria orgânica do solo, do estado de Alagoas, Brasil.

2.2 ESPECÍFICOS

Derivar fatores de mudança nos estoques de carbono do solo específicos para as condições de produção de cana-de-açúcar no Brasil, com dados medidos em Alagoas e os já disponíveis na literatura.

Avaliar a mudança no tempo, em profundidade e por regiões dos estoques de C do solo por meio dos fatores derivados sobre mudanças nos estoques de C do solo para diferentes camadas (0-30 cm e 0-50 cm), intervalos de tempo (10 e 20 anos) e regiões (Nordeste e Sudeste).

Avaliar como o tempo de uso da terra, sob cana-de-açúcar, afeta os estoques de COT e compartimentos da MOS.

Analisar o impacto, em profundidade do solo, da conversão de vegetação nativa em cana-de-açúcar nos estoques de COT e compartimentos da MOS.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) pertence à família Poaceae e ao gênero *Saccharum*, que engloba várias espécies, entretanto as espécies cultivadas atualmente são todas híbridas. Nesses cruzamentos, busca-se rusticidade, resistência às adversidades e boa qualidade na produção de açúcar. Planta C4 muito eficiente na transformação da radiação solar em biomassa, semiperene que possui ciclo longo de 12 a 18 meses, com até seis ciclos antes do replantio, havendo quatro estágios fenológicos: brotação e emergência, perfilhamento, crescimento e maturação dos colmos. Foi a primeira cultura tropical a ser adaptada à agricultura em larga escala, sendo altamente adaptada aos climas tropicais e subtropicais. Tem como principal produto o açúcar e o álcool, entretanto também é utilizada por pequenos e médios produtores para a fabricação de açúcar mascavo, cachaça, rapadura e para alimentação animal, de ruminantes e suínos, principalmente no período que o preço do milho se encontra elevado (CESNIK, 2007; CERRI et al., 2011; MENANDRO, 2016; OLIVEIRA et al., 2018).

A cana-de-açúcar não possui centro de origem exato e é questionado por diversos autores, entre as regiões mais citadas estão a Índia, Nova Guiné e Polinésia, assim, sem contradições acredita-se ser nativa do sudeste da Ásia. Essa cultura foi introduzida no Brasil por Martim Afonso de Souza no período colonial por volta de 1532, e atualmente consiste em uma das principais culturas da economia do país (CERRI et al., 2011; MENANDRO, 2016). O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com produção estimada de 572,9 milhões de toneladas de colmo industrializáveis em uma área aproximada de 8,12 milhões de hectares, para a safra de 2022/2023 (CONAB, 2022). Esses números permitem o Brasil alcançar elevada produção de açúcar e etanol, com estimativa de rendimentos de 33,89 milhões de toneladas de açúcar e 25,83 bilhões de litros de etanol, dos quais 10,42 bilhões de litros são de etanol anidro e 15,41 bilhões de litros são de etanol hidratado (CONAB, 2022).

A produtividade média da cana-de-açúcar é de 100 toneladas por hectare de material vegetal, incluindo colmo, folhas secas e brotos, entretanto, com o intuito de aumentar a produtividade, algumas práticas agrícolas são adotadas, dentre as quais pode-se citar: a melhoria dos atributos físicos e químicos do solo com a aplicação de gesso, calcário, adubos químicos e adubos verdes e escolha da variedade adequada. Com a adoção destas práticas a produtividade pode chegar a 150 toneladas por hectare. Contudo, produtores com maior poder aquisitivo, e utilizam a irrigação nos cultivos, podem alcançar a produtividade de 200 toneladas de colmos industrializáveis por hectare e atingir maior longevidade do canavial (OLIVEIRA et al., 2018).

3.2 Sistemas de colheita da cana-de-açúcar

A colheita com prévia despalha a fogo foi, durante muitos anos, o método mais utilizado para a colheita de cana-de-açúcar em diversas regiões produtoras no Brasil, pois facilitava o trabalho do trabalhador rural, aumentando sua produtividade e evitando acidentes de trabalhos, como, lesões causadas pelas folhas cortantes e picadas de animais peçonhentos (SAIANI; PEROSA, 2016). Em diversas culturas agrícolas, incluindo a cultura da cana-de-açúcar, os métodos de colheitas antigos foram gradativamente substituídos pelos sistemas de colheita mecanizada (BRAUNBECK; OLIVEIRA, 2006). Essa mudança foi impulsionada por questões legais que dispõem da eliminação gradativa da cana queimada para o sistema de colheita mecanizada, entre outros fatores, como, o interesse das usinas na comercialização da palhada, a escassez de mão obra nas áreas rurais, facilidade no gerenciamento das operações, grande demanda por etanol e a busca dos países por produtos com baixo impacto ambiental, o que incentivou os produtores a inovar e buscar tecnologias sustentáveis, tanto social quanto ambiental (BRAUNBECK; OLIVEIRA, 2006; MENANDRO, 2016; SAIANI; PEROSA, 2016).

A mudança no sistema de colheita ocorreu gradativamente nas diversas regiões produtoras de cana do Brasil, porém, algumas regiões avançaram mais rápido que outras, sobretudo impulsionadas por leis ambientais. No estado de São Paulo, maior produtor de açúcar e álcool do país, este avanço deve-se a Lei Estadual nº 11 241 (19/09/2002), regulamentada pelo decreto nº 47 700 (01/03/2003), que estabeleceu uma gradativa mudança no sistema de colheita, com intuito de encerrar a colheita com prévia despalha a fogo no ano de 2021 (BOLONHEZI et al., 2019). Já na região Nordeste do Brasil, a legislação específica (Decreto nº 2.661, de 1998) determina que apenas as áreas com declividades menores que 12 cm m^{-1} deverão ser colhidas sem despalha a fogo, permanecendo facultativa a queima nas áreas com maior declividade, isto é, as mais susceptíveis a erosão (BOLONHEZI et al., 2019).

Neste contexto, o sistema de colheita com queima vem sendo substituído gradativamente pelo sistema de colheita mecanizada, o qual já representa 88,9% da área total cultivada com cana-de-açúcar no Brasil (CONAB, 2022). Comparativamente com a região Centro-Sul do Brasil, a transição do sistema de colheita com prévia despalha a fogo para o sistema de colheita mecanizado tem ocorrido em taxas bem mais lentas na região Nordeste. Atualmente, a região Centro-Sul é a região com maior porcentagem de área colhida com colheita mecanizada no Brasil, pois se beneficia de relevos propícios a mecanização, sendo 97,3% da colheita utilizando máquinas agrícolas, enquanto a região Nordeste, que possui relevo mais acidentado e maior disponibilidade de mão de obra, apenas 22,9% da colheita é

mecanizada e sem queima (CONAB, 2022). A adoção do sistema de colheita mecanizada tem sido adotada no Nordeste principalmente pelo interesse das usinas em comercializar a palhada do que por legislação específica, onde 50% da palhada é removida para geração de energia e os outros 50% permanecem no campo, visando a sustentabilidade do canavial (BOLONHEZI et al., 2019).

Com a implantação do novo sistema de colheita de cana, tem-se a deposição de matéria orgânica sob a superfície do solo, advinda das folhas secas e verdes, dos ponteiros e quantidade variáveis de pedaços de colmo (OLIVEIRA et al., 1999; GAVA et al., 2003; PEREIRA et al., 2022). A quantidade de resíduo vegetal que permanece na superfície do solo após a colheita mecanizada varia entre 10 e 20 t ha⁻¹ ano⁻¹ de material seco, de acordo com a variedade, a idade, a produtividade do canavial, o corte e as práticas agrícolas adotadas (CERRI et al., 2011). A taxa de decomposição deste material varia de acordo com a temperatura e umidade e não exclusivamente da composição química, porém, constata-se que a maior taxa de decomposição é inicialmente dos carboidratos solúveis (sacarose e amido), posteriormente os carboidratos estruturais (hemicelulose, celulose e lignina) por serem mais resistente ao ataque microbiológico (OLIVEIRA et al., 1999).

A deposição desse material sob o solo resulta em vantagens, tais como, aumento da infiltração da água no solo, diminuição da evaporação, aumento da CTC, diminuição da erosão, favorece o controle de plantas daninhas e com a decomposição e mineralização, vai ser fonte de nutrientes para a cultura (OLIVEIRA et al., 1999; SILVA NETO et al., 2018; PEREIRA et al., 2022). Por exemplo, Aquino et al. (2015), avaliando o sistema radicular e a produtividade de soqueiras de cana-de-açúcar sob diferentes quantidades de palhadas no município de Bandeirantes, estado do Paraná, observaram que o sistema radicular e a produtividade da cana-de-açúcar foram favorecidos com a adoção do sistema de colheita mecanizada e o cessar da queima, sendo necessário pelo menos 50% da palhada para proporcionar aumento da produtividade da cultura. Souza et al. (2012), estudando os efeitos da colheita da cana-de-açúcar com queima nas propriedades químicas e microbiológicas em um Latossolo vermelho no município de Paraguaçu Paulista, estado de São Paulo, encontraram maior teor de fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) em áreas de cana-de-açúcar com colheita mecanizada quando comparada a área com queima. Os resultados observados no trabalho dos autores supracitados também mostraram melhoria na biomassa microbiana do solo.

Por outro lado, há maior intensidade de tráfego com máquinas, o que pode alterar negativamente as propriedades físicas do solo e levar à compactação (SOUZA et al., 2015). Jimenez et al. (2021), avaliando sucessivas colheitas de cana-de-açúcar com colheita

mecanizada em Pernambuco, Brasil, constataram que este tipo de colheita diminui a qualidade física do solo para o desenvolvimento das plantas, principalmente por causa do aumento da compactação e perda da capacidade de aeração do solo. Outro ponto negativo está relacionado a incidência de pragas no canavial, a queima ajuda na redução dos insetos que causam danos à lavoura, e, portanto, na ausência da queima algumas pragas podem se tornar mais importantes no cultivo da cana-de-açúcar, como a cigarrinha (*Mahanarva fimbriolata*), podendo causar grandes prejuízos (SOUZA et al., 2008; MENANDRO, 2016).

3.3 Carbono orgânico do solo

A matéria orgânica do solo (MOS) é uma complexa e variada mistura de substâncias orgânicas, geralmente divididos em dois grupos: lábil e recalcitrante (LAL, 2004, 2016; BRADY; WEIL, 2013; DONG et al., 2021). A MOS contém de duas a três vezes mais carbono (C) que o encontrado em toda a vegetação mundial, tornando o solo o maior reservatório terrestre de C, o qual desempenha um importante papel no balanço global do C e mitigação do aquecimento global (BRADY; WEIL, 2013; LAL et al., 2021). Um sistema de vegetação nativa é considerado um sistema em equilíbrio, nele encontra-se adições e perdas de material orgânico equivalentes, em decorrência da baixa influência antrópica, aporte constante de resíduos vegetais e a formação pela floresta de um microclima que diminui a incidência dos raios solares, das gotas de chuva e reduz a temperatura no solo, preservando assim a matéria orgânica (ABBRUZZINI, 2011; FRACETTO et al., 2012; MEDEIROS et al., 2018). No entanto, esta condição leva vários anos para ser atingida e, dependendo do manejo do solo, é rapidamente desfeita (ABBRUZZINI, 2011). A dinâmica da MOS é influenciada principalmente pelo aporte de resíduos aos solos, temperatura, umidade, tipo de vegetação, textura e drenagem do solo, preparo do solo e manejo agrícola (BRADY; WEIL, 2013).

No cultivo de cana-de-açúcar, o revolvimento do solo para plantio altera a taxa de decomposição da MOS, rompe os agregados que fornecem proteção física para a MOS e, além disso, a prática de queima para posterior colheita contribui para a perda de COS em forma de CO₂ para a atmosfera (ROSSET et al., 2014; LUCA et al., 2018; CAVALCANTI et al., 2020). Entretanto, entre os sistemas de cultivo de cana-de-açúcar, o manejo da colheita mecanizada tem contribuído para ganhos significativos na MOS e qualidade do solo (GALDOS et al., 2009; CERRI et al., 2011). Diversos estudos mostram aumento do teor ou estoques de COS em áreas que adotaram a mudança no sistema de colheita (SIGNOR, 2010; ABBRUZZINI, 2011; ROSSET et al., 2014; SIGNOR et al., 2014, 2016; LUCA et al., 2018; ZANI et al., 2018; BARROS et al., 2021; MOITINHO et al., 2021; ROSSET et al., 2021; FARIAS et al., 2022).

Rosset et al. (2014), avaliando o impacto de diferentes sistemas de manejo da cana-de-açúcar nos atributos químicos, estoques de carbono orgânico total e das frações humificadas da matéria orgânica do solo no município de Maracaju-MS, observaram que as áreas com manutenção da palhada da cana-de-açúcar contribuíram para melhorar os estoques de carbono orgânico total e das frações humificadas, e consequentemente melhoria nos atributos químicos do solo. Barros et al. (2021), em estudo sobre o efeito dos sistemas de colheita de cana-de-açúcar na matéria orgânica do solo no Nordeste do Brasil, constataram o aumento nos estoques de COS, o potencial do sistema sem queima em promover o acúmulo de COS e a melhora na qualidade do solo com a redução da densidade, valores maiores de ácidos fúlvicos e húmicos e fração de carbono com maior estabilidade.

Contudo, para melhor compreensão da dinâmica da MOS em áreas de cultivo de cana-de-açúcar, os estudos não devem focar apenas na avaliação dos estoques de COT, mas também buscar compreender os compartimentos da MOS para traçar estratégias de manejo que reduzam os impactos causados pela agricultura, uma vez que estes compartimentos representam melhor as alterações sofridas pela MOS (SOUZA et al., 2006; FONTANA et al., 2011; WENDLING et al., 2011). Entre as formas específicas de avaliação dos compartimentos da MOS, está relacionado à avaliação do fracionamento físico do solo (Matéria orgânica particulada - MOP e matéria orgânica associada a minerais - MOAM), a determinação da biomassa microbiana (Cmic) e a mineralização do carbono (C-CO₂).

A MOP é considerada como sendo toda a MOS menor que 2 mm e maior que 0,053 mm, representa entre 2% e 30% do COS, é quimicamente ativa, constitui parte do compartimento lábil da MOS e não é protegida da decomposição por meio de associações com os minerais do solo, o que a torna mais acessível aos microrganismos e suas enzimas em situação de perturbação do solo (CAMBARDELLA; ELLIOTT, 1992; ABBRUZZINI, 2011; LAVALLEE et al., 2020). Galdos et al. (2009) avaliando as frações da MOP em estudo de cronossequência em áreas cana-de-açúcar e vegetação nativa no município de Pradópolis do estado de São Paulo, Brasil, observaram que o carbono da MOP é mais sensível às mudanças de manejo dos resíduos que o carbono total e que a área com maior período de adoção do manejo sem queima apresentou maior teor de carbono dessa fração da MOS.

A biomassa microbiana é responsável por regular as transformações e acúmulos de nutrientes, é um componente lábil da fração orgânica do solo e representa de 1% a 3% do conteúdo total do COS (MENDONÇA; MATOS, 2017). É um compartimento sensível e responde rapidamente ao manejo ou mudanças do uso da terra, de forma positiva ou negativa (FRANCHINI et al., 2007; HUNGRIA et al., 2009). Czczyca (2009), estudando a qualidade da

MOS em sistemas de colheita com e sem queima da cana-de-açúcar no município de Pradópolis do estado de São Paulo, Brasil, encontraram maior teor de C_{mic} nas áreas sem queima e também constataram redução do teor de C_{mic} de áreas sob vegetação nativa quando convertida para cultivo de cana, independente do sistema de colheita.

A mineralização do carbono é definida como a soma de todas as funções metabólicas nas quais o CO₂ é produzido tendo como objetivo medir o quanto de C é consumido pela microbiota do solo em determinado período, e por ser sensível às variações de temperatura, manejo, umidade e qualidade dos resíduos, é considerado bom indicador de qualidade do solo (SILVA et al., 2007; MENDONÇA; MATOS, 2017; BARBIERI et al., 2019). As bactérias e fungos estão entre os responsáveis pela liberação de CO₂, via degradação da matéria orgânica do solo (SILVA et al., 2007). Assim, as taxas de mineralização do carbono podem ser interpretadas como um fator positivo ou negativo. Do ponto de vista da liberação de nutrientes e do equilíbrio do ecossistema, altas taxas podem ser consideradas desejáveis, de outro modo, são consideradas indesejáveis quando as altas taxas de mineralização do carbono são atribuídas à decomposição mais acelerada da MOS, devido a oxidação de materiais orgânicos a partir da quebra de agregados pela ação humana ou em resposta a adição de resíduos orgânicos (MAIA et al., 2007; NOVAK et al., 2022). Portanto, é indicado analisar a mineralização do C considerando os valores do quociente metabólico (qCO₂), razão entre a mineralização do carbono por unidade de C_{mic} e tempo, pois consegue-se estimar a eficiência do uso de substrato pelos microrganismos do solo, estabilidade do sistema e presença de estresse metabólico (SILVA et al., 2007; NOVAK et al., 2022).

A avaliação dos estoques de COS é importante, pois, fornece uma base para estimar o impacto absoluto do manejo sobre as mudanças de COS e ajudar a entender a dinâmica da MOS por meio de seus compartimentos, porém, na grande maioria das vezes este tipo de avaliação contempla a influência das práticas de manejo agrícola em estudos locais, possibilitam apenas uma avaliação base do local em estudo e, como resultado, poucos testes mediram com precisão os estoques de COS em longo prazo e em grandes extensões (OGLE et al., 2010; SANDERMAN; BALDOCK, 2010). Entretanto, outro aspecto importante e atual é a avaliação das mudanças dos estoques de C por meio de modelos matemáticos, que visa ampliar e regionalizar as avaliações, todavia, representa um desafio considerável maior (OGLE et al., 2010).

As avaliações em grandes extensões, como em um país, representam um desafio maior pelo motivo de requererem medições de longo prazo para poder capturar pequenas taxas de mudanças no COS, porém, não existem redes de monitoramentos do solo com amostragens

suficientes para conseguir avaliar as mudanças e também a variação dos fatores ambientes existentes que influenciam o COS (OGLE et al., 2010; LIU et al., 2011). Neste caso, os modelos matemáticos estão entre as abordagens usadas para determinar as mudanças do COS em escalas maiores e contornar esse problema, como já foi realizado por diversos pesquisadores (MAIA et al., 2010; MAIA et al., 2010, 2022; CERRI et al., 2011; MELLO et al., 2014; LI et al., 2018; MEDEIROS et al., 2020, 2021, 2022; OLIVEIRA et al., 2022). Este método, permite avaliar o potencial de acúmulo e/ou emissão de C por região, tipo de solo, profundidade e tempo, e fornece resultados no que se refere aos efeitos dos sistemas agrícolas sobre os impactos no COS (MAIA et al., 2009). A obtenção de estimativas confiáveis é crucial para a melhoria de políticas públicas nacionais, traçar estratégias que contribuam para a redução das emissões dos GEE e remoção do CO₂ na atmosfera e recomendar as melhores práticas de gestão agrícola com base no impacto ambiental e na sustentabilidade (MAIA et al., 2013).

Neste sentido, Mello et al. (2014) derivaram fatores de mudança nos estoques de COS em três conversões de uso da terra, (i) vegetação nativa (Cerrado) para cultivo de cana-de-açúcar; (ii) pastagem para cana-de-açúcar e (iii) culturas anuais para cana-de-açúcar, após 20 anos. Os fatores calculados para a primeira conversão foram de $0,74 \pm 0,03$, $0,80 \pm 0,03$ e $0,93 \pm 0,04$ para 0-30 cm, 0-50 cm e 0-100 cm, respectivamente. Já os fatores da segunda conversão foram de $0,90 \pm 0,03$, $0,91 \pm 0,03$ e $0,93 \pm 0,03$ e da terceira conversão foram de $1,16 \pm 0,06$, $1,17 \pm 0,06$ e $1,17 \pm 0,06$, mesmas profundidades.

Da mesma maneira, Maia et al. (2022) derivaram fatores para estimar o potencial do plantio direto como uma solução baseada na natureza para a mitigação das mudanças climáticas no Brasil, para isto derivaram uma série de fatores em diferentes conversões envolvendo o plantio direto, sendo para o período de 20 anos fatores de $0,96 \pm 0,10$ e $1,02 \pm 0,14$ na conversão de floresta nativa para plantio direto, nas camadas de 0-30 e 0-50 cm, respectivamente. Na conversão de cultivo tradicional para plantio direto foram derivados fatores de $1,09 \pm 0,04$ e $1,11 \pm 0,06$ para as camadas de 0-30 e 0-50 cm, respectivamente. Por fim, foi derivado fator de $1,16 \pm 0,16$ na conversão de pastagens para plantio direto e camada de 0-30 cm.

REFERÊNCIAS

- ABBRUZZINI, T. F. **Qualidade e quantidade da matéria orgânica do solo em cultivo convencional e orgânico de cana-de-açúcar**. Dissertação—Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2011.
- AQUINO, G. S. de et al. Sistema radicular e produtividade de soqueiras de cana-de-açúcar sob diferentes quantidades de palhada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 12, p. 1150–1159, 2015.
- BARBIERI, M. et al. Ensaio sobre a bioatividade do solo sob plantio direto em sucessão e rotação de culturas de inverno e verão. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 42, n. 1, p. 122–134, 2019.
- BARROS, D. R. S. et al. Effect of sugarcane harvesting systems on soil organic matter in northeastern region of Brazil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 52, n. 14, p. 1657–1668, 2021.
- BOLONHEZI, D. et al. Manejo e conservação do solo em cana-de-açúcar. Em: BERTOL, I.; de MARIA, I. C.; SOUZA, L. da S. **Manejo e conservação do solo e da água**. 1. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do solo, 2019.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades do solo**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- BRAUNBECK, O. A.; OLIVEIRA, J. T. A. Colheita de cana-de-açúcar com auxílio mecânico. **Engenharia Agrícola**, v. 26, n. 1, p. 300–308, 2006.
- CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, n. 3, p. 777–783, 1992.
- CAVALCANTI, R. Q. et al. Soil physical changes induced by sugarcane cultivation in the Atlantic Forest biome, northeastern Brazil. **Geoderma**, v. 370, p. 114353, 2020.
- CERRI, C. C. et al. Effect of sugarcane harvesting systems on soil carbon stocks in Brazil: an examination of existing data. **European Journal of Soil Science**, v. 62, n. 1, p. 23–28, 2011.
- CERRI, C. E. P. et al. Inter-relação entre a agricultura conservacionista e a mitigação da emissão dos gases de efeito estufa. Em: BERTOL, I.; DE MARIA, I. C.; SOUZA, L. DA S. **Manejo e conservação do solo e da água**. 1. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do solo, 2019.
- CESNIK, R. Melhoramento da cana-de-açúcar: marco sucro-alcooleiro no Brasil. **Revista Eletrônica de Jornalismo Científico**, v. 86, p. 1–4, 2007.
- CONAB. **Cana-de-açúcar: acompanhamento da safra brasileira 2022/2023, 2º levantamento**. Brasília, DF: COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2022.

CZYCZA, R. V. **Quantidade e qualidade da matéria orgânica do solo em sistemas de colheita com e sem queima da cana-de-açúcar**. Dissertação—Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2009.

DONG, H. et al. Responses of soil microbial biomass carbon and dissolved organic carbon to drying-rewetting cycles: A meta-analysis. **CATENA**, v. 207, p. 105610, 2021.

FARIAS, P. G. da S. et al. Physical fractions of organic matter and mineralizable soil carbon as quality indicators in areas under different forms of use in the Cerrado-Pantanal Ecotone. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 194, n. 7, p. 517, 2022.

FONTANA, A. et al. Avaliação dos compartimentos da matéria orgânica em área de Mata Atlântica. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 33, n. 3, p. 545–550, 2011.

FRACETTO, F. J. C. et al. Estoques de carbono e nitrogênio no solo cultivado com mamona na Caatinga. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 5, p. 1545–1552, 2012.

FRANCHINI, J. et al. Microbiological parameters as indicators of soil quality under various soil management and crop rotation systems in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 92, n. 1–2, p. 18–29, 2007.

GALDOS, M. V. et al. Net greenhouse gas fluxes in Brazilian ethanol production systems. **GCB Bioenergy**, v. 2, n. 1, p. 37–44, 2010.

GALDOS, M. V.; CERRI, C. C.; CERRI, C. E. P. Soil carbon stocks under burned and unburned sugarcane in Brazil. **Geoderma**, v. 153, n. 3–4, p. 347–352, 2009.

GAVA, G. J. C. et al. Recuperação do nitrogênio (^{15}N) da ureia e da palhada por soqueira de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 4, p. 621–630, 2003.

GMACH, M. R. et al. Soil dissolved organic carbon responses to sugarcane straw removal. **Soil Use and Management**, v. 37, n. 1, p. 126–137, 2021.

HUNGRIA, M. et al. Soil microbial activity and crop sustainability in a long-term experiment with three soil-tillage and two crop-rotation systems. **Applied Soil Ecology**, v. 42, n. 3, p. 288–296, 2009.

IPCC. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: IPCC, 2021.

JIMENEZ, K. J. et al. Soil Physical Indicators of a Sugarcane Field Subjected to Successive Mechanised Harvests. **Sugar Tech**, v. 23, n. 4, p. 811–818, 2021.

LAL, R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. **Geoderma**, v. 123, n. 1–2, p. 1–22, 2004.

LAL, R. Soil health and carbon management. **Food and Energy Security**, v. 5, n. 4, p. 212–222, 2016.

LAL, R. et al. The role of soil in regulation of climate. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 376, n. 1834, p. 20210084, 2021.

LAVALLEE, J. M.; SOONG, J. L.; COTRUFO, M. F. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. **Global Change Biology**, v. 26, n. 1, p. 261–273, 2020.

LI, Y. et al. Long-term (≥ 20 years) application of fertilizers and straw return enhances soil carbon storage: a meta-analysis. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 23, n. 4, p. 603–619, 2018.

LIU, Z.; SHAO, M.; WANG, Y. Effect of environmental factors on regional soil organic carbon stocks across the Loess Plateau region, China. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 142, n. 3–4, p. 184–194, 2011.

LUCA, E. F. et al. Effect of conversion from sugarcane preharvest burning to residues green-trashing on SOC stocks and soil fertility status: Results from different soil conditions in Brazil. **Geoderma**, v. 310, p. 238–248, 2018.

MAIA, S. M. F. et al. Organic carbon pools in a Luvisol under agroforestry and conventional farming systems in the semi-arid region of Ceará, Brazil. **Agroforestry Systems**, v. 71, n. 2, p. 127–138, 2007.

MAIA, S. M. F. et al. Effect of grassland management on soil carbon sequestration in Rondônia and Mato Grosso states, Brazil. **Geoderma**, v. 149, n. 1–2, p. 84–91, 2009.

MAIA, S. M. F. et al. Changes in soil organic carbon storage under different agricultural management systems in the Southwest Amazon Region of Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 106, n. 2, p. 177–184, 2010a.

MAIA, S. M. F. et al. Soil organic carbon stock change due to land use activity along the agricultural frontier of the southwestern Amazon, Brazil, between 1970 and 2002. **Global Change Biology**, v. 16, n. 10, p. 2775–2788, 2010b.

MAIA, S. M. F. et al. Contrasting approaches for estimating soil carbon changes in Amazon and Cerrado biomes. **Soil and Tillage Research**, v. 133, p. 75–84, 2013.

MAIA, S. M. F. et al. Potential of no-till agriculture as a nature-based solution for climate-change mitigation in Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 220, p. 105368, 2022.

MEDEIROS, A. de S. et al. Organic carbon, nitrogen and the stability of soil aggregates in areas converted from sugarcane to eucalyptus in the state of Alagoas. **Revista Árvore**, v. 42, n. 4, 2018.

MEDEIROS, A. de S. et al. Soil carbon losses in conventional farming systems due to land-use change in the Brazilian semi-arid region. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 287, p. 106690, 2020.

MEDEIROS, A. de S. et al. Losses and gains of soil organic carbon in grasslands in the Brazilian semi-arid region. **Scientia Agricola**, v. 78, n. 3, 2021.

MEDEIROS, A. de S.; SANTOS, T. C. DOS; MAIA, S. M. F. Effect of long-term and soil depth on soil organic carbon stocks after conversion from native vegetation to conventional tillage systems in Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 219, p. 105336, 2022.

MELLO, F. F. C. et al. Payback time for soil carbon and sugar-cane ethanol. **Nature Climate Change**, v. 4, n. 7, p. 605–609, 2014.

MENANDRO, L. M. S. **Caracterização e aproveitamento agrônômico e industrial de ponteiros e folhas secas da cana-de-açúcar**. Dissertação—Campinas, SP: Instituto Agrônômico, 2016.

MENDONÇA, E. de S.; MATOS, E. DA S. **Matéria Orgânica do solo: Métodos de Análises**. 2ª ed. Viçosa: UFV-Gefert, 2017.

MOITINHO, M. R. et al. Effects of burned and unburned sugarcane harvesting systems on soil CO₂ emission and soil physical, chemical, and microbiological attributes. **CATENA**, v. 196, p. 104903, 2021.

NOVAK, E. et al. Biomassa e atividade microbiana do solo sob diferentes coberturas vegetais em Região Cerrado - Mata Atlântica. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 15, n. 3, p. 1–16, 2022.

OGLE, S. M. et al. Scale and uncertainty in modeled soil organic carbon stock changes for US croplands using a process-based model. **Global Change Biology**, v. 16, n. 2, p. 810–822, 2010.

OLIVEIRA, D. C. de et al. Changes in soil carbon and soil carbon sequestration potential under different types of pasture management in Brazil. **Regional Environmental Change**, v. 22, n. 3, p. 87, 2022.

OLIVEIRA, M. W. de et al. Decomposição e liberação de nutrientes da palhada de cana-de-açúcar em campo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, n. 12, p. 2359–2362, 1999.

OLIVEIRA, M. W. de et al. Mineral Nutrition and Fertilization of Sugarcane. Em: **Sugarcane - Technology and Research**. InTech, 2018.

PEREIRA, M. G. et al. Decomposição e liberação do nitrogênio, fósforo e potássio da palhada de duas variedades de cana-de-açúcar no nordeste do Brasil. **Concilium**, v. 22, n. 4, p. 411–418, 2022.

RESENDE, A. S. de et al. Long-term effects of pre-harvest burning and nitrogen and vinasse applications on yield of sugar cane and soil carbon and nitrogen stocks on a plantation in Pernambuco, N.E. Brazil. **Plant and Soil**, v. 281, n. 1–2, p. 339–351, 2006.

ROSSET, J. S. et al. Influence of the form of harvesting and waste application on the carbon management index and soil aggregation under sugarcane cultivation. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 8, n. 4, p. e6744, 2022.

ROSSET, J. S.; SCHIAVO, J. A.; ATANÁZIO, R. A. R. Atributos químicos, estoque de carbono orgânico total e das frações humificadas da matéria orgânica do solo em diferentes sistemas de manejo de cana-de-açúcar. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 35, n. 5, p. 2351, 2014.

SAIANI, C. C. S.; PEROSA, B. B. Saúde Respiratória e Mecanização da Colheita da Cana-de-Açúcar nos Municípios Paulistas: a importância do Protocolo Agroambiental. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 54, n. 1, p. 29–50, 2016.

SALVI, J. V.; MATOS, M. A.; MILAN, M. Avaliação do desempenho de dispositivo de corte de base de colhedora de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, v. 27, n. 1, p. 201–209, 2007.

SANDERMAN, J.; BALDOCK, J. A. Accounting for soil carbon sequestration in national inventories: A soil scientist's perspective. **Environmental Research Letters**, v. 5, n. 3, 2010.

SIGNOR, D. **Estoques de carbono e nitrogênio e emissões de gases do efeito estufa em áreas de cana-de-açúcar na região de Piracicaba**. Dissertação—Piracicaba: Universidade de São Paulo, 2010.

SIGNOR, D. et al. Estoques de carbono e qualidade da matéria orgânica do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 5, p. 1402–1410, 2014.

SIGNOR, D. et al. Atributos químicos e qualidade da matéria orgânica do solo em sistemas de colheita de cana-de-açúcar com e sem queima. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1438–1448, 2016.

SILVA, E. E. da; AZEVEDO, P. H. S. DE; DE-POLLI, H. **Determinação da respiração basal (RBS) e quociente metabólico do solo (qCO₂)**. Seropédica, RJ: EMBRAPA, 2007.

SILVA, M. de A.; JERONIMO, E. M.; LÚCIO, A. D. Perfilhamento e produtividade de cana-de-açúcar com diferentes alturas de corte e épocas de colheita. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 8, p. 979–986, 2008.

SILVA NETO, H. F. da et al. Quantificação da palhada de cana-de-açúcar e potencial controle de plantas daninhas. *Revista Trópica – Ciências Agrárias e Biológicas*, v. 10, n. 01, p. 31–37, 2018.

SOUZA, E. D. de et al. Frações do carbono orgânico, biomassa e atividade microbiana em um Latossolo Vermelho sob cerrado submetido a diferentes sistemas de manejos e usos do solo. **Acta Sci. Agron.**, v. 28, n. 3, p. 323–329, 2006.

SOUZA, G. S. de et al. Controlled traffic and soil physical quality of an Oxisol under sugarcane cultivation. **Scientia Agricola**, v. 72, n. 3, p. 270–277, 2015.

SOUZA, Z. M. de et al. Produtividade agrícola de variedades de cana-de-açúcar e incidência de broca-comum e cigarrinha-da-raiz em canavial colhido sem queima. **Bragantia**, v. 67, n. 2, p. 413–419, 2008.

SOUZA, R. A. et al. Effects of sugarcane harvesting with burning on the chemical and microbiological properties of the soil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 155, p. 1–6, 2012.

VASCONCELOS, R. F. B. de et al. Qualidade física de Latossolo Amarelo de tabuleiros costeiros em diferentes sistemas de manejo da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 4, p. 381–386, 2014.

VILLAMIL, M. B.; LITTLE, J.; NAFZIGER, E. D. Corn residue, tillage, and nitrogen rate effects on soil properties. **Soil and Tillage Research**, v. 151, p. 61–66, 2015.

WENDLING, B. et al. Mudanças no carbono e nitrogênio em diferentes compartimentos da matéria orgânica sob sistema agrossilvipastoril. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 4, p. 641–653, 2011.

ZANI, C. F. et al. Vinasse application and cessation of burning in sugarcane management can have positive impact on soil carbon stocks. **PeerJ**, v. 6, n. 8, p. e5398, 2018.

CAPÍTULO I

DINÂMICA DO CARBONO ORGÂNICO DO SOLO NOS SISTEMAS DE COLHEITA DA CANA-DE-AÇÚCAR NO BRASIL

RESUMO

A expansão do cultivo de cana-de-açúcar com colheita mecanizada em substituição a colheita com queima é uma importante mudança do manejo no Brasil. A colheita com previa despalha a fogo está associado a severos problemas ambientais, sustentabilidade da lavoura e problemas de saúde humana, além de reduzir a matéria orgânica do solo e aumentar a emissão de CO₂ para a atmosfera. Portanto, quantificar o impacto da mudança do sistema de colheita da cana-de-açúcar no estoque de carbono orgânico do solo (COS) no Brasil e em diferentes regiões brasileiras é de extrema importância, visto que permitirá refinar dados sobre o carbono (C) do solo, que são necessários para elaboração do inventário do nacional de emissões e remoção dos gases do efeito estufa (GEE) e contribuirá para a melhoria de políticas públicas nacionais. Para isso, foram derivados fatores de mudança do estoque do COS em diferentes períodos e camadas de solo. Nesta pesquisa, foram usados 33 estudos, com total de 210 pares de comparações, sendo 84 para a conversão cana com queima para cana com colheita mecanizada (CQ-CM); 95 para a conversão vegetação nativa para cana com colheita mecanizada (VN-CM); e 31 para a conversão vegetação nativa para cana com queima (VN-CQ), os quais foram analisadas por meio de um modelo linear misto. No Brasil e na região Sudeste, a conversão CQ-CM resulta em um aumento nos estoques de COS de forma progressiva ao longo do tempo, em camadas superficiais e subsuperficiais. Em curto prazo, a região Nordeste tem menor potencial para elevar o estoque de COS em comparação a região Sudeste. No período de 10 anos, a conversão VN-CM apresentou perda de COS menor que o sistema com queima, com diferença de 2% a 6%. Por outro lado, no período de 20 anos a VN-CQ apresentou perdas de COS menores, variou de 15% a 32%, em comparação com VN-CM que apresentou perdas de 27% a 35%. O tempo de retorno do balanço negativo do carbono da conversão VN-CM variou de 6,4 a 8,2 anos, sendo inferior ao tempo de retorno da conversão VN-CQ que variou de 9,9 a 9,2 anos, nas camadas de 0-30 cm e 0-50 cm, respectivamente. Os resultados deste estudo confirmam o potencial da adoção do sistema de colheita mecanizada para sequestrar o COS, ainda assim, mais estudos a longo prazo devem ser realizados.

Palavras-chave: carbono orgânico do solo; cana-de-açúcar; fator de mudança.

ABSTRACT

The expansion of sugarcane cultivation with mechanized harvesting in place of burning harvesting is an important management change in Brazil. Harvesting with prior fire removal is associated with severe environmental problems, crop sustainability and human health problems, in addition to reducing soil organic matter and increasing CO₂ emissions into the atmosphere. Therefore, quantifying the impact of changing the sugarcane harvesting system on soil organic carbon (SOC) stock in Brazil and in different Brazilian regions is extremely important, as it will allow refining data on carbon (C) of the soil, which are necessary for the preparation of the national inventory of emissions and removal of greenhouse gases (GHG) and will contribute to the improvement of national public policies. For this, SOC stock change factors were derived in different periods and soil layers. In this research, 33 studies were used, with a total of 210 pairs of comparisons, of which 84 were for the conversion of burning sugarcane to mechanized harvesting sugarcane (CQ-CM); 95 for the conversion of native vegetation to sugarcane with mechanized harvesting (VN-CM); and 31 for the conversion of native vegetation to sugarcane with burning (VN-CQ), which were analyzed using a mixed linear model. In Brazil and in the Southeast region, the CQ-CM conversion results in a progressive increase in COS stocks over time, in surface and subsurface layers. In the short term, the Northeast region has less potential to increase the SOC stock compared to the Southeast region. Over the 10-year period, the VN-CM conversion showed a lower SOC loss than the burn-in system, with a difference of 2% to 6%. On the other hand, in the 20-year period, VN-CQ showed lower SOC losses, ranging from 15% to 32%, compared to VN-CM, which showed losses from 27% to 35%. The payback time for the negative carbon balance of the VN-CM conversion ranged from 6.4 to 8.2 years, being shorter than the payback time for the VN-CQ conversion, which ranged from 9.9 to 9.2 years, in the layers from 0-30 cm and 0-50 cm, respectively. The results of this study confirm the potential of adopting the mechanized harvesting system to sequester the SOC, even so, more long-term studies must be carried out.

Keywords: soil organic carbon; sugar cane; change factor.

1 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar, originária da Nova Guiné, é uma cultura adaptada a regiões de clima tropical e subtropical, sendo atualmente uma das principais culturas da economia brasileira (CERRI et al., 2011; OLIVEIRA et al., 2018). O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, com produção estimada para a safra de 2022/2023 de 572,9 milhões de toneladas em uma área aproximada de 8,12 milhões de hectares (CONAB, 2022). No Sudeste, a produção estimada é de 355,52 milhões de toneladas em uma área de 4,93 milhões de hectares, sendo São Paulo o estado com maior área produtiva, 3,98 milhões de hectares que corresponde a 49,01% da área cultivada com cana-de-açúcar no Brasil. Em comparação, a região Nordeste apresenta uma produção estimada de 54,10 milhões de toneladas de colmo em uma área aproximada de 0,86 milhões de hectares, sendo o estado de Alagoas o maior produtor nordestino de cana-de-açúcar (CONAB, 2022). A produtividade média do Sudeste é de 72 t/ha, superior à encontrada no Nordeste, 62 t/ha (CONAB, 2022).

Por muitos anos a cana-de-açúcar foi queimada antes da colheita, para facilitar as operações de corte manual, carregamento, transporte e aumentar a produtividade de corte do trabalhador rural. Entretanto, o sistema com prévia despalha a fogo está associado a severos problemas ambientais, sustentabilidade da lavoura e problemas de saúde humana (SAIANI; PEROSA, 2016; BARROS et al., 2021). Dentre os diversos problemas, a queima da cana-de-açúcar reduz a matéria orgânica do solo e aumenta a emissão de CO₂ para a atmosfera, contribuindo para o efeito estufa e as mudanças climáticas (MOITINHO et al., 2021). Por exemplo, Vasconcelos et al. (2014), estudando os impactos da conversão da vegetação nativa em sistema de colheita da cana-de-açúcar com queima sobre o C do solo em Latossolo Amarelo no Tabuleiros Costeiros no Estado de Alagoas, região Nordeste do Brasil, constataram perdas do estoque carbono de 35, 47 e 37% nas camadas 0-20, 20-40 e 40-60 cm, respectivamente.

O sistema de colheita com queima vem sendo substituído gradativamente pelo sistema de colheita mecanizada, o qual já representa 89% da área total cultivada com cana-de-açúcar no Brasil (CONAB, 2022). Vale ressaltar que o Centro-Sul é a região brasileira com maior porcentagem de área colhida com colheita mecanizada, pois é beneficiada por relevos propícios a mecanização, com 97% de colheita mecanizada, enquanto a região Nordeste, que possui relevo mais acidentado e maior disponibilidade de mão de obra, apenas 23% da colheita é mecanizada (CONAB, 2022).

O sistema de colheita mecanizado é caracterizado por gerar o acúmulo de grandes quantidades de resíduo vegetal na superfície do solo, proveniente das folhas secas, dos ponteiros, das folhas verdes e quantidade variáveis de pedaços de colmo (OLIVEIRA et al.,

1999; GAVA et al., 2003; PEREIRA et al., 2022). A deposição desse material sobre o solo resulta em vantagens, tais como, aumento da infiltração e retenção da água no solo, diminuição da evaporação, aumento da CTC, diminuição da erosão, favorece o controle de plantas daninhas e com a decomposição e mineralização, vai ser fonte de nutrientes para a cultura (OLIVEIRA et al., 1999; AQUINO et al., 2015; SILVA NETO et al., 2018; PEREIRA et al., 2022)

Adicionalmente, diversos estudos mostram a influência na quantidade de carbono orgânico do solo (COS) em áreas que adotaram a mudança no sistema de colheita (SIGNOR, 2010; LUCA et al., 2018; BARROS et al., 2021; FARIAS et al., 2022). Galdos et al. (2009) observaram, no Sudeste brasileiro, que o sistema de cana-de-açúcar com colheita mecanizada aumentou o estoque de COS na profundidade de 0-20 cm em 35% em relação ao sistema de colheita com queima após 8 anos.

As informações sobre mudanças nos estoques de COS nas conversões envolvendo a cana-de-açúcar aumentaram significativamente ao longo do tempo (GALDOS et al., 2009; CERRI et al., 2011; MELLO et al., 2014; SIGNOR et al., 2014; CHERUBIN et al., 2016a, 2016b; ZANI et al., 2018; LUZ et al., 2019; BARROS et al., 2021; MOITINHO et al., 2021; SOARES et al., 2022). No entanto, é necessário realizar abordagens regionais e a longo prazo, principalmente envolvendo o sistema de colheita mecanizada. Essas abordagens são fundamentais, em razão da necessidade de informações para as políticas públicas como o Plano de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura – ABC (BRASIL, 2012), iniciativa global “soil carbon 4 per mille” (MINASNY et al., 2017), Contribuições Nacionalmente Determinadas – NDCs (BRASIL, 2022) e a Política Nacional de Biocombustíveis – RenovaBio (ANP, 2020). Essas iniciativas promovem práticas que contribuem para a mitigação dos efeitos das mudanças climáticas globais, redução das emissões dos GEE e adoção de práticas mais conservacionistas na agricultura.

A avaliação do impacto da mudança do uso da terra e de sistemas de colheita da cana-de-açúcar sobre a dinâmica do COS e de suas frações é essencial para gerar informações que podem contribuir para a adoção de práticas de manejo agrícola mais conservacionistas e na adoção de políticas públicas. O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) propõe o uso de fatores de mudanças nos estoques de COS para gerar informações e traçar estratégias que contribuam para a redução das emissões dos GEE e remoção do CO₂ atmosférico. O objetivo com este estudo foi avaliar o impacto da conversão do sistema de cana-de-açúcar com queima para o sistema de colheita mecanizada, e, adicionalmente, o impacto da conversão de vegetação nativa para sistemas de produção com e sem queima no Brasil,

derivando fatores de mudança de estoques de COS para diferentes períodos, camadas e regiões brasileiras.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Áreas de estudo

As áreas onde ocorreram as amostragens de solo pertencem a duas usinas produtoras de açúcar e álcool localizadas nos municípios de Campo Alegre e São Miguel dos Campos, Alagoas (Figura 1). Foram selecionados três locais com diferentes sistemas de colheita de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*), com queima e colheita mecanizada, de duas usinas produtoras de açúcar e álcool. O clima da região é classificado como tropical chuvoso com verão seco (As'), segundo a classificação de Köppen. Apresenta precipitação média anual aproximada de 1.650 mm, temperatura média anual de 25,5°C e a vegetação primária é predominantemente do tipo Floresta Subperenifólia, caracterizada por apresentar vegetação exuberante, formação densa e grande porte das espécies arbóreas, formação dominante da zona costeira úmida do Estado de Alagoas (LIMA NETO et al., 2009; EMBRAPA, 2012).

2.2 Amostragem de solo e análises

Este estudo contempla uma amostragem de solo e uma revisão de literatura para estimar as mudanças nos estoques de COS em cultivo de cana-de-açúcar no Brasil. As amostragens de solo ocorreram em áreas de cana-de-açúcar colhida mecanicamente e com prévia despalha a fogo e em área de vegetação nativa, com o intuito de avaliar três tipos de conversão envolvendo o cultivo da cana-de-açúcar, (i) conversão de vegetação nativa (VN) para cultivo de cana-de-açúcar com queima (CQ); (ii) conversão de VN para cultivo de cana-de-açúcar com sistema de colheita mecanizada (CM); e (iii) conversão do cultivo de cana-de-açúcar com queima para o sistema de cultivo com colheita mecanizada. Três critérios foram utilizados para selecionar os locais que foram realizadas as coletas: (i) As usinas precisavam ter conhecimento das práticas de uso e manejo do solo adotados, (ii) a quantidade de anos seguidos de colheita mecanizada, e (iii) deveria existir uma área de referência de vegetação nativa, com relevo, tipo e textura de solo semelhantes.

As amostras foram coletadas durante os meses de agosto a outubro de 2021. Em cada um dos doze locais selecionados, foram coletadas amostras de solo deformadas e não deformadas em trincheiras de 0,5 x 0,5 x 0,5 m e em cinco repetições, nas profundidades de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-50 cm, totalizando 240 amostras de solo deformadas e 240 não deformadas. Posteriormente, as amostras foram secas ao ar, homogeneizadas e passadas em peneiras de 2,0 mm para remover os fragmentos de raízes, cascalhos e pedras, formando assim a terra fina seca ao ar (TFSA).

As amostras não deformadas foram usadas para determinar a densidade do solo pelo método do anel volumétrico, para cada camada do solo dentro de cada sistema de uso do solo (EMBRAPA, 2017). A densidade de cada camada foi calculada de acordo com a equação (1):

$$Densidade (g\ cm^{-3}) = \frac{massa\ do\ solo\ (g)}{Volume\ do\ anel\ (cm^{-3})} \quad (1)$$

Os teores de carbono orgânico total (COT) foram determinados pelo método de combustão seca usando um analisador elementar (TOC- Shimadzu, acoplado ao módulo para amostras sólidas SSM-5000A Shimadzu). Os estoques de COT foram calculados por meio da multiplicação entre o teor do C, densidade do solo e espessura da camada de solo, equação (2), para cada profundidade analisada.

$$Estoque(Mg.ha^{-1}) = teor(\%) * profundidade(cm) * ds (g\ cm^{-3}) \quad (2)$$

Áreas submetidas a manejos agrícolas diferentes possuem densidades diversas, o que resulta na comparação de diferentes massas de solo quando a profundidade amostral é fixa em todas as áreas amostrais. Com o intuito de minimizar as discrepâncias causadas pela diferença na densidade, os estoques de COT foram corrigidos com base em massa equivalente do solo seguindo o método proposto por Sisti et al. (2004). Os ajustes foram feitos para as camadas 0-30 e 0-50 cm nas análises de COT. Conforme equação (3):

$$Cs = \sum_{i=1}^{n-1} Cti + \left[Mtn - \left(\sum_{i=1}^n Mti - \sum_{i=1}^n Msi \right) \right] * Ctn \quad (3)$$

Onde:

Cs = estoque de C total corrigido em Mg. ha⁻¹;

$\sum_{i=1}^{n-1} Cti$ = somatório dos estoques de C do solo da primeira à penúltima camada amostrada no tratamento considerado (Mg. ha⁻¹);

Mtn= massa do solo da última camada amostrada do sistema de cultivo (Mg. ha⁻¹);

$\sum_{i=1}^n Mti$ = somatório da massa total do solo amostrado sob o sistema de cultivo (Mg. ha⁻¹);

$\sum_{i=1}^n Msi$ = somatório da massa total do solo amostrado na área de referência (Vegetação nativa) (Mg. ha⁻¹); e,

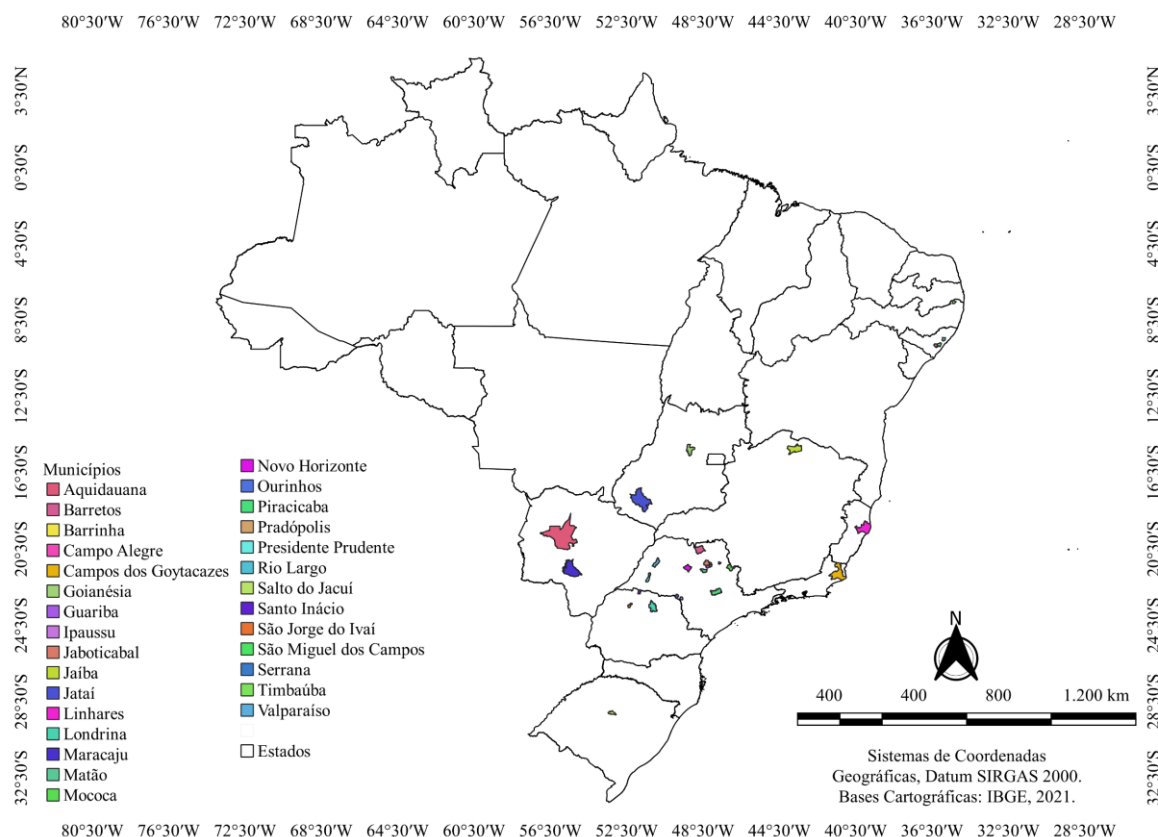
C_{tn} = teor de C do solo na última camada amostrada do sistema de cultivo (Mg C. Mg⁻¹ de solo).

2.3 Revisão de literatura

A revisão de literatura sobre a influência dos sistemas de colheita de cana-de-açúcar, com queima e sem queima, nos estoques de COS no Brasil foi realizada nas principais bases de dados disponíveis: Scopus, Portal de Periódicos CAPES; Google Acadêmico, Scientific Eletronic Library Online (SciELO) e ScienceDirect. O intuito desta revisão foi avaliar os impactos dos sistemas de colheita de cana-de-açúcar, com queima e sem queima, sobre os estoques de COS no Brasil (Figura 1). Os estudos selecionados tinham que conter duas informações: (i) estoques de COS ou informações que permitissem o cálculo (densidade do solo, teor de COS e profundidade amostral); e (ii) tempo decorrido desde a conversão dos sistemas. Os dados de COS obtidos na literatura também foram corrigidos usando a metodologia descrita por Sisti et al. (2004).

Os estudos foram divididos em três grupos de conversão: (i) conversão de cana-de-açúcar com queima para cana-de-açúcar com colheita mecanizada (CQ-CM); (ii) conversão de vegetação nativa para cana-de-açúcar com colheita mecanizada (VN-CM); e (iii) conversão de vegetação nativa para cana-de-açúcar com queima (VN-CQ). No total, formou-se um banco de dados com 33 estudos das revisões de literatura mais os dados coletados, resultando em 210 pares de observação, das quais 84 foram referentes a conversão de cana-de-açúcar com queima para cana-de-açúcar com colheita mecanizada (CQ-CM), 95 da conversão de vegetação nativa para cana-de-açúcar com colheita mecanizada (VN-CM) e 31 da conversão de vegetação nativa para cana-de-açúcar com queima (VN-CQ). Um resumo de todos os dados (revisão de literatura e coletados), pode ser encontrado na Tabela 1 para a conversão CQ-CM, Tabela 2 para a conversão VN-CM e Tabela 3 para conversão VN-CQ.

Figura 1 – Localização dos municípios onde foram conduzidos os estudos utilizados para derivar os fatores de mudança nos estoques de carbono no Brasil.



Fonte: Autor (2023).

2.4 Análise estatística

Os dados (revisão de literatura e coletados) foram analisados por meio de um modelo linear misto, um tipo de análise de regressão que inclui efeitos fixos e aleatórios usada para descrever a relação entre uma variável resposta e covariáveis dos dados que são agrupados de acordo com uma ou mais classificações (PINHEIRO; BATES, 2000). A variável resposta foi a razão do estoque médio de COS dos sistemas de manejo atual (cana-de-açúcar com queima ou com colheita mecanizada) pelo estoque médio de COS do uso da terra anterior à conversão (cana-de-açúcar com queima ou vegetação nativa). As variáveis de efeitos fixos foram usadas para explicar a influência do tipo de solo, textura, profundidade amostral e tempo de mudança de uso da terra. As variáveis de efeitos aleatórios foram usadas para explicar as dependências existentes entre múltiplas observações em uma mesma área de estudo (ou seja, modelos de regressão linear padrão assumem que cada observação dentro da mesma área é independente). Especificamente, os estados, municípios e os locais foram incluídos como variáveis aleatórias. Alguns estudos fornecem dados de diferentes locais, os quais foram tratados de forma independente na análise estatística (PINHEIRO; BATES, 2000; OGLE, et al., 2004).

Para incluir estudos com diferentes profundidades, usou-se o procedimento descrito por Ogle et al. (2004), no qual dois regressores (X1 e X2) foram formados, baseados em uma função quadrática (assumindo que os impactos no COS são maiores em superfície e diminuem em subsuperfície), a partir dos valores superior e inferior de uma camada de solo. A taxa média do estoque de COS para um determinado ponto dentro de uma determinada camada de solo foi uma integral formada a partir do valor superior para o inferior da camada da função quadrática dividida pela espessura do solo. A função quadrática foi integrada usando as equações (4) e (5):

$$X1 = \frac{(L^2 + U^2)}{(2 \times (L - U))} \quad (4)$$

$$X1 = \frac{(L^2 + U^3)}{(3 \times (L - U))} \quad (5)$$

Onde:

L = Valor da camada inferior em cm; e,

U = Valor da camada superior em cm;

Este procedimento possibilita utilizar estudos com diferentes profundidades amostrais e desenvolver o modelo sem perder informações com a agregação ou interpolação para um conjunto de profundidade padrão.

Os fatores foram derivados com base na metodologia descrita pelo IPCC para C do solo (IPCC, 2006), considerando o efeito do manejo na camada de 0-30 cm e após 20 anos de mudança de uso da terra ou sistema de manejo como padrão. Entretanto, também foram derivados fatores para a camada 0-50 cm, e para o período de 10 anos no Brasil e nas regiões Sudeste e Nordeste para a conversão de sistema de colheita da cana-de-açúcar (CQ-CM) e para a camada 0-50 cm, e para o período de 10 anos no Brasil e na região Sudeste para a mudança de uso da terra (VN-CM e VN-CQ). Por fim, foi realizada a predição do desvio padrão. As análises estatísticas foram realizadas com auxílio do software SPLUS 8.0 (Insightful Corporation, Seattle, Washington).

2.5 Tempo de retorno

A substituição dos combustíveis fósseis pelo etanol de cana-de-açúcar tem o potencial para reduzir as emissões dos GEE. Para estimar o tempo necessário que a conversão para cultivo

de cana-de-açúcar levaria para compensar as emissões da Mudança de Uso da Terra e a compensação associada à substituição dos combustíveis fósseis pelo etanol é calculado o tempo de retorno. Para calcular o tempo de retorno da cana-de-açúcar, foi necessário calcular inicialmente o balanço negativo do carbono (Mg CO_2), o qual trata-se da diferença entre os estoques encontrados na área com cana-de-açúcar e a área de referência correspondente e o tempo de retorno foi a relação entre o balanço negativo do carbono e a compensação de C por ano para o etanol de cana-de-açúcar, o qual foi estimado por Fargione et al. (2008) em $9,8 \text{ Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Os cálculos foram realizados com os estudos que contém informações das camadas de 0-30 e 0-50 cm.

3 RESULTADOS

3.1 Fatores de mudança do COS

Foram utilizados dados de 33 estudos obtidos na literatura mais os dados coletados referentes aos estoques de COS, sendo os dados provenientes de 10 estados e 29 municípios do Brasil (Figura 1). A Tabela 1 apresenta os estudos utilizados para derivar os fatores de mudança dos estoques de COS na conversão VN-CQ, um total de 9 estudos e 31 pares de combinação.

Tabela 1 – Estudos utilizados para avaliar a conversão de vegetação nativa (VN) para cana-de-açúcar com queima (CQ).

Estudo	Localização	Tempo de conversão	Tipo de solo	Camada	C (Mg ha ⁻¹)			
				cm	VN	CQ		
Szakács (2007)	Goianésia - GO	15	Latossolo	30	85,70	43,40		
Czyzcha (2009)	Pradópolis - SP	50	Latossolo	10	23,21	9,41		
				30	54,61	28,57		
				50	73,96	44,46		
				100	108,65	66,26		
				10	23,21	8,27		
				30	54,61	27,13		
				50	73,96	43,10		
				100	108,65	69,26		
Galdos et al. (2009)	Pradópolis - SP	50	Latossolo	20	41,58	30,86		
						34,31		
						28,32		
Abbruzzini (2011)	Goianésia - GO	15	Não informado	10	59,26	42,77		
Vasconcelos et al. (2014)	Rio Largo - AL	20	Latossolo	60	140,06	74,07		
								80,53
								73,36
Cardin et al. (2016)	Presidente Prudente - SP	20	Argissolo	50	54,95	31,46		
Kunde et al. (2016)	Salto do Jacuí - RS	28	Latossolo	20	55,02	32,33		
								45,85
								43,24
Signor et al. (2016)	Pradópolis - SP	6	Latossolo	10	23,20	9,40		
				30	54,60	28,60		
				12	10	23,20	8,30	
				30	54,60	27,10		
Este estudo	Campo Alegre - AL	36	Latossolo	50	73,24	67,90		
	Campo Alegre - AL	36	Latossolo	50	99,58	62,52		
	São Miguel Dos Campos - AL	36	Latossolo	50	78,71	54,53		
	Campo Alegre - AL	36	Latossolo	30	53,94	44,75		
	Campo Alegre - AL	36	Latossolo	30	72,82	41,76		
	São Miguel Dos Campos - AL	36	Latossolo	30	57,95	35,51		

Fonte: Autor (2023).

Os dados da conversão VN-CM estão disponibilizados na Tabela 2, um total de 15 estudos e 95 pares de combinação foram utilizados para derivar os fatores de mudança nos estoques de COS.

Tabela 2 – Estudos utilizados para avaliar a conversão de vegetação nativa (VN) para cana-de-açúcar com colheita mecanizada (CM).

Estudo	Localização	Tempo de conversão	Tipo de solo	Camada	C (Mg ha ⁻¹)	
				cm	VN	CM
Szakács (2007)	Goianésia - GO	3	Latossolo	30	85,70	49,40
Czycza (2009)	Pradópolis - SP	6	Latossolo	10	23,21	12,01
				30	54,61	36,66
				50	73,96	59,44
				100	108,65	93,70
		12	Latossolo	10	23,21	14,84
				30	54,61	47,33
				50	73,96	76,04
				100	108,65	113,47
Galdos et al. (2009)	Pradópolis - SP	2	Latossolo	20	41,58	36,25
		2				33,08
		6				37,74
Abbruzzini (2011)	Goianésia - GO	6	Não Informado	30	59,26	54,36
Rosset et al. (2014)	Maracaju - MS	3	Latossolo	20	84,34	36,14
Franco et al. (2015)	Jataí - GO	4	Latossolo	30	38,54	30,83
	Valparaíso - SP	3	Argissolo	30	56,89	32,45
	Ipaussu - SP	10	Latossolo	30	69,47	43,83
Cardin et al. (2016)	Presidente Prudente - SP	20	Argissolo	50	54,95	29,82
						35,42
Cherubin et al. (2016a)	Jataí - GO	4	Latossolo	30	39,02	30,93
	Valparaíso - SP	3	Argissolo	30	54,59	32,35
	Ipaussu - SP	10	Latossolo	30	79,14	43,90
Oliveira et al. (2016)	Jataí - GO	5	Latossolo	30	49,10	38,15
				50	64,90	52,30
				100	94,30	91,00
	Valparaíso - SP	4	Argissolo	30	48,60	40,10
				50	57,70	51,60
				100	82,70	76,60
	Ipaussu - SP	11	Latossolo	30	89,90	60,50
				50	123,10	85,60
				100	212,00	167,20
	Signor et al. (2016)	Pradópolis - SP	6	Latossolo	10	23,20
30					54,60	36,70
12					10	23,20
Sattolo et al. (2017)	Novo Horizonte - SP	5	Latossolo	30	54,60	47,30
				20	23,00	22,00
				40	42,00	39,00
				60	61,00	54,00
				80	76,00	66,00
				100	88,00	78,00
				20	23,00	24,00
				40	42,00	44,00
				60	61,00	59,00
				80	76,00	72,00
				100	88,00	83,00
				20	23,00	25,00
				40	42,00	44,00
				60	61,00	58,00
				80	76,00	71,00
				100	88,00	82,00
				20	23,00	24,00
40	42,00	44,00				

				60	61,00	61,00
				80	76,00	73,00
				100	88,00	85,00
	Novo Horizonte - SP	5	Latossolo	20	38,00	19,00
				40	61,00	37,00
				60	76,00	51,00
				80	92,00	63,00
				100	105,00	74,00
				20	38,00	20,00
				40	61,00	40,00
				60	76,00	54,00
				80	92,00	68,00
				100	105,00	77,00
				20	38,00	19,00
				40	61,00	42,00
				60	76,00	55,00
				80	92,00	68,00
				100	105,00	78,00
				20	38,00	20,00
				40	61,00	41,00
				60	76,00	53,00
				80	92,00	65,00
				100	105,00	75,00
Luz et al. (2019)	Londrina - PR	41	Latossolo	30	77,19	54,28
	São Jorge do Ivaí - PR	9	Latossolo	30	23,07	12,63
	Santo Inácio - PR	12	Neossolo	30	27,24	10,69
Farias et al. (2022)	Aquidauana - MS	6	Argissolo	20	63,08	72,65
Soares et al. (2022)	Jaíba - MG	6	Latossolo	30	38,06	27,55
		7				22,49
		8				36,05
		10				36,84
Este estudo	Campo Alegre - AL	12	Latossolo	50	73,24	54,79
		17				68,13
	Campo Alegre - AL	3	Latossolo	50	99,58	38,80
		9				59,32
	São Miguel Dos Campos - AL	4	Latossolo	50	78,71	57,07
		8				54,68
	Campo Alegre - AL	12	Latossolo	30	53,94	36,32
		17				47,83
	Campo Alegre - AL	3	Latossolo	30	72,82	28,01
		9				44,14
	São Miguel Dos Campos - AL	4	Latossolo	30	57,95	38,63
		8				36,05

Fonte: Autor (2023).

Na Tabela 3 estão apresentados os dados dos estudos (25 estudos e 84 pares de combinações) utilizados para derivar os fatores de mudança dos estoques de COS na conversão de cana-de-açúcar com queima (CQ) para cana-de-açúcar com colheita mecanizada (CM).

Tabela 3 – Estudos utilizados para avaliar a conversão de cana-de-açúcar com queima (CQ) para cana-de-açúcar com colheita mecanizada (CM).

Estudo	Localização	Tempo de conversão	Tipo de solo	Camada	C (Mg ha ⁻¹)	
				cm	CQ	CM

Cerri et al. (2004)	Pradópolis - SP	4	Latossolo	20	48,95	55,45
	Serrana - SP	4	Latossolo	20	20,99	25,86
Souza et al. (2005)	Jaboticabal - SP	3	Latossolo	30	34,55	41,60
		3				40,43
Resende et al. (2006)	Timbaúba - PE	16	Luvissolo	20	35,74	39,02
Canellas et al. (2007)	Campos dos Goytacazes - RJ	55	Cambissolo	40	73,39	115,76
		55		40	85,77	115,76
		55		40	80,73	115,76
Szakács (2007)	Goianésia - GO	3	Latossolo	30	43,40	49,40
	Pradópolis - SP	6	Latossolo	30	58,50	70,60
	Ourinhos - SP	4	Latossolo	30	46,10	53,00
Luca et al. (2008)	Pradópolis - SP	4	Latossolo	20	47,90	54,20
	Matão - SP	4	Argissolo	20	24,00	28,50
	Serrana - SP	4	Neossolo	20	20,90	25,60
Czyzcha (2009)	Pradópolis - SP	6	Latossolo	10	9,41	12,01
				30	28,57	36,66
				50	44,46	59,44
				100	66,26	93,70
				12	8,27	14,84
Galdos et al. (2009)	Pradópolis - SP	2	Latossolo	30	27,13	47,33
				50	43,10	76,04
				100	69,26	113,47
				20	30,86	36,25
				20	34,31	33,08
Pinheiro et al. (2010)	Linhares - SP	14	Argissolo	20	28,32	37,74
				10	10,90	14,80
				40	43,50	49,60
Signor (2010)	Piracicaba - SP	1	Latossolo	100	100,80	113,80
				100	81,53	125,09
				100	130,22	143,62
Abbruzzini (2011)	Goianésia - GO	6	Não Informado	100	86,93	129,44
		3		30	42,77	54,37
		6		25	19,87	16,59
Panosso et al. (2011)	Guariba - SP	7	Latossolo	30	48,11	68,62
Oliveira et al. (2013)	Piracicaba - SP	2	Latossolo	30	64,03	59,06
		2		20	12,76	13,92
		3				16,24
Figueiredo et al. (2015)	Mococa - SP	3	Argissolo			16,24
		3				16,24
		3				16,24
Lopes (2014)	Linhares - ES	22	Argissolo	40	30,63	45,09
				40	80,91	73,51
Rosset et al. (2014)	Maracaju - MS	3	Latossolo	20	33,10	36,14
		3		20	45,43	36,14

		3		20	37,30	36,14
		3		20	59,16	36,14
Tavares et al. (2015)	Barretos - SP	5	Latossolo	20	7,00	8,25
		10				6,99
Cardin et al. (2016)	Presidente Prudente - SP	20	Argissolo	50	31,46	29,82
		20		50	32,33	35,42
Signor et al. (2016)	Pradópolis - SP	6	Latossolo	10	9,40	12,00
				30	28,60	36,70
		12		10	8,30	14,80
				30	27,10	47,30
Luca et al. (2018)	Pradópolis - SP	4	Latossolo	40	179,80	203,00
	Matão - SP	4	Argissolo	40	91,50	102,30
		12	Latossolo	40	157,70	156,50
	Serrana - SP	4	Neossolo	40	79,80	89,50
Tavares et al. (2018)	Pradópolis - SP	10	Latossolo	20	70,21	69,83
Zani et al. (2018)	Ourinhos - SP	12	Latossolo	30	63,10	65,20
				50	81,80	91,80
				100	117,00	121,70
		4		30	63,10	54,80
				50	81,80	75,20
				100	117,00	119,50
		5		30	63,10	60,30
				50	81,80	86,30
				100	117,00	130,40
Barros et al. (2021)	São Miguel dos Campos - AL	5	Argissolo	40	85,91	99,00
		9				112,19
	São Miguel dos Campos - AL	12	Argissolo	40	74,73	102,65
	Rio Largo - AL	8	Argissolo	40	71,78	79,52
Moitinho et al. (2021)	Barrinha - SP	8	Latossolo	20	39,85	44,54
Este estudo	Campo Alegre - AL	12	Latossolo	50	67,90	54,79
		17				68,13
	Campo Alegre - AL	3	Argissolo	50	62,52	38,80
		9				59,32
	São Miguel Dos Campos - AL	4	Argissolo	50	54,53	57,07
		8				54,68
	Campo Alegre - AL	12	Argissolo	30	44,75	36,32
		17				47,83
	Campo Alegre - AL	3	Argissolo	30	41,76	28,01
		9				44,14
	São Miguel Dos Campos - AL	4	Argissolo	30	35,51	38,63
		8				36,05

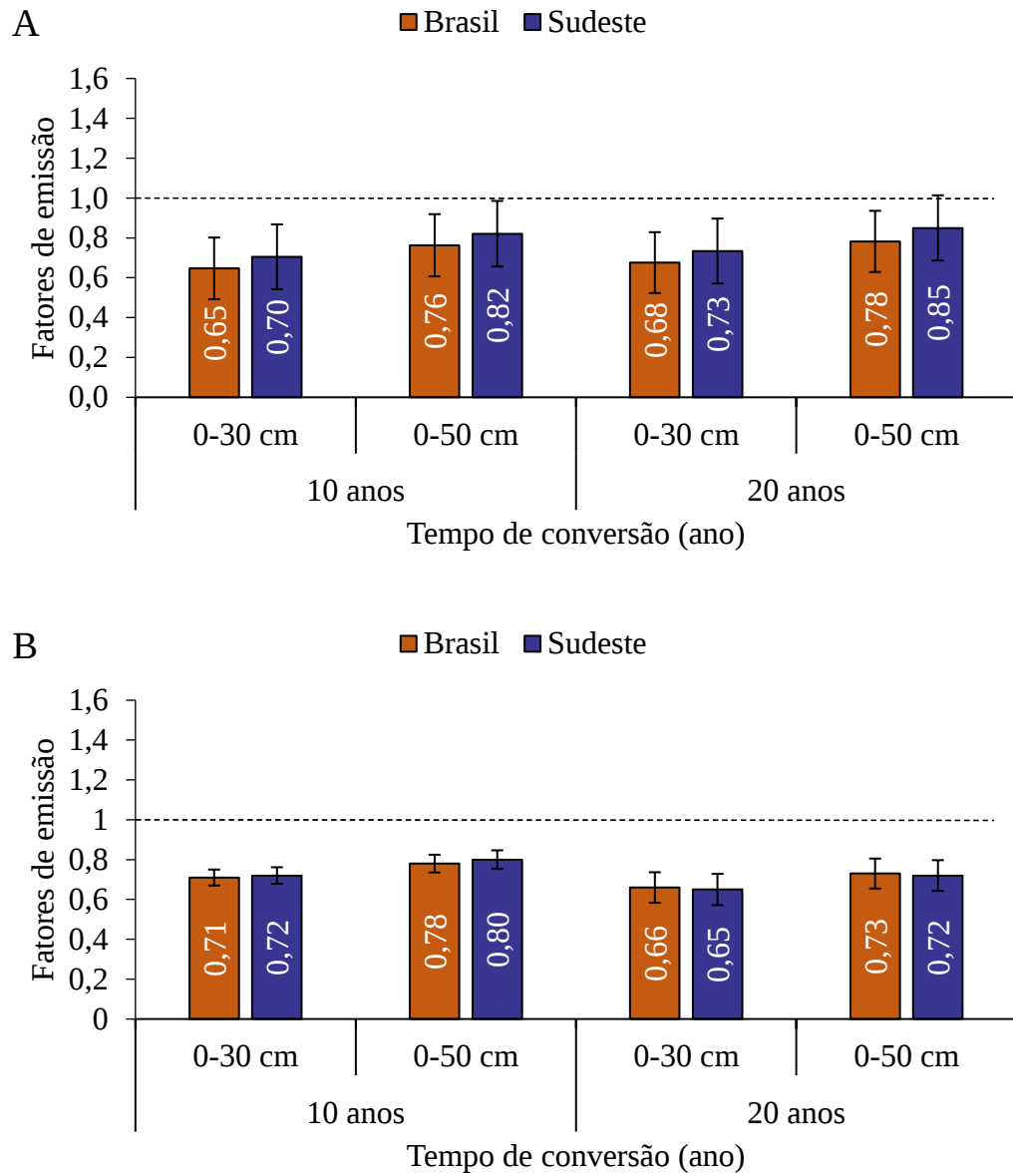
Fonte: Autor (2023).

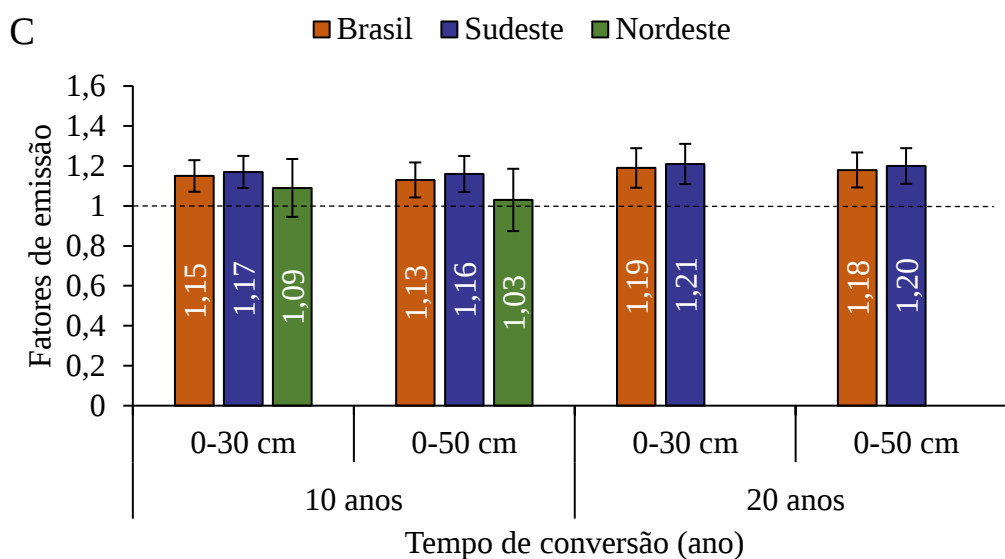
Por fim, para a conversão de VN para CQ (Figura 2), foram derivados 8 fatores, para os períodos de 10 e 20 anos de uso da terra, duas profundidades do solo (0-30 e 0-50 cm) e para as regiões, Brasil e Sudeste. Os fatores derivados para a camada de 0-30 cm e período de 10 anos indicaram reduções nos estoques de COS de 35 e 29% para o Brasil e região Sudeste, respectivamente, nas áreas CQ, em relação aos estoques de COS da vegetação nativa, enquanto para o período de 20 anos, os fatores derivados para o Brasil e região Sudeste, apresentaram perdas de 32 e 26%, respectivamente. Para a camada de 0-50 cm, no período de 10 anos, foram derivados fatores que indicaram perdas de 23 e 17% para o Brasil e região Sudeste, respectivamente. Para o período de 20 anos, a conversão de VN para CQ reduziu os estoques de COS em 21% e 15% quando observada a camada de 0-50 cm, para o período de 20 anos.

Para a conversão de VN para CM (Figura 2), foram derivados um total de 8 fatores, para os períodos de 10 e 20 anos de uso da terra, profundidades do solo de, 0-30 e 0-50 cm e para duas regiões (Brasil e Sudeste). Para a camada de 0-30 cm, no período de 10 anos os fatores derivados para o Brasil e região Sudeste, indicaram perdas nos estoques de COS de 29 e 28%, respectivamente, na área com colheita mecanizada, em relação aos estoques de COS da vegetação nativa, enquanto para o período de 20 anos, os fatores derivados apresentaram perdas de 34 e 35% para o Brasil e região Sudeste, respectivamente. Para a camada de 0-50 cm, no período de 10 anos, os fatores derivados foram $0,78 \pm 0,04$ e $0,80 \pm 0,04$ para o Brasil e região Sudeste, respectivamente, indicando perdas de 22 e 20%. Para o período de 20 anos, foram derivados fatores de $0,73 \pm 0,07$ e $0,72 \pm 0,07$ para o Brasil e região Sudeste, respectivamente, indicando perdas de 27 e 28%.

Para a conversão CQ-CM, foram derivados no total 10 fatores de mudança de COS, para os períodos de 10 e 20 anos de uso da terra, duas camadas de solo (0-30 e 0-50 cm), para três regiões (Brasil, Sudeste e Nordeste). Porém, os dados só permitiram derivar fator para o Nordeste até 10 anos (Figura 2). Para o período de 10 anos e camada de 0-30 cm os fatores derivados para o Brasil e regiões Sudeste e Nordeste, apresentaram aumento de 15, 17 e 9%, respectivamente, no sistema com colheita mecanizada em relação aos estoques de C do solo sob cana-de-açúcar com queima. Na camada de 0-30 cm e período de 20 anos (padrão adotado pelo IPCC) os fatores de manejo derivados apresentaram aumento de 19 e 21% nos estoques de COS para o Brasil e região Sudeste, respectivamente. Para a camada de 0-50 cm, no período de 10 anos os fatores derivados para o Brasil e regiões Sudeste e Nordeste, indicando aumentos de 13, 16 e 3%, respectivamente, enquanto para o período de 20 anos, os fatores derivados apresentaram aumentos de 18 e 20% para o Brasil e região Sudeste, respectivamente.

Figura 2 - Fatores de mudança dos estoques de COS estimados para as conversões VN-CQ (A), VN-CM (B) e CQ-CM (C).



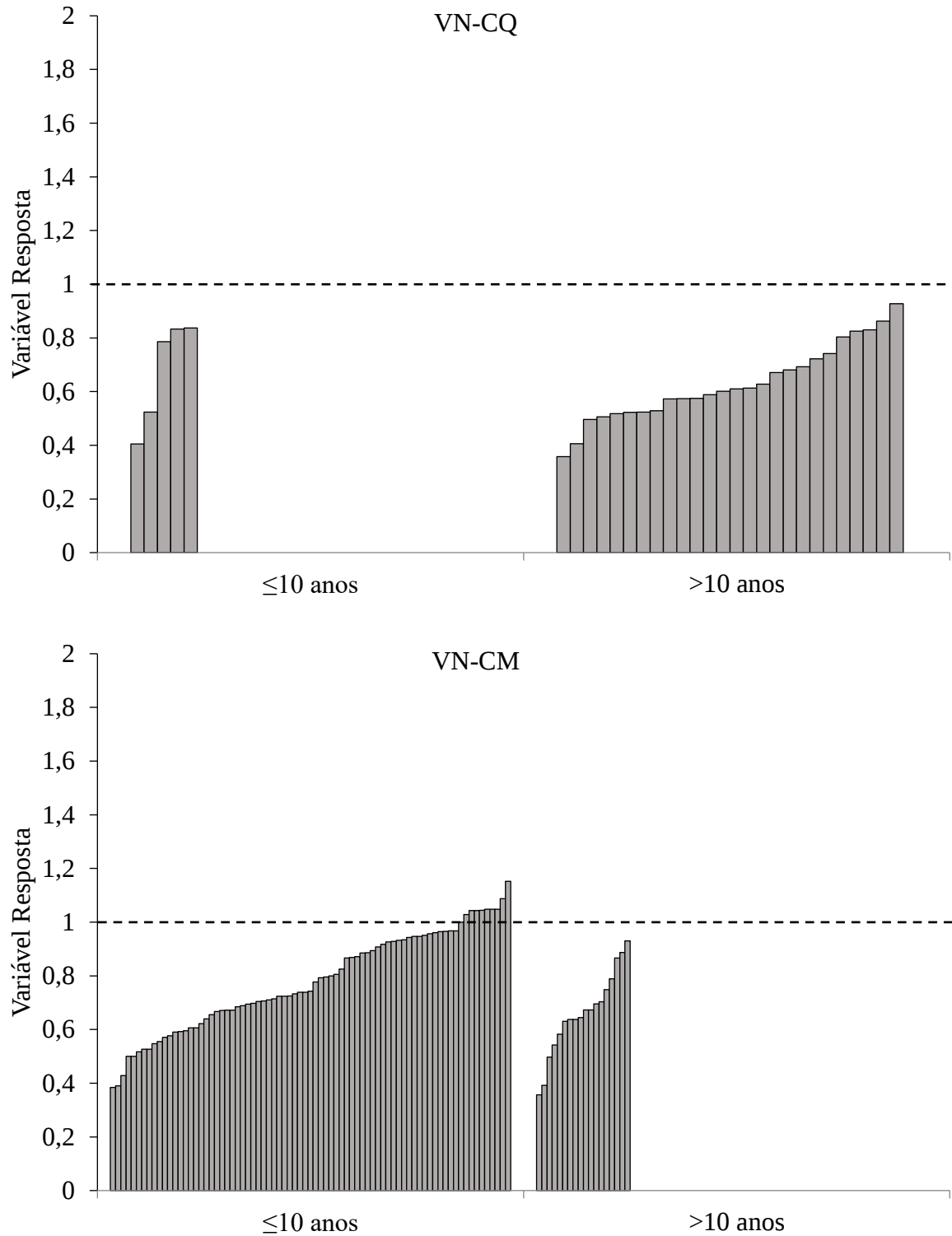


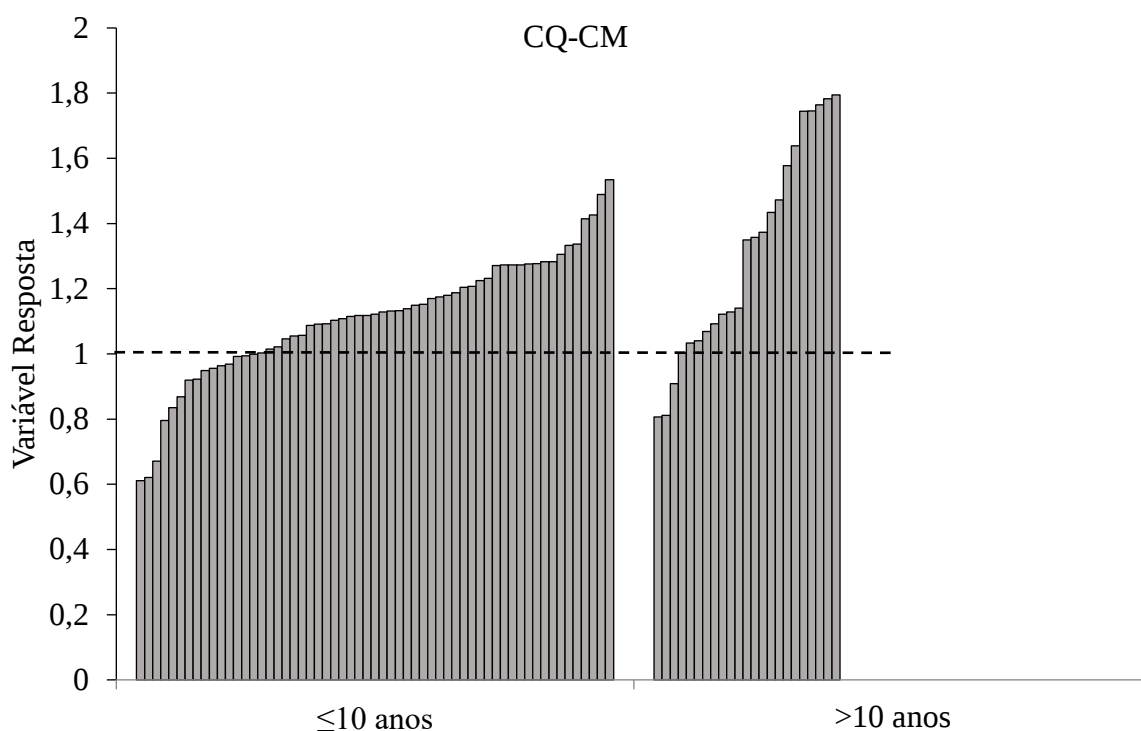
Fonte: Autor (2023).

A Figura 3 apresenta os resultados das variáveis respostas de todos os estudos para os diferentes tipos de mudança de uso da terra e manejo da cana-de-açúcar (VN-CQ, VN-CM e CQ-CM). Os conjuntos de dados foram agrupados em sua totalidade e considerando o período de uso da terra (≤ 10 e > 10 anos), apesar do período adotado pelo IPCC ser de 20 anos a divisão de ≤ 10 e > 10 anos é adequada para a quantidade de dados que tem no presente estudo, servindo para mostrar os impactos e tendências de cada tipo de conversão no curto e médio prazo. O valor 1 da variável resposta indica que não ocorreu mudanças nos estoques de COS do sistema atual em relação ao anterior, porém valor maior ou menor indicam que houve aumento ou perda, respectivamente.

Na conversão de VN-CQ, nos conjuntos com ≤ 10 e > 10 anos de conversão, 100% das variáveis respostas foram < 1 , indicando que a substituição da vegetação nativa por cultivo com queima resultou em perdas de COS em todos os locais avaliados. Na conversão VN-CM, no conjunto de dados ≤ 10 anos observou-se que 87,01% das variáveis respostas foram < 1 e as conversões com > 10 anos constatou-se que 100% de variável resposta foram < 1 . Por fim, na conversão CQ-CM, o conjunto de dados com período ≤ 10 anos apresentou 74,57% das variáveis respostas > 1 , enquanto nos dados com > 10 anos, 86,95% das variáveis respostas foram > 1 , indicando que na maioria das observações da conversão CQ-CM houve aumento do COS, principalmente quando se tem mais de 10 anos de conversão (Figura 3).

Figura 3 - Variável respostas entre os estoques de COS encontrado nos sistemas sob vegetação nativa (VN), cana com colheita mecanizada (CM) e cana com queima (CQ) das observações individuais e agrupadas por tempo de uso da terra (≤ 10 e >10 anos): VN-CQ, $n=31$; VN-CM, $n=95$; CQ-CM, $n=84$.





Fonte: Autor (2023).

3.2 Balanço de carbono e tempo de retorno

As conversões VN-CQ e VN-CM apresentaram balanço negativo do carbono. Para a conversão VN-CQ, o balanço negativo do carbono foi calculado em $97,2 \text{ Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1}$ e $90,6 \text{ Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1}$ para as camadas de 0-30 e 0-50 cm, respectivamente, ao longo de 29 anos da conversão (média dos anos de conversão dos estudos utilizados para o cálculo). O balanço negativo do carbono para a conversão VN-CM foi estimado em $63,1 \text{ Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1}$ e $80,0 \text{ Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1}$ para as camadas de 0-30 e 0-50 cm, respectivamente, 9 anos da conversão. Por outro lado, a conversão CQ-CM apresentou acúmulo de carbono no valor de $17,4 \text{ Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1}$ e $5,7 \text{ Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1}$ para as camadas de 0-30 e 0-50 cm, respectivamente, 8 anos da conversão (Tabela 4).

O tempo de retorno foi calculado para os sistemas de manejo cujas converções apresentaram balanço negativo do carbono. A conversão VN-CQ apresentou tempo de retorno maior na camada 0-30 cm (9,9 anos) comparando com a profundidade 0-50 cm (9,2 anos). Para a conversão VN-CM, o tempo de retorno foi menor (6,4 anos) para a camada 0-30 cm, em comparação ao estipulado para a camada 0-50 cm (8,2 anos) (Tabela 4).

Tabela 4 – Efeito da mudança de uso da terra e manejo no balanço negativo do carbono do solo, potencial de acúmulo de carbono e tempo de retorno para as conversões VN-CQ, VN-CM e CQ-CM no Brasil.

Conversão	Camada	C (Mg ha ⁻¹)		C (Acúmulo)	C (Balanço Negativo)	Tempo de retorno
	cm	ref.*	atual	Mg CO ₂ ha ⁻¹		anos
VN-CQ	0-30	61,1	34,6	-	97,2	9,9
	0-50	72,8	48,0	-	90,6	9,2
VN-CM	0-30	54,9	37,7	-	63,1	6,4
	0-50	77,4	55,6	-	80,0	8,2
CQ-CM	0-30	43,7	48,4	17,4	-	-
	0-50	59,0	60,5	5,7	-	-

*estoque de COS da área de referência.

Fonte: Autor (2023).

4 DISCUSSÃO

O acréscimo de COS quando ocorre a substituição do sistema de colheita com queima pela colheita mecanizada na cultura de cana-de-açúcar é amplamente relatado na literatura (SOUZA et al., 2005; RESENDE et al., 2006; CANELLAS et al., 2007; CZYCZA, 2009; SIGNOR et al., 2016; BARROS et al., 2021). Devido a adoção do sistema de colheita mecanizada, entre 10 e 20 t ha⁻¹ ano⁻¹ de palhada são depositados sobre o solo (VITTI et al., 2008). À medida que esse material decompõe, parte do C é incorporado ao solo, aumentando os estoques de COS (CERRI et al., 2011). Correia; Alleoni (2011), em experimento de longa duração no Brasil com sistemas de colheita de cana-de-açúcar, confirmaram que o sistema com colheita mecanizada favorece o acúmulo de COS. Da mesma forma, Signor et al. (2014) descreveram aumento do COS em áreas colhidas sem queima no estado de São Paulo, Brasil. O aumento no estoque de COS com a utilização da colheita mecanizada também foi observado em experimentos em outros países, como por exemplo, Robertson; Thorburn (2007) na Austrália, que constataram maiores estoques de COS na camada de 0-5 cm em áreas sob cobertura morta em detrimento às áreas com queima. No México, Trujillo-Narcía et al. (2019) constataram aumento de 226% no COS com a preservação da palhada. Em experimentos na África do Sul, constatou-se redução de 24,6% no estoque de COS em áreas com queima comparado com áreas sem queima (MKHONZA; MUCHAONYERWA, 2023).

Quando a conversão CQ-CM foi analisada por regiões, observa-se maior acúmulo de COS na região Sudeste em comparação com o Nordeste. Isto provavelmente está relacionado à maior produtividade média, 72 t ha⁻¹, da cana-de-açúcar obtida no Sudeste, contra 62 t ha⁻¹ do Nordeste (CONAB, 2022), o que resultou em maior aporte de palhada e consequentemente, maior acúmulo de C no solo. A temperatura é outro fator que pode influenciar o maior acúmulo de COS na região Sudeste, sendo que as temperaturas mais altas aceleram a decomposição da palhada. O Nordeste apresenta temperatura máxima (31 °C a 35 °C) mais altas que a região Sudeste (27 °C a 31 °C). No entanto, a diferença mais significativa é o período em que essas regiões são expostas a altas temperaturas. No Nordeste, a temperatura máxima é maior que 30 °C durante seis meses, enquanto no Sudeste isso ocorre em apenas quatro meses com temperaturas maiores a 28 °C. Além disso, fatores como a umidade e a quantidade de chuva também tem influência no acúmulo de COS entre as regiões (BLAIR, 2000; SILVA; MACHADO, 2000; VITTI et al., 2008; INMET, 2023).

O efeito positivo do aporte de biomassa no sistema de colheita mecanizada no Brasil fica ainda mais evidente quando se avalia o tempo de adoção do referido sistema, visto que entre 10 e 20 anos, se verificou um aumento entre 4 e 5% nos estoques de COS nas camadas de

0-30 e 0-50 cm, respectivamente. Outros trabalhos também evidenciam o efeito positivo do tempo com colheita mecanizada, como por exemplo, Signor (2010), quando constatou que a colheita mecanizada com três anos apresentou ganho de $4,46 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ e com seis anos de $7,08 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Da mesma forma, Czyzca (2009), observou maior estoque de C do solo no período de 12 anos, $113,47 \text{ Mg ha}^{-1}$, em comparação com o período de seis anos, $93,70 \text{ Mg ha}^{-1}$. Esses estudos foram realizados na região Sudeste, a qual tem quantidade significativa de estudos envolvendo a conversão CQ-CM. Os fatores derivados apresentaram aumento de 4% no COS, entre 10 e 20 anos, para as camadas, 0-30 e 0-50 cm. Contudo, para a região Nordeste só foi possível derivar fatores para 10 anos, em razão da pouca disponibilidade de dados com períodos mais longos, reforçando a necessidade de estudos que contemplem conversões com maior tempo de adoção.

As alterações de COS foram menores na camada de 0-50 cm quando comparada com a camada de 0-30 cm. A percepção da mudança do COS varia de acordo com a profundidade considerada, sendo, a expressão da mudança de uso da terra menos evidente quanto maior for a camada estudada, haja vista que as camadas superficiais são mais sensíveis. Isto ocorre, pois a profundidade de 30 cm concentra aproximadamente 50% do estoque total de COS (JOBAGY; JACKSON, 2000; BALESSENT et al., 2018). A taxa de incorporação de C nas camadas superficiais do solo (ex. 0-30 cm), é fortemente afetada por variáveis ambientais, principalmente o uso da terra e a temperatura média anual, ao contrário, o subsolo apresenta apenas uma pequena relação com a temperatura (BALESSENT et al., 2018). De acordo com Mello et al. (2014) os fatores gerados com base na amostragem de determinada profundidade apenas devem ser aplicados aos estoques de carbono medidos na mesma profundidade, pois, a avaliação de camadas mais profundas resulta em diferentes taxas de mudança do C do solo.

No geral, foi constatado a redução do COS com a substituição de vegetação nativa por cultivo de cana-de-açúcar com queima e com colheita mecanizada, com percentual geral de redução no valor de 29%. Este resultado corrobora com vários estudos encontrados na literatura (VASCONCELOS et al., 2014; KUNDE et al., 2016; SIGNOR et al., 2016; LUZ et al., 2019) e está relacionado com a perturbação antropogênica, como o revolvimento do solo, queima e desmatamento (LAL, 2004).

Contudo, quando analisados por tempo e camada se constata diferenças entre os sistemas de colheita. Para o período de 10 anos, a conversão VN-CM apresentou menor perda de C do que VN-CQ, excluindo o Sudeste na camada de 0-50 cm. A menor perda no sistema de CM é o esperado, pois, o sistema com queima para a posterior colheita reduz o aporte de palhada, que no sistema de cana-de-açúcar é a principal entrada de C para o solo, degrada a

estrutura do solo e reduz os microrganismos do solo, refletindo negativamente sobre os estoques de COS (KUNDE et al., 2016; CARVALHO et al., 2017; WEILER et al., 2019). Contudo, para o período de 20 anos, os resultados indicam que a perda de COS em VN-CM foi maior em comparação ao período de 10 anos. A princípio, pode-se atribuir este resultado a necessidade de mais tempo para atingir um novo estado de equilíbrio dinâmico para solos brasileiros sob cana com colheita mecanizada e a pequena quantidade de comparações com mais de dez anos (18 comparações) sendo necessário mais estudo a longo prazo para reforçar este resultado. Por outro lado, a conversão VN-CQ apresentou menor redução do COS após 20 anos, corroborando com o período padrão de 20 anos indicado pelo IPCC (2006), para estabilização do COS após a mudança de uso da terra.

No entanto, as perdas de COS na conversão de VN-CM em comparação a VN-CQ foram similares, com diferença de 2% a 13%. A perda de COS semelhante entre os sistemas de colheita pode estar relacionada com a operação de replantio, visto que neste processo é utilizado práticas de revolvimento do solo, como gradagem, aração e subsolagem, expondo a matéria orgânica ao ataque microbiano e a mineralização do C (ZANI et al., 2018). Silva-Olaya et al. (2013) constataram que o preparo convencional do solo para replantio da cultura da cana-de-açúcar pode reduzir o C do solo anteriormente armazenado pela adoção do sistema de colheita mecanizada em até 80% na camada de 0-20 cm.

Ao comparar o cultivo de cana-de-açúcar com colheita mecanizada a outros sistemas considerados conservacionistas, como o plantio direto e pastagens bem manejadas, observa-se o potencial de aumento do estoque de COS no sistema com colheita mecanizada. No Brasil, o fator de conversão para CQ-CM variou de $1,13 \pm 0,08$ a $1,19 \pm 0,09$, indicando uma contribuição significativa para o acúmulo de COS. Em contrapartida, o fator de conversão do cultivo convencional (CC) para o plantio direto (PD) variou de 1,06 a 1,11 (MAIA et al., 2022) e a conversão de pastagens degradadas para pastagens recuperadas variou de 1,06 a 1,23 (OLIVEIRA et al., 2022). Essas variações sugerem que os sistemas de colheita mecanizada podem ser uma opção favorável para o aumento do COS em comparação a outros sistemas de manejo conservacionistas. Entretanto, é importante considerar a complexidade e as peculiaridades de cada sistemas bem como as condições locais e sistema de manejo anterior. Por exemplo, as perdas de COS no cultivo anterior à conversão foram maiores no sistema que antecedeu a CM, como no caso dos fatores derivados no presente estudo para a conversão VN-CQ, que foram de $0,65 \pm 0,07$ a $0,85 \pm 0,16$, entretanto, Medeiros et al. (2022) apresentaram fatores entre 0,76 a 0,98 para a conversão VN-CC no Brasil. Provavelmente, por ter um sistema

de cultivo anterior que causou maior perda de C, houve recuperação de COS maior na conversão CQ-CM em comparação com a conversão de CC-PD.

O balanço negativo do carbono estimado com a conversão de vegetação nativa para cana-de-açúcar depende do sistema de colheita adotado. O balanço negativo do carbono foi menor no sistema com colheita mecanizada, pois os estoques de C das áreas que adotaram o sistema de colheita mecanizada são, geralmente, maiores que os das áreas com queima para posterior colheita (PINHEIRO et al., 2010; BARROS et al., 2021; MOITINHO et al., 2021). Por exemplo, Zani et al. (2018) observaram que a área queimada apresentou estoque de COS de 82,8 Mg ha⁻¹ em comparação com 91,8 Mg ha⁻¹ em área sem queima, na profundidade de 0-50 cm.

A inclusão de camadas mais profundas proporcionou maiores perdas de C e maior tempo de recuperação do balanço negativo do carbono nas áreas de colheita mecanizada, estimado em seis anos para a camada de 0-30 cm e em oito anos para a camada de 0-50 cm. Provavelmente isto está relacionado a palhada proveniente da colheita mecanizada ficar concentrada na superfície do solo e ser de fundamental importância para o aumento do COS, com o aumento da profundidade a influência do resíduo é menor (RESENDE et al., 2006; SIGNOR, 2010). Mello et al. (2014) constataram balanço negativo do carbono na conversão de Cerrado para cana-de-açúcar de 77,2 Mg CO₂ ha⁻¹, com tempo de retorno médio de 7,9 anos, na camada 0-30 cm, semelhante ao encontrado nas conversões envolvendo vegetação nativa e cana-de-açúcar no Brasil, 63,1 e 97,2 Mg CO₂ ha⁻¹, com tempo de retorno de 6,4 e 9,9 anos, para CM e CQ, respectivamente, na mesma camada. A variação encontrada no presente trabalho está relacionada às condições do solo, clima, manejo e sistema de colheita adotado.

5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos mostram que, no Brasil e na região Sudeste especificamente, a conversão do sistema de colheita com queima para cana-de-açúcar com colheita mecanizada resulta em um aumento nos estoques de COS de forma progressiva ao longo do tempo, afetando as camadas superficiais e subsuperficiais. Na região Nordeste, também há aumento do COS com a conversão do sistema com queima para o de colheita mecanizada, porém, com a magnitude 8 a 13% inferior ao observado na região Sudeste, e considerando apenas o período de 10 anos, visto que fatores de mudança de COS para 20 anos não foi possível derivar, devido à baixa disponibilidade de informações, indicando a necessidade de realizar mais pesquisas para que o efeito da conversão cana com queima para cana com colheita mecanizada sejam avaliados com mais precisão em longos períodos de tempo nesta região.

A conversão de vegetação nativa para cultivo de cana-de-açúcar reduz em até 35% o estoque de COS, independente do sistema de colheita de cana. Contudo, diferenças foram encontradas quando se observa o período de adoção do sistema. No período de 10 anos, a conversão VN-CM apresentou perda de COS menor que o sistema com queima, com diferença de 2% a 6%, excluindo a camada 0-50 cm da região Sudeste.

O tempo de retorno para o balanço negativo do carbono da conversão VN-CM variou de 6,4 anos para 8,2 anos, sendo inferior ao tempo de retorno da conversão VN-CQ que variou de 9,9 a 9,2 anos. Observa-se que as perdas de carbono diminuíram em porcentagem quando a camada 0-50 cm foi comparada à camada de 0-30 cm para ambos os sistemas de colheita.

Fica evidente o potencial de aumento do COS em sistemas de cana-de-açúcar com colheita mecanizada no Brasil, apresentando assim uma excelente estratégia para produção agrícola sustentável e de menor impacto ambiental, a qual reduz as emissões do GEE e ajuda a reduzir o aquecimento global. Além disso, as informações geradas são de fundamental importância para políticas públicas que visam reduzir as emissões dos GEE ou reter carbono no solo, como as Contribuições Nacionalmente Determinadas – NDCs, o Plano de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura – ABC, iniciativa global “soil carbon 4 per mille” e a Política Nacional de Biocombustíveis – RenovaBio. Porém, mais estudos a longo prazo precisam ser realizados para melhor estimar a dinâmica do COS neste sistema de cultivo.

REFERÊNCIAS

- ABBRUZZINI, T. F. **Qualidade e quantidade da matéria orgânica do solo em cultivo convencional e orgânico de cana-de-açúcar**. Dissertação—Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2011.
- ANP. **RenovaBio**. 2020. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio>>. Acesso em: 2022.
- AQUINO, G. S. de et al. Sistema radicular e produtividade de soqueiras de cana-de-açúcar sob diferentes quantidades de palhada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 12, p. 1150–1159, 2015.
- BALESDENT, J. et al. Atmosphere–soil carbon transfer as a function of soil depth. **Nature**, v. 559, n. 7715, p. 599–602, 2018.
- BARROS, D. R. S. et al. Effect of sugarcane harvesting systems on soil organic matter in northeastern region of Brazil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 52, n. 14, p. 1657–1668, 2021.
- BLAIR, N. Impact of cultivation and sugar-cane green trash management on carbon fractions and aggregate stability for a Chromic Luvisol in Queensland, Australia. **Soil and Tillage Research**, v. 55, n. 3–4, p. 183–191, 2000.
- BRASIL. **Plano setorial de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas para a consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono na agricultura**. 2012. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/plano-abc/arquivo-publicacoes-plano-abc/download.pdf>>. Acesso em: 2023.
- BRASIL. **Brazil first NDC - Second update**. 2022. Disponível em: <<https://unfccc.int/NDCREG>>. Acesso em: 2023.
- CANELLAS, L. P. et al. Estoque e qualidade da matéria orgânica de um solo cultivado com cana-de-açúcar por longo tempo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 2, p. 331–340, 2007.
- CARDIN, C. A.; SANTOS, C. H. DOS; ESCARMÍNIO, M. A. Impacts of vinasse and methods of sugarcane harvesting on the availability of K and carbon stock of an Argisol. **Revista Ceres**, v. 63, n. 1, p. 95–102, 2016.
- CARVALHO, J. L. N. et al. Contribution of above- and belowground bioenergy crop residues to soil carbon. **GCB Bioenergy**, v. 9, n. 8, p. 1333–1343, 2017.
- CERRI, C. C. et al. Canne à sucre et séquestration du carbone. **Académie d’Agriculture de France**, 2004.
- CERRI, C. C. et al. Effect of sugarcane harvesting systems on soil carbon stocks in Brazil: an examination of existing data. **European Journal of Soil Science**, v. 62, n. 1, p. 23–28, 2011.
- CHERUBIN, M. R. et al. Phosphorus pools responses to land-use change for sugarcane expansion in weathered Brazilian soils. **Geoderma**, v. 265, p. 27–38, 2016a.

CHERUBIN, M. R. et al. Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil. **Geoderma**, v. 267, p. 156–168, 2016b.

CONAB. **Cana-de-açúcar: acompanhamento da safra brasileira 2022/2023, 2º levantamento**. Brasília, DF: COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2022.

CORREIA, B. L.; ALLEONI, L. R. F. Conteúdo de carbono e atributos químicos de Latossolo sob cana-de-açúcar colhida com e sem queima. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 8, p. 944–952, 2011.

CZYCZA, R. V. **Quantidade e qualidade da matéria orgânica do solo em sistemas de colheita com e sem queima da cana-de-açúcar**. Dissertação—Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2009.

EMBRAPA. **Avaliação da aptidão agrícola das terras do médio alto curso do Rio Grande (RJ): Subsídios ao planejamento de paisagens rurais montanhosas da Serra do Mar**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2012.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. Brasília: Embrapa, 2017.

FARGIONE, J. et al. Land clearing and the biofuel carbon debt. **Science**, v. 319, n. 5867, p. 1235–1238, 2008.

FARIAS, P. G. da S. et al. Physical fractions of organic matter and mineralizable soil carbon as quality indicators in areas under different forms of use in the Cerrado-Pantanal Ecotone. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 194, n. 7, p. 517, 2022.

FIGUEIREDO, E. B. de et al. Short-term CO₂-C emissions from soil prior to sugarcane (*Saccharum* spp.) replanting in southern Brazil. **GCB Bioenergy**, v. 7, n. 2, p. 316–327, 2015.

FRANCO, A. L. C. et al. Soil carbon, nitrogen and phosphorus changes under sugarcane expansion in Brazil. **Science of The Total Environment**, v. 515–516, p. 30–38, 2015.

GALDOS, M. V.; CERRI, C. C.; CERRI, C. E. P. Soil carbon stocks under burned and unburned sugarcane in Brazil. **Geoderma**, v. 153, n. 3–4, p. 347–352, 2009.

GAVA, G. J. C. et al. Recuperação do nitrogênio (¹⁵N) da ureia e da palhada por soqueira de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 4, p. 621–630, 2003.

INMET. **Instituto Nacional de Meteorologia**. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/>>. Acesso em: 2023.

IPCC. **Generic methodologies applicable to multiple land-use categories**. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: IPCC, 2006.

JOBBAGY, E. G.; JACKSON, R. B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. **Ecological Applications**, v. 10, n. 2, p. 423, 2000.

KUNDE, R. J. et al. Frações físicas da matéria orgânica em Latossolo cultivado com cana-de-açúcar no Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1520–1528, 2016.

LAL, R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. **Geoderma**, v. 123, n. 1–2, p. 1–22, 2004.

LIMA NETO, J. de A. et al. Caracterização e gênese do caráter coeso em latossolos amarelos e argissolos dos tabuleiros costeiros do estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 4, p. 1001–1011, 2009.

LOPES, I. M. **Efeito do manejo da colheita e do sistema de cultivo sobre atributos edáficos de argissolo amarelo e produtividade de cana soca em Linhares (ES)**. Dissertação—Seropédica, RJ: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2014.

LUCA, E. F. de et al. Avaliação de atributos físicos e estoques de carbono e nitrogênio em solos com queima e sem queima de canavial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 2, p. 789–800, 2008.

LUCA, E. F. et al. Effect of conversion from sugarcane preharvest burning to residues green-trashing on SOC stocks and soil fertility status: Results from different soil conditions in Brazil. **Geoderma**, v. 310, p. 238–248, 2018.

LUZ, F. B. DA et al. Monitoring soil quality changes in diversified agricultural cropping systems by the Soil Management Assessment Framework (SMAF) in southern Brazil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 281, p. 100–110, 1 set. 2019.

MAIA, S. M. F. et al. Potential of no-till agriculture as a nature-based solution for climate-change mitigation in Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 220, p. 105368, 2022.

MEDEIROS, A. de S.; SANTOS, T. C. dos; MAIA, S. M. F. Effect of long-term and soil depth on soil organic carbon stocks after conversion from native vegetation to conventional tillage systems in Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 219, p. 105336, 2022.

MELLO, F. F. C. et al. Payback time for soil carbon and sugar-cane ethanol. **Nature Climate Change**, v. 4, n. 7, p. 605–609, 2014.

MINASNY, B. et al. Soil carbon 4 per mille. **Geoderma**, v. 292, p. 59–86, 2017.

MKHONZA, N. P.; MUCHAONYERWA, P. Organic carbon and microbial activity in Umbric Rhodic Ferralsol soils under green cane relative to pre-harvest burning of sugarcane. **Journal of Soils and Sediments**, v. 23, n. 2, p. 804–816, 2023.

MOITINHO, M. R. et al. Effects of burned and unburned sugarcane harvesting systems on soil CO₂ emission and soil physical, chemical, and microbiological attributes. **CATENA**, v. 196, p. 104903, 2021.

OGLE, S. M.; CONANT, R. T.; PAUSTIAN, K. Deriving grassland management factors for a carbon accounting method developed by the intergovernmental panel on climate change. **Environmental Management**, v. 33, n. 4, p. 474–484, 2004.

OLIVEIRA, D. M. da S. et al. Soil carbon changes in areas undergoing expansion of sugarcane into pastures in south-central Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 228, p. 38–48, 2016.

OLIVEIRA, B. G. de et al. Soil greenhouse gas fluxes from vinasse application in Brazilian sugarcane areas. **Geoderma**, v. 200–201, p. 77–84, 2013.

OLIVEIRA, D. C. de et al. Changes in soil carbon and soil carbon sequestration potential under different types of pasture management in Brazil. *Regional Environmental Change*, v. 22, n. 3, p. 87, 2022.

OLIVEIRA, M. W. de et al. Decomposição e liberação de nutrientes da palhada de cana-de-açúcar em campo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, n. 12, p. 2359–2362, 1999.

OLIVEIRA, M. W. de et al. Mineral nutrition and fertilization of sugarcane. Em: **Sugarcane - Technology and Research**. InTech, 2018.

PANOSSO, A. R. et al. Soil CO₂ emission and its relation to soil properties in sugarcane areas under Slash-and-burn and Green harvest. **Soil and Tillage Research**, v. 111, n. 2, p. 190–196, 2011.

PEREIRA, M. G. et al. Decomposição e liberação do nitrogênio, fósforo e potássio da palhada de duas variedades de cana-de-açúcar no nordeste do Brasil. **Conciliun**, v. 22, n. 4, p. 411–418, 2022.

PINHEIRO, É. F. M. et al. Impact of pre-harvest burning versus trash conservation on soil carbon and nitrogen stocks on a sugarcane plantation in the Brazilian Atlantic forest region. **Plant and Soil**, v. 333, n. 1–2, p. 71–80, 2010.

PINHEIRO, J. C.; BATES, D. M. **Mixed-Effects models in S and S-PLUS**. New York, NY: Springer, 2000.

RESENDE, A. S. de et al. Long-term effects of pre-harvest burning and nitrogen and vinasse applications on yield of sugar cane and soil carbon and nitrogen stocks on a plantation in Pernambuco, N.E. Brazil. **Plant and Soil**, v. 281, n. 1–2, p. 339–351, 2006.

ROBERTSON, F. A.; THORBURN, P. J. Management of sugarcane harvest residues: consequences for soil carbon and nitrogen. **Soil Research**, v. 45, n. 1, p. 13, 2007.

ROSSET, J. S.; SCHIAVO, J. A.; ATANÁZIO, R. A. R. Atributos químicos, estoque de carbono orgânico total e das frações humificadas da matéria orgânica do solo em diferentes sistemas de manejo de cana-de-açúcar. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 35, n. 5, p. 2351, 2014.

SAIANI, C. C. S.; PEROSA, B. B. Saúde respiratória e mecanização da colheita da cana-de-açúcar nos municípios paulistas: a importância do Protocolo Agroambiental. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 54, n. 1, p. 29–50, 2016.

SATTOLO, T. M. S. et al. Soil carbon and nitrogen dynamics as affected by land use change and successive nitrogen fertilization of sugarcane. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 247, p. 63–74, 2017.

SIGNOR, D. **Estoques de carbono e nitrogênio e emissões de gases do efeito estufa em áreas de cana-de-açúcar na região de Piracicaba**. Dissertação—Piracicaba: Universidade de São Paulo, 2010.

SIGNOR, D. et al. Estoques de carbono e qualidade da matéria orgânica do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 5, p. 1402–1410, 2014.

SIGNOR, D. et al. Atributos químicos e qualidade da matéria orgânica do solo em sistemas de colheita de cana-de-açúcar com e sem queima. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1438–1448, 2016.

SILVA, C. A.; MACHADO, P. L. O. de A. **Sequestro e emissão de carbono em ecossistemas agrícolas: estratégias para o aumento dos estoques de matéria orgânica em solos tropicais**. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2000.

SILVA NETO, H. F. da et al. Quantificação da palhada de cana-de-açúcar e potencial controle de plantas daninhas. *Revista Trópica – Ciências Agrárias e Biológicas*, v. 10, n. 01, p. 31–37, 2018.

SILVA-OLAYA, A. M. et al. Carbon dioxide emissions under different soil tillage systems in mechanically harvested sugarcane. **Environmental Research Letters**, v. 8, n. 1, 2013.

SISTI, C. P. J. et al. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 76, n. 1, p. 39–58, 2004.

SOARES, V. A. S. F. et al. Irrigated sugarcane crops improve the quality of soil organic carbon over time. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 43, n. 1, p. 283–296, 2022.

SOUZA, Z. M. de et al. Sistemas de colheita e manejo da palhada de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, n. 3, p. 271–278, 2005.

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**. Tese—Piracicaba: Universidade de São Paulo, 2007.

TAVARES, R. L. M. et al. Soil CO₂ emission in sugarcane management systems. **Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science**, v. 65, n. 8, p. 755–762, 2015.

TAVARES, R. L. M. et al. Prediction of soil CO₂ flux in sugarcane management systems using the Random Forest approach. **Scientia Agricola**, v. 75, n. 4, p. 281–287, 2018.

TRUJILLO-NARCÍA, A. et al. The burning of sugarcane plantation in the tropics modifies the microbial and enzymatic processes in soil and rhizosphere. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 19, n. 4, p. 906–919, 2019.

VASCONCELOS, R. F. B. de et al. Qualidade física de Latossolo Amarelo de tabuleiros costeiros em diferentes sistemas de manejo da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 4, p. 381–386, 2014.

VITTI, A. C. et al. Mineralização da palhada e crescimento de raízes de cana-de-açúcar relacionados com a adubação nitrogenada de plantio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2757–2762, 2008.

WEILER, D. A. et al. Carbon balance in sugarcane areas under different tillage systems. **BioEnergy Research**, v. 12, n. 4, p. 778–788, 2019.

ZANI, C. F. et al. Vinasse application and cessation of burning in sugarcane management can have positive impact on soil carbon stocks. **PeerJ**, v. 6, n. 8, p. e5398, 2018.

CAPÍTULO II

EFEITO DOS SISTEMAS DE COLHEITA DA CANA-DE-AÇÚCAR NA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO EM ALAGOAS

RESUMO

A cultura da cana-de-açúcar é uma das principais atividades agrícolas do Brasil. Dentre os sistemas de produção, a colheita mecanizada ganhou destaque e vem substituindo o sistema com queima. A utilização da colheita mecanizada aumenta a retenção de palhada sobre a superfície do solo, que influencia a quantidade e qualidade da matéria orgânica do solo (MOS). O objetivo com este estudo foi avaliar os efeitos da conversão do sistema de colheita de cana-de-açúcar com queima para o sistema de colheita mecanizada, na dinâmica e compartimentos da MOS no estado de Alagoas, Brasil. O estudo foi conduzido em três locais, cada um contendo uma área de cana-de-açúcar com queima (CQ), duas com colheita mecanizada (CM) e uma área de vegetação nativa (VN), totalizando 12 locais de coleta. Os resultados mostram que a conversão de VN em áreas de cultivo de cana-de-açúcar promoveu a perda de carbono orgânico do solo (COS), que variou entre 7% e 62%, e reduziu a qualidade do solo devido a perdas de matéria orgânica particulada (MOP), carbono microbiano (Cmic) e aumento da densidade, sendo corroborado por alterações em outros indicadores, tais como: aumento no quociente metabólico (qCO_2) e no grau de compactação do solo (GCS) e redução no índice de estabilidade estrutural (IEE) do solo. Apesar das perdas quando comparado a VN, o sistema CM apresentou aumento de COS, C da MOP, redução da densidade e aumento do Cmic, sendo corroborado por alterações em outros indicadores, tais como: redução no quociente metabólico (qCO_2) e no grau de compactação do solo (GCS) e aumento no índice de estabilidade estrutural (IEE) do solo. Entretanto, algumas áreas com CM nos locais selecionados em Alagoas mostraram que as propriedades do solo, em comparação à cana queimada, foram prejudicadas.

Palavras-chaves: carbono; matéria orgânica do solo; cana-de-açúcar; colheita.

ABSTRACT

The cultivation of sugar cane is one of the main agricultural activities in Brazil. Among the production systems, mechanized harvesting has gained prominence and has been replacing the burning system. The use of mechanized harvesting increases straw retention on the soil surface, which influences the quantity and quality of soil organic matter (SOM). The aim of this study was to evaluate the effects of converting the sugarcane harvesting system with burning to the mechanized harvesting system, on SOM dynamics and compartments in the state of Alagoas, Brazil. The study was carried out in three sites, each containing an area of sugarcane with burning (CQ), two with mechanized harvesting (CM) and an area of native vegetation (VN), totaling 12 collection sites. The results show that the VN conversion in sugarcane cultivation areas promoted the loss of soil organic carbon (SOC), which varied between 7% and 62%, and reduced soil quality due to matter losses particulate organic matter (POM), microbial carbon (C_{mic}) and density increase, being corroborated by alterations in other indicators, such as: increase in the metabolic quotient (qCO₂) and in the degree of soil compaction (DSC) and reduction in the soil structural stability index (SSI). Despite the losses when compared to VN, the CM system showed an increase in COS, C from POM, a reduction in density and an increase in C_{mic}, which is corroborated by changes in other indicators, such as: reduction in the metabolic quotient (qCO₂) and in the degree of soil compaction (DSC) and increase in soil structural stability index (SSI). However, some areas with CM in selected locations in Alagoas showed that soil properties, compared to burned cane, were impaired.

Keywords: carbon; soil organic matter; sugar cane; harvest.

6 INTRODUÇÃO

A cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) é uma das principais atividades agrícolas do Brasil, desempenhando um papel importante nos setores sociais, econômicos e ambientais (PORTELA et al., 2020). A demanda por biocombustíveis como alternativa energética tem colaborado para a expansão do setor sucroalcooleiro no Brasil (MEDEIROS et al., 2018; BARROS et al., 2021). Atualmente, o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com produção estimada de 572,9 milhões de toneladas em uma área aproximada de 8,12 milhões de hectares e produtividade estimada de 70 toneladas por hectares de colmo industrializáveis (safra de 2022/2023) (CONAB, 2022). A participação da região Nordeste na safra 2022/2023 deve ficar próximo a 9,4% da produção nacional, sendo que 35,3% encontram-se situada no estado de Alagoas, com aproximadamente 305,9 mil hectares de área plantada, produção estimada em 19,10 milhões de toneladas e produtividade de 62 toneladas por hectares de colmo industrializáveis na safra 2022/2023, sendo o Estado com maior produção no Nordeste (CONAB, 2022).

Dentre os diversos sistemas colheita da cana-de-açúcar, destaca-se os sistemas de colheita com prévia despalha a fogo e o sistema com colheita mecanizada, porém, a substituição gradual das áreas com queima por áreas com colheita mecanizada vem acontecendo (BRAUNBECK; OLIVEIRA, 2006). No Brasil, 89% da área total cultivada com cana-de-açúcar é colhida com o sistema mecanizado e apenas 11% é colhida manualmente com prévia despalha a fogo (CONAB, 2022). Entretanto, na região Nordeste, por possuir relevo mais acidentado e disponibilidade de mão de obra, apenas 23% da colheita é realizada com mecanização e 77% com queima (CONAB, 2022).

A substituição da colheita com despalha a fogo por mecanizada foi impulsionada por leis que dispõem da eliminação gradativa da queima da cana para colheita, entre outros fatores, como, a escassez da mão de obra nas áreas rurais, facilitar o gerenciamento das operações, grande demanda por etanol e a pressão do mercado externo por produtos com baixo impacto ambiental (BRAUNBECK; OLIVEIRA, 2006; MENANDRO, 2016; SAIANI; PEROSA, 2016). Entre os impactos ambientais causados pela colheita com prévia despalha a fogo, destaca-se a redução da MOS e a emissão de gases do efeito estufa (GEE) para a atmosfera (SOUZA et al., 2005; SAIANI; PEROSA, 2016; MOITINHO et al., 2021).

Com a utilização do sistema de colheita mecanizada, tem-se a deposição de material orgânica sob a superfície do solo, advinda das folhas secas, dos ponteiros, das folhas verdes e quantidade variáveis de pedaços de colmo (OLIVEIRA et al., 1999; GAVA et al., 2003; PEREIRA et al., 2022). Vários trabalhos relatam efeitos positivos com o cessar da queima,

principalmente nas condições físicas, atributos biológicos, fertilidade, agregação e redução das emissões dos GEE (GALDOS et al., 2009; ABBRUZZINI, 2011; VASCONCELOS et al., 2014; KUNDE et al., 2016; LUCA et al., 2018; PORTELA et al., 2020; FARIAS et al., 2022; SCHIEBELBEIN, 2022).

O manejo com retenção de palhada sobre a superfície do solo influencia a quantidade e qualidade do COS, logo, tem sido discutido como uma possível prática mitigadora do efeito estufa, pois, qualquer produção agrícola que consiga retirar carbono da atmosfera por meio da fotossíntese para a produção de biomassa pode desempenhar um papel importante para o acúmulo do carbono, já que uma parte dessa biomassa retorna ao solo (SIGNOR, 2010; CERRI et al., 2011; LUCA et al., 2018; ZANI et al., 2018; BARROS et al., 2021). Sendo assim, é considerada uma prática que contribui para a sustentabilidade da produção agrícola.

A melhor compreensão da dinâmica da MOS em áreas de cultivos agrícolas se dá não somente pela análise dos teores totais de C orgânico do solo, mas também pelos compartimentos da MOS, uma vez que permite um melhor entendimento da dinâmica do C do solo (SOUZA et al., 2006; FONTANA et al., 2011; WENDLING et al., 2011; LAVALLEE et al., 2020). Essa abordagem da compartimentalização facilita a proposição de estratégias de manejo conservacionistas que reduzam os impactos (erosão, declínio da microbiota do solo, redução da MOS e desestruturação do solo) causado pela agricultura, uma vez que estes representam melhor as alterações. Entre os compartimentos utilizados para avaliação da MOS, destacam-se o fracionamento físico do solo (matéria orgânica particulada - MOP e matéria orgânica associada aos minerais - MOAM) e a biomassa microbiana (C_{mic}) (KUNDE et al., 2018; TIWARI et al., 2019; LAVALLEE et al., 2020). Além disso, a utilização de indicadores como a mineralização do carbono ($C-CO_2$) (BARBIERI et al., 2019).

Apesar de existirem diversas pesquisas sobre o COS e atributos da MOS na cultura da cana-de-açúcar (GALDOS et al., 2009; CERRI et al., 2011; FRANCO et al., 2015; ROSSET et al., 2021; FARIAS et al., 2022; SOARES et al., 2022), principalmente na região Sudeste do Brasil, estudos focados na substituição da colheita com previa despalha a fogo por mecanizada no Nordeste do Brasil, e principalmente no estado de Alagoas, são escassos. Portanto, as informações obtidas neste estudo são de grande importância para o entendimento das alterações provenientes da mudança do sistema de colheita nas características da MOS em sistemas de produção de cana-de-açúcar com diferentes períodos de adoção do sistema mecanizado, visto que existe pouca pesquisa com maiores informações relativas à dinâmica da MOS no estado de Alagoas, além de que os resultados gerados podem ajudar a cadeia produtiva da cana-de-açúcar apresentando informações que contribuam para reduzir os impactos ambientais, destacar a

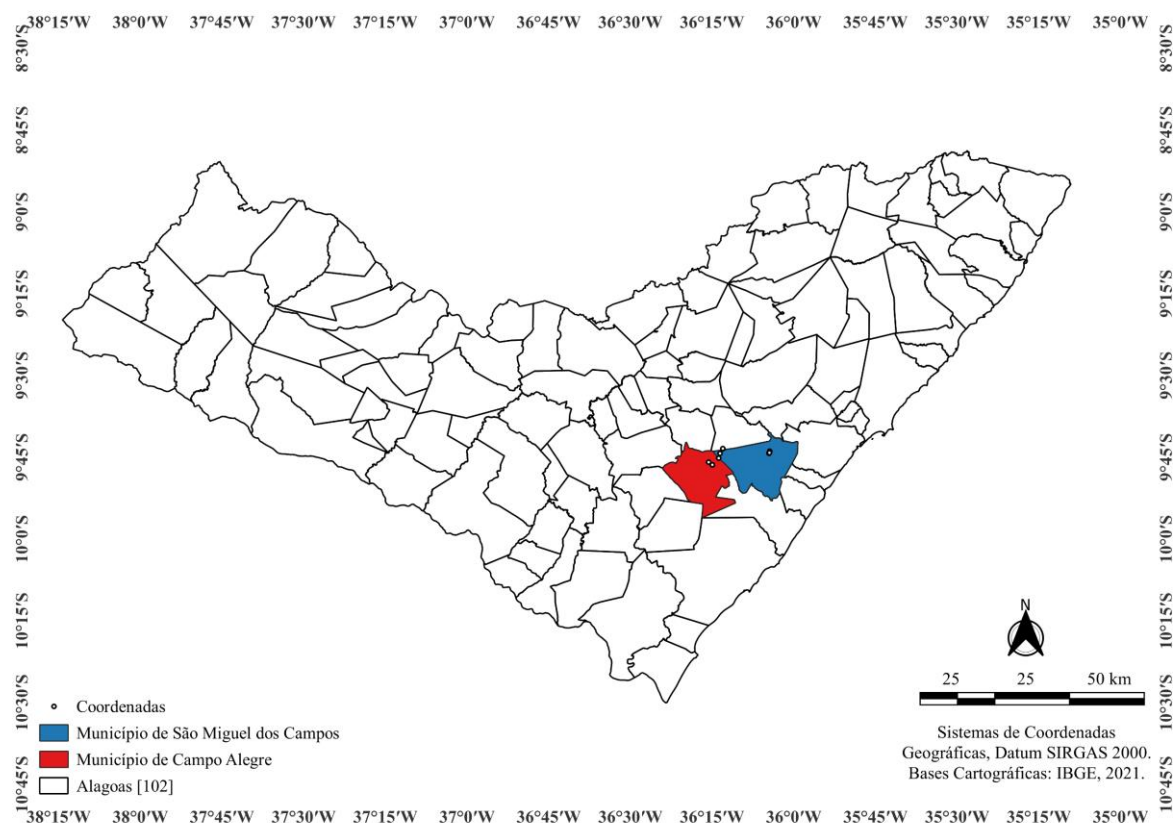
importância da sustentabilidade no setor e produção de alimentos e biocombustíveis com baixo impacto ambiental. O objetivo deste estudo foi avaliar os efeitos da mudança do uso da terra, vegetação nativa para cultivo de cana-de-açúcar com e sem queima, e da mudança de manejo, conversão do sistema de cana-de-açúcar com queima para o sistema de colheita mecanizada, sobre os estoques de C do solo e na dinâmica da matéria orgânica do solo, do estado de Alagoas, Brasil.

7 MATERIAL E MÉTODOS

7.1 Caracterização da área de estudo

As amostragens de solo ocorreram em áreas de cana-de-açúcar com queima e com colheita mecanizada e em área de vegetação nativa de duas usinas produtoras de açúcar e álcool localizadas nos municípios de Campo Alegre e São Miguel dos Campos, Alagoas (Figura). O clima da região é classificado como tropical chuvoso com verão seco (As'), segundo a classificação de Köppen. Apresenta precipitação média anual de 1.650 mm, temperatura média anual de 25,5°C e a vegetação primária é predominantemente do tipo Floresta Subperenifólia, caracterizada por apresentar vegetação exuberante, formação densa e grande porte das espécies arbóreas, formação dominante da zona costeira úmida do Estado de Alagoas (LIMA NETO et al., 2009; EMBRAPA, 2012).

Figura 1 - Mapa do Estado de Alagoas com foco nos municípios de Campo Alegre e São Miguel dos Campos.



Fonte: Autor (2023).

7.2 Amostragem de solo

Foram avaliados três tipos de conversão envolvendo o cultivo da cana-de-açúcar: (i) conversão de vegetação nativa (VN) para cultivo de cana-de-açúcar com queima (CQ); (ii)

conversão de VN para cultivo de cana-de-açúcar com sistema de colheita mecanizada (CM); e (iii) conversão do cultivo de cana-de-açúcar com queima para o sistema de cultivo com colheita mecanizada. Três critérios foram utilizados para selecionar as áreas de estudo: (I) as usinas em questão precisavam ter conhecimento das práticas de uso e manejo do solo adotados, (II) a quantidade de anos seguidos de colheita mecanizada, e (III) deveria existir uma área de referência de vegetação nativa, com relevo, tipo e textura de solo semelhantes. Deste modo, foram selecionadas três locais pertencentes às usinas Caeté e Porto Rico: Fazenda São João (Usina Caeté), Fazenda Pindoba e Fazenda Santa Isabel (Usina Porto Rico). Em cada fazenda foram selecionadas quatro áreas para realizar as coletas, sendo duas áreas com colheita mecanizada, uma com colheita com prévia despalha a fogo e a área de vegetação nativa, totalizando 12 locais de coleta. Todas as áreas de cana-de-açúcar foram implantadas por meio do desmatamento da vegetação nativa e teve início com cultivo convencional da cana-de-açúcar e colheita com prévia despalha a fogo, gradativamente as áreas foram mudando o sistema de colheita para o mecanizado, além das áreas terem sido manejadas conforme o padrão da região no que se refere a adubação, vinhaça e preparo do solo, conforme histórico apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Dados da amostragem de solo e descrição da área de estudo.

Localização	Fazenda	Coordenadas	Uso do Solo	Tempo de uso (anos)	Siglas	Descrição	Tipo de solo
Campo Alegre	Pindoba	-09.77319° S e -36.24832° W	Cana mecanizada	12	CM12	Área colhida a 12 anos por mecanização	Latossolo
			Cana mecanizada	17	CM17	Área colhida a 17 anos por mecanização	Latossolo
			Cana queimada	36	CQ	Área colhida com prévia despalha a fogo	Latossolo
			Vegetação Nativa	Preservada	VN	Área preservada	Latossolo
	Santa Isabel	-09.72399° S e -36.21666° W	Cana mecanizada	3	CM3	Área colhida a 3 anos por mecanização	Latossolo
			Cana mecanizada	9	CM9	Área colhida a 9 anos por mecanização	Latossolo
			Cana queimada	36	CQ	Área colhida com prévia despalha a fogo	Latossolo
			Vegetação Nativa	Preservada	VN	Área preservada	Latossolo
			Cana mecanizada	4	CM4	Área colhida a 4 anos por mecanização	Latossolo
São Miguel dos Campos	São João	-09.73122° S e -36.07342° W	Cana mecanizada	8	CM8	Área colhida a 8 anos por mecanização	Latossolo
			Cana queimada	36	CQ	Área colhida com prévia despalha a fogo	Latossolo
			Vegetação Nativa	Preservada	VN	Área preservada	Latossolo

Fonte: Autor (2023).

As amostras foram coletadas em duas etapas. A primeira, em agosto de 2021, nas áreas CM12, CM17, CQ e VN da fazenda Pindoba, e a segunda em outubro de 2021, nas áreas CM3, CM9, CQ e VN da fazenda Santa Isabel e nas áreas CM4, CM8, CQ e VN da fazenda São João. Em cada área, foram coletadas amostras de solo deformadas e não deformadas em trincheiras de 0,5 x 0,5 x 0,5 m (Figura 2) e em cinco repetições, nas profundidades de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-50 cm, totalizando 240 amostras de solo deformadas e 240 não deformadas. Posteriormente, 50g do material coletado nas camadas de 0-10 e 10-20 cm foram passados em peneira de 2,0 mm e armazenados refrigerados até início das análises da biomassa microbiana do solo (BMS) e o restante das amostras foram secas ao ar, homogeneizadas e passadas em peneiras de 2,0 mm para remover os fragmentos de raízes, cascalhos e pedras, formando assim a terra fina seca ao ar (TFSA) (< 2 mm).

Figura 2 - Trincheiras para coleta das amostras de solo.



Fonte: Autor (2023).

7.3 Análises Químicas

Na caracterização química do solo (Tabela 2), foram determinados $H^+ + Al^{+3}$ (extrator acetato de cálcio), pH em água, P, K^+ e Na^+ extraídos por Mehlich, Ca^{+2} , Mg^{+2} e Al^{+3} trocáveis usando extrator de KCl. Com os valores das análises química do solo, calculou-se: soma de bases ($SB = K^+ + Ca^{+2} + Mg^{+2} + Na^+$), capacidade de troca de cátions efetiva ($CTC(t) = SB + Al^{+3}$), capacidade de troca de cátions potencial ($CTC \text{ a pH } 7,0 \text{ ou } (T) = SB + (H^+ + Al^{+3})$), saturação por bases ($V\% = (100 \times SB / CTC(T))$), e a saturação por alumínio trocável ($m\% =$

$(100 \times \text{Al}^{+3} / \text{CTC (t)})$ (EMBRAPA, 2017). A análise química do solo foi realizada no Laboratório Central Analítica Alagoas.

Tabela 2 - Dados da caracterização química dos solos em área de cana-de-açúcar com colheita mecanizada, cana-de-açúcar com queima e vegetação nativa nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-50 para os sistemas CM12, CM17, CM3, CM9, CM4, CM8, CQ e VN.

Camada (cm)	Locais	Trat	pH	Na	P	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H ⁺ + Al ³⁺	V	m
			H ₂ O	-----mg/dm ³ -----			-----cmolc/dm ³ -----			-----%-----		
0-10	Pindoba	CM12	5,4	21,0	18,0	36,0	2,4	1,7	0,0	5,4	44,2	0,0
		CM17	6,4	22,0	46,0	44,0	3,8	2,5	0,0	3,5	65,0	0,0
		CQ	6,0	21,0	33,0	48,0	3,6	2,0	0,0	4,5	56,4	0,0
		VN	5,7	26,0	9,0	42,0	7,6	1,8	0,0	5,6	63,2	0,0
	Santa Isabel	CM3	5,9	28,0	350,0	81,0	3,2	1,6	0,0	4,1	55,6	0,0
		CM9	5,9	37,0	445,0	105,0	4,4	2,0	0,0	6,4	51,6	0,0
		CQ	5,1	27,0	30,0	66,0	2,2	0,7	0,5	9,3	25,5	13,3
		VN	4,7	25,0	11,0	55,0	1,9	0,9	1,6	14,5	17,4	33,8
	São João	CM4	5,6	25,0	29,0	56,0	2,7	1,3	0,2	5,0	46,0	3,4
		CM8	5,8	23,0	34,0	46,0	3,6	1,2	0,0	4,4	53,3	0,0
		CQ	6,1	40,0	93,0	126,0	3,6	0,8	0,1	4,6	51,6	2,8
		VN	5,2	24,0	5,0	44,0	3,7	1,6	0,2	8,3	39,9	4,2
10-20	Pindoba	CM12	5,2	17,0	17,0	30,0	1,7	1,1	0,3	5,8	33,7	10,3
		CM17	6,0	16,0	30,0	31,0	3,1	2,7	0,0	4,0	59,8	0,0
		CQ	5,9	18,0	23,0	39,0	2,6	1,7	0,0	5,0	47,2	0,0
		VN	5,7	16,0	4,0	20,0	3,1	1,3	0,0	4,6	49,6	0,0
	Santa Isabel	CM3	6,2	24,0	413,0	65,0	3,1	1,6	0,0	4,3	53,6	0,0
		CM9	6,1	25,0	218,0	73,0	3,2	2,4	0,0	6,1	49,1	0,0
		CQ	4,8	19,0	18,0	42,0	0,7	0,4	1,3	9,8	11,6	50,4
		VN	4,5	14,0	6,0	28,0	1,1	0,7	1,8	12,6	13,3	48,2
	São João	CM4	5,7	23,0	27,0	58,0	2,8	0,2	0,2	5,0	39,4	5,2
		CM8	6,1	18,0	29,0	37,0	3,4	1,2	0,0	3,6	57,0	0,0
		CQ	6,0	37,0	21,0	107,0	2,5	1,3	0,0	3,5	54,8	0,0
		VN	5,3	14,0	4,0	23,0	1,9	0,8	0,6	8,2	25,6	16,3
20-30	Pindoba	CM12	5,2	16,0	10,0	17,0	1,6	1,4	0,2	4,5	40,9	6,6

30-50		CM17	6,1	21,0	3,0	47,0	2,4	1,2	0,1	4,1	48,2	3,3	
		CQ	5,6	10,0	21,0	18,0	2,0	1,2	0,4	6,8	32,6	9,6	
		VN	5,8	12,0	2,0	13,0	2,4	0,8	0,0	5,4	37,8	0,0	
		Santa Isabel	CM3	6,2	16,0	129,0	43,0	2,3	1,0	0,0	3,0	53,7	0,0
			CM9	6,6	19,0	339,0	49,0	3,0	0,9	0,0	4,5	47,7	0,0
			CQ	4,6	17,0	27,0	35,0	1,1	0,7	1,5	10,1	16,3	42,5
			VN	4,7	12,0	3,0	20,0	0,5	0,2	1,8	10,0	7,4	68,5
		São João	CQ	5,9	28,0	32,0	75,0	1,7	0,5	0,3	4,4	36,4	9,0
			CM8	6,1	13,0	14,0	23,0	2,1	0,6	0,0	4,0	41,3	0,0
			CM4	5,9	22,0	8,0	54,0	2,3	1,1	0,2	3,9	48,2	4,0
			VN	5,1	13,0	3,0	14,0	1,3	0,4	0,8	5,4	24,9	30,6
		Pindoba	CM12	5,7	13,0	3,0	13,0	1,0	0,8	0,6	5,7	24,9	22,9
			CM17	5,8	18,0	2,0	41,0	2,0	0,6	0,1	4,0	41,0	4,5
			CQ	6,3	11,0	2,0	16,0	1,7	1,0	0,2	4,9	36,3	6,7
			VN	5,6	12,0	2,0	11,0	1,6	0,9	0,2	4,6	35,9	6,9
		Santa Isabel	CM3	4,7	13,0	141,0	35,0	1,7	1,5	0,0	2,8	54,4	0,0
			CM9	5,9	17,0	155,0	38,0	2,6	1,5	0,0	3,2	57,2	0,0
			CQ	5,9	13,0	4,0	31,0	0,4	0,3	1,6	9,4	8,2	65,4
			VN	5,8	13,0	3,0	15,0	0,8	0,4	1,6	8,6	13,1	55,9
		São João	CM4	5,9	20,0	3,0	25,0	2,1	0,4	0,1	3,3	44,5	5,0
			CM8	5,7	11,0	3,0	16,0	1,6	1,1	0,2	4,2	39,9	7,3
			CQ	5,8	22,0	7,0	46,0	1,2	0,6	0,5	4,2	32,4	20,8
			VN	5,2	12,0	3,0	10,0	0,9	0,2	0,9	6,4	15,5	42,8

Fonte: Autor (2023).

7.4 Análise granulométrica e classificação textural

A análise granulométrica foi realizada conforme método da pipeta (EMBRAPA, 2017). Os resultados podem ser observados na Tabela 3. A análise foi realizada no laboratório de Análises Químicas e Ambiental, pertencente ao Instituto Federal de Alagoas (IFAL), *Campus Marechal Deodoro – AL*. A classificação textural foi realizada em nível mais generalizado como descrito por Resende et al. (2014).

Tabela 3 - Caracterização granulométrica e textura dos solos em área de cana-de-açúcar com colheita mecanizada, cana-de-açúcar com queima e vegetação nativa nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-50 cm para os sistemas CM12, CM17, CM3, CM9, CM4, CM8, CQ e VN.

Locais	Pindoba				Santa Isabel				São João			
Camada (cm)	CM12	CM17	CQ	VN	CM3	CM9	CQ	VN	CM4	CM8	CQ	VN
Areia (%)												
0-10	74,88	72,42	69,35	72,99	76,40	80,08	59,86	52,79	63,87	69,48	69,57	64,24
10-20	74,85	73,57	66,70	73,66	76,25	78,31	58,70	55,05	62,43	67,99	49,20	61,80
20-30	70,56	66,72	63,08	71,10	75,47	82,73	56,45	48,43	56,54	62,44	64,67	59,08
30-50	66,70	60,56	54,92	66,32	71,70	77,94	50,77	45,42	47,81	54,38	57,44	54,86
0-30	73,43	70,90	66,38	72,59	76,04	80,37	58,33	52,09	60,95	66,64	61,15	61,71
0-50	71,75	68,32	63,51	71,02	74,96	79,76	56,44	50,42	57,66	63,57	60,22	59,99
Silte (%)												
0-10	9,98	14,84	11,72	11,68	12,84	9,18	12,82	12,16	15,01	10,40	16,67	12,04
10-20	8,20	11,30	8,16	1,78	12,61	8,55	12,99	9,27	13,45	13,88	32,47	12,08
20-30	11,27	12,54	12,39	11,15	7,98	5,72	15,84	13,70	14,92	14,23	13,01	16,19
30-50	10,16	18,31	19,58	9,15	6,93	6,51	14,13	14,50	15,67	16,31	15,45	17,43
0-30	9,82	12,89	10,76	8,21	11,14	7,82	13,88	11,71	14,46	12,84	20,72	13,44
0-50	9,90	14,25	12,96	8,44	10,09	7,49	13,94	12,41	14,76	13,70	19,40	14,43
Argila (%)												
0-10	15,14	12,74	18,93	15,32	10,76	10,74	27,33	35,05	21,12	20,12	13,75	23,72
10-20	16,95	15,13	25,14	24,55	11,14	13,14	28,31	35,68	24,12	18,13	18,33	26,12
20-30	18,16	20,74	24,52	17,75	16,55	11,55	27,71	37,87	28,54	23,34	22,32	24,73
30-50	23,14	21,12	25,51	24,54	21,36	15,55	35,11	40,08	36,52	29,31	27,11	27,72
0-30	16,75	16,20	22,86	19,21	12,82	11,81	27,78	36,20	24,59	20,53	18,14	24,86
0-50	18,35	17,43	23,52	20,54	14,95	12,74	29,61	37,17	27,58	22,72	20,38	25,57
Textura	média	média	média	média	média	média	média	argilosa	média	média	média	média

Fonte: Autor (2023).

7.5 Densidade do solo

As amostras não deformadas foram usadas para determinar a densidade do solo (D_s) pelo método do anel volumétrico, para cada camada do solo dentro de cada sistema de uso do solo (Figura 3) (EMBRAPA, 2017). A densidade de cada camada foi calculada de acordo com a equação (1):

$$Densidade (g\ cm^{-3}) = \frac{massa\ do\ solo\ (g)}{Volume\ do\ anel\ (cm^{-3})} \quad (1)$$

Figura 3 - Coleta da amostra de densidade do solo.



Fonte: Autor (2023).

A partir dos dados de densidade do solo, foi calculado o índice do grau de compactação do solo (GCS), que visa normalizar os limites de densidade do solo em função da textura e outros parâmetros do solo, de acordo com a equação (2). A densidade máxima foi calculada de acordo com a equação (3), descrita por Marcolin; Klein (2011), em que a MOS e o teor de argila são os parâmetros de entrada, pois influenciam significativamente a densidade máxima, apresentando relação inversa.

$$GCS\ (\%) = \frac{Densidade\ (g\ cm^{-3})}{Densidade\ maxima\ (g\ cm^{-3})} \times 100 \quad (2)$$

Densidade máxima ($g\ cm^{-3}$)

$$= 2,03133855 - 0,00320878 * (COS\ (g\ kg^{-1}) * 1,724) - 0,00076508 * argila\ (g\ kg^{-1}) \quad (3)$$

7.6 Fracionamento físico da matéria orgânica do solo

A matéria orgânica do solo foi fisicamente fracionada em matéria orgânica particulada (MOP) e em matéria orgânica associada aos minerais (MOAM) seguindo o método descrito por Mendonça; Matos (2017), adaptado de Cambardella; Elliott (1992). Resumidamente, 30 mL da solução de hexametáfosfato de sódio ($NaPO_3)_6$ ($5\ g\ L^{-1}$) foram adicionados a 10 g de TFSA e dispersos em agitador horizontal por 15 h. Em seguida, a solução dispersa foi passada em peneira de malha 53 μm , e o material retido foi lavado com água deionizada. O material retido na peneira (fração grossa $>53\ \mu m$) representa a MOP, a qual foi seco em estufa de circulação de ar a $70\ ^\circ C$ por 12 h, moído em almofariz de ágata e passado em peneira de 250 μm para posterior análise. O teor de carbono foi determinado na fração MOP pelo método de combustão seca usando um analisador elementar (TOC- Shimadzu, acoplado ao módulo para amostras sólidas SSM-5000A Shimadzu). Já a fração MOAM foi determinada por diferença entre o C total do solo (COT) e o carbono da MOP.

7.7 Mineralização de Carbono

A mineralização líquida de carbono (C-CO₂) foi avaliada pelo método descrito por Mendonça; Matos (2017), adaptado de Stotzky (1965) e Curl; Rodriguez-Kabana (1972), na camada de 0-10 cm. Esse método baseia-se na captura do CO₂, em solução de hidróxido de sódio (NaOH), emitido pelos microrganismos do solo e analisado por titulação ácido-base.

Realizou-se a determinação para a camada de 0-10 cm, onde subamostras de 50 g de solo foram colocadas em potes hermeticamente fechados e foram umedecidos a 60% da capacidade de campo. Cada pote continha um frasco com 30 ml de NaOH a $0,5\ mol\ L^{-1}$ para a captura do CO₂ e outro com 30 ml de água para manter a umidade do solo. As amostras foram então incubadas a $25\ ^\circ C$ e o CO₂ capturado foi mensurado com 1, 2, 4, 7, 11, 17, 22, 29, 36, 45, e 50 dias, após o início da incubação, abrindo os potes e retirando os frascos de NaOH, que foram substituídos por frascos contendo NaOH fresco, promovendo também a aeração dos potes. O CO₂ capturado foi titulado com HCl a $0,25\ mol\ l^{-1}$ e o indicador utilizado foi a fenolftaleína 1%. Houve amostras controle (prova em branco), ou seja, potes sem solo, para cada dia de medição. Com as medidas de cada dia de incubação foi calculado as emissões acumuladas de C-CO₂ e as taxas de decomposição.

7.8 Carbono microbiano

As determinações dos teores de C da biomassa microbiana (C_{mic}) foram feitas com amostras das camadas 0-10 e 10-20 cm que foram armazenadas refrigeradas até o início das análises. As estimativas da biomassa microbiana foram feitas por meio do método de Irradiação-Extração descrito por Mendonça; Matos (2017), adaptado de Islam; Weil (1998), que consiste em comparar amostras irradiadas com energia eletromagnética (micro-ondas) e amostras controles (não irradiadas). A energia eletromagnética tem a função de promover a morte dos microrganismos e romper as células microbianas (lise celular – ruptura da membrana plasmática) liberando assim o conteúdo celular que pode ser extraído e quantificado. Após a irradiação realizou-se a extração, o extrator utilizado foi sulfato de potássio (K_2SO_4) a 0,5 mol L^{-1} com pH ajustado entre 6,5–6,8. Posteriormente a extração determinou-se o Carbono Microbiano pelo método de combustão usando um analisador elementar (TOC- Shimadzu). O C_{mic} (mg $C_{mic}.g^{-1}$ de solo) foi calculado a partir da diferença dos teores de C das amostras irradiadas (C_I) (mg C. g^{-1} de solo) e não-irradiadas (C_{NI}) (mg C. g^{-1} de solo), corrigidas por um fator ($K_c = 0,33$), fator de correção referente a fração de C extraído pelo K_2SO_4 , equação (4):

$$C_{mic} = (C_I - C_{NI}) / K_c \quad (4)$$

Foram calculados o quociente microbiano (q_{Mic}) e o quociente metabólico do solo (q_{CO_2}), pelas equações (5) e (6), respectivamente.

$$q_{Mic} (\%) = \left(\frac{C_{mic} (\mu g \text{ } C_{mic}. g \text{ de solo})}{COT(\mu g \text{ C}. g \text{ de solo})} \right) * 100 \quad (5)$$

$$q_{CO_2} (\mu g \text{ C } CO_2 \text{ } g^{-1} \text{ } C_{mic} \text{ } h^{-1}) = \frac{C \text{ } CO_2 (\mu g \text{ C } CO_2 \text{ } g^{-1} \text{ de solo } h^{-1})}{C_{mic} (\mu g \text{ de } C_{mic}. g \text{ de solo})} \quad (6)$$

7.9 Carbono total

Foram pesados aproximadamente 50 mg das sub-amostras de TFSA, as quais foram homogeneizadas, maceradas em almofariz de ágata e passados em peneira de 250 μm . Os teores de carbono orgânico total (COT) foram determinados pelo método de combustão seca usando um analisador elementar (TOC- Shimadzu, acoplado ao módulo para amostras sólidas SSM-5000A Shimadzu).

Os estoques de COT, Cmic, C-MOP e C-MOAM foram calculados por meio da multiplicação entre o teor do C, densidade do solo e espessura da camada de solo de acordo com a equação (7).

$$Estoque(Mg.ha^{-1}) = teor(\%) * profundidade(cm) * ds(g\ cm^{-3}) \quad (7)$$

Áreas submetidas a manejos agrícolas diferentes possuem densidades diversas, o que resulta na comparação de diferentes massas de solo quando a profundidade amostral é fixa em todas as áreas amostrais. Com o intuito de minimizar as discrepâncias causadas pela diferença na densidade, os estoques de COT, Cmic, Cmp, Cmoam, foram corrigidos com base em massa equivalente do solo seguindo o método proposto por Sisti et al. (2004). Os ajustes foram feitos para as camadas 0-30 e 0-50 cm nas análises de COT, C-MOP e C-MOAM e para a camada 0-20 cm em Cmic. Conforme equação (8):

$$Cs = \sum_{i=1}^{n-1} Cti + \left[Mtn - \left(\sum_{i=1}^n Mti - \sum_{i=1}^n Msi \right) \right] * Ctn \quad (8)$$

Onde:

Cs = estoque de C total corrigido em Mg. ha⁻¹;

$\sum_{i=1}^{n-1} Cti$ = somatório dos estoques de C do solo da primeira à penúltima camada amostrada no tratamento considerado (Mg. ha⁻¹);

Mtn = massa do solo da última camada amostrada do sistema de cultivo (Mg. ha⁻¹);

$\sum_{i=1}^n Mti$ = somatório da massa total do solo amostrado sob o sistema de cultivo (Mg. ha⁻¹);

$\sum_{i=1}^n Msi$ = somatório da massa total do solo amostrado na área de referência (Vegetação nativa) (Mg. ha⁻¹);

Ctn = teor de C do solo na última camada amostrada do sistema de cultivo (Mg C. Mg⁻¹ de solo).

Foi calculado o índice de estabilidade estrutural do solo de acordo com a equação 9, proposta por Pieri (1992). O IEE é uma relação entre a MOS e a área superficial do adsorvente mineral (argila e silte) o qual fornece um índice que permite avaliar o risco de degradação estrutural do solo, que depende essencialmente das ligações orgânicas, onde os valores de IEE > 9% representam estrutura estável; entre 7% e 9%, baixo risco de degradação; entre 5% e 7%,

alto risco de degradação e IEE < 5% representam solo degradado (PIERI, 1992; REYNOLDS et al., 2009).

$$IEE (\%) = \frac{COS (g \text{ kg}^{-1}) \times 1,724}{Silte (g \text{ kg}^{-1}) + Argila (g \text{ kg}^{-1})} \times 100 \quad (9)$$

7.10 Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de normalidade e homogeneidade por meio dos testes de Shapiro-Wilk e Levene ($p > 0,05$), respectivamente. Quando violados, os dados foram transformados usando a transformação Box-Cox para atender às suposições da ANOVA. Uma ANOVA foi usada para testar a significância entre os tratamentos de cada fazenda do estudo, em cada profundidade do solo e nas camadas acumuladas (0-30, 0-50 cm). Quando significativo ($p < 0,05$), foi empregado o teste de Tukey ($p < 0,05$) para comparar as médias dos tratamentos. O conjunto de dados de emissões acumuladas de C-CO₂ e das taxas de decomposição, foram submetidas a análise de regressão, com intuito de testar qual equação tem melhor ajuste. Os dados foram padronizados e submetidos à análise de componentes principais (ACP), considerando apenas as variáveis que apresentaram valor da correlação entre as variáveis e os componentes principais acima de 0,60 (ARAÚJO et al., 2013). Variáveis não associadas aos componentes principais (<0,60) e derivadas de outra variável resposta foram removidas. Em acréscimo, a explicação da variância tem que ser maior que 70% nos dois primeiros componentes, permitindo assim agrupar as variáveis em dois componentes e em todas as áreas de estudo (RENCHEER, 2002). Todas as análises estatísticas foram realizadas usando o *software* R versão 4.2.2 (R Core Team, 2022).

8 RESULTADOS

8.1 Conteúdo de carbono orgânico do solo

A mudança de uso da terra e os diferentes sistemas de colheita de cana-de-açúcar provocaram mudanças no teor de C do solo em todas as áreas de estudo (Tabela 4). De modo geral, o teor de C do solo diminuiu com a profundidade em todas as áreas (Tabela 4).

Na área de estudo Pindoba, na camada superior (0-10 cm), o teor de C orgânico do solo (COS) sob VN foi de 23,1 g C. kg⁻¹ solo, sendo reduzido em 47, 32 e 41%, nas áreas cultivadas CM12, CM17 e CQ, respectivamente. Para a camada 10-20 cm, a VN apresentou redução de 47,97% em relação a camada anterior (0-10 cm), já as áreas com cultivo apresentaram redução máxima de 30,12%. Apesar desta diferença, o teor de COS na área de vegetação nativa se manteve superior ($p < 0,05$) ao tratamento CM12, porém, não se diferenciou de CM17 e CQ ($p > 0,05$). Para a camada de 20-30 cm, CM17 diminuiu significativamente ($p < 0,05$) o teor de COS em comparação com a camada 10-20 cm, apresentando 7,93 g C. kg⁻¹ solo em comparação a 9,31 g C. kg⁻¹ solo sob VN. Para a última camada (30-50 cm), nenhum tratamento apresentou diferença significativa entre si ($p > 0,05$).

A área Santa Isabel, apresentou reduções nos teores de COS nas conversões de VN para cultivo de cana-de-açúcar, apresentando assim um conteúdo de COS maior ($p < 0,05$) que os tratamentos sob cana-de-açúcar (CM3, CM9 e CQ). Na camada superior 0-10 cm, quando comparados os sistemas de colheita, CM9 se destacou com 16,47 g C kg⁻¹ solo em comparação com 13,63 g C kg⁻¹ solo sob CQ ($p > 0,05$) e 9,92 g C kg⁻¹ solo sob CM3 ($p < 0,05$). Na camada de 10-20 cm, não houve redução significativa nos tratamentos, porém observa-se uma maior redução no tratamento CM9, 4,25 g C kg⁻¹ solo. A redução de C no solo foi mais acentuada a partir da camada de 20-30 cm, principalmente nas áreas de cana com colheita mecanizada, apresentando redução de 63% para CM3 e 59% para CM9, na profundidade de 30-50 cm.

A fazenda São João apresentou na superfície do solo (0-10 cm) teor de COS sob VN de 22,34 g C kg⁻¹ solo, quando se compara com as áreas sob cultivo de cana-de-açúcar houve uma redução de 46% em CM4 ($p < 0,05$), 44% em CM8 e 43% em CQ ($p > 0,05$). Para as duas últimas camadas (20-30 e 30-50 cm), houve redução em comparação com as camadas anteriores (0-10 e 10-20 cm), porém, entre os tratamentos não apresentaram diferença significativa. Apesar de não apresentar diferenças estatísticas, houve redução considerável nos teores, com destaque para os tratamentos CM8 que reduziu os teores de COS em 28% na camada de 20-30 cm e o tratamento CM4 com uma redução de 16% na camada de 30-50 cm, quando comparados com VN.

Tabela 4 - Teor de C dos locais e nos tratamentos de cana com colheita mecanizada, cana com queima e vegetação nativa, nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-50 cm.

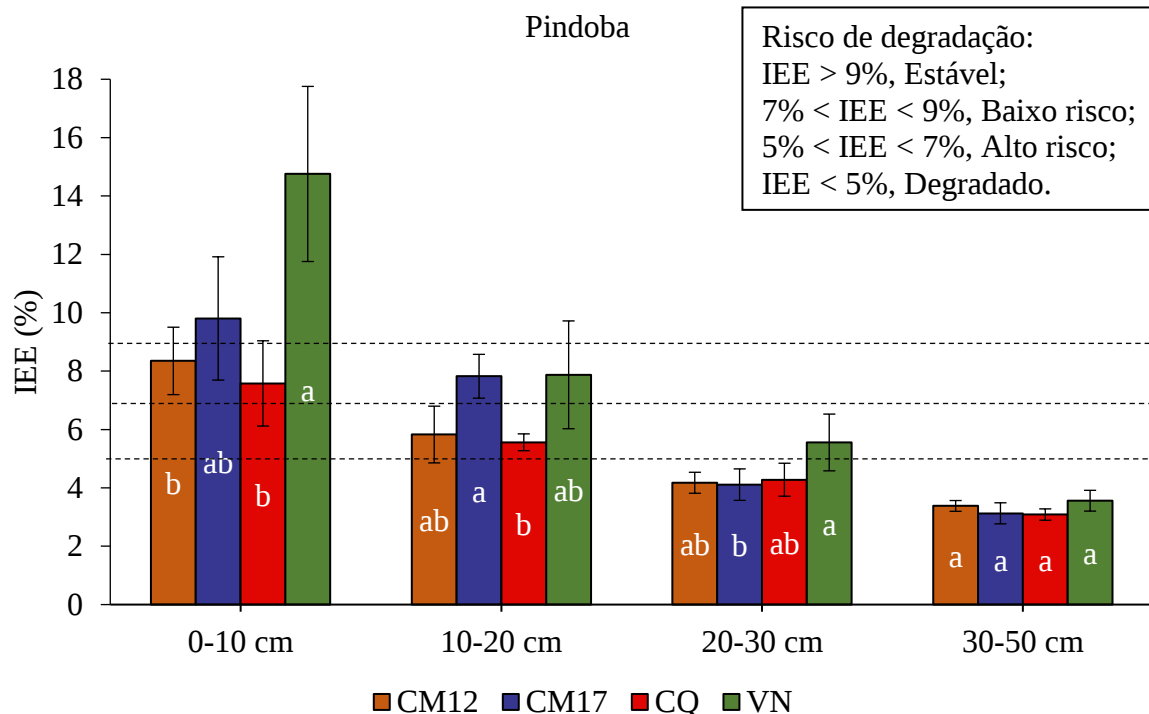
Locais	Pindoba				Santa Isabel				São João			
Camada	CM12	CM17	CQ	VN	CM3	CM9	CQ	VN	CM4	CM8	CQ	VN
(cm)	COT (g C. kg⁻¹ solo)											
0-10	12,17 *bA	15,6 abA	13,47 abA	23,11 aA	9,92 cA	16,47 bA	13,63 bcA	28,50 aA	11,99 bA	12,50 abA	12,66 abA	22,34 aA
10-20	8,50 bB	12,00 aA	10,74 abAB	12,03 aB	8,26 cAB	12,23 bcA	13,02 bAB	23,21 aAB	10,66 abA	9,42 bAB	8,66 bB	16,97 aAB
20-30	7,13 bBC	7,93 abB	9,16 abBC	9,31 aB	5,83 cB	7,16 cB	10,97 bAB	16,70 aBC	8,71 aAB	8,06 aB	8,43 aB	11,27 aBC
30-50	6,53 aC	7,15 aB	8,07 aC	6,95 aC	3,64 cC	6,73 bB	8,97 abB	12,34 aC	7,23 aB	7,79 aB	7,51 aB	8,71 aC

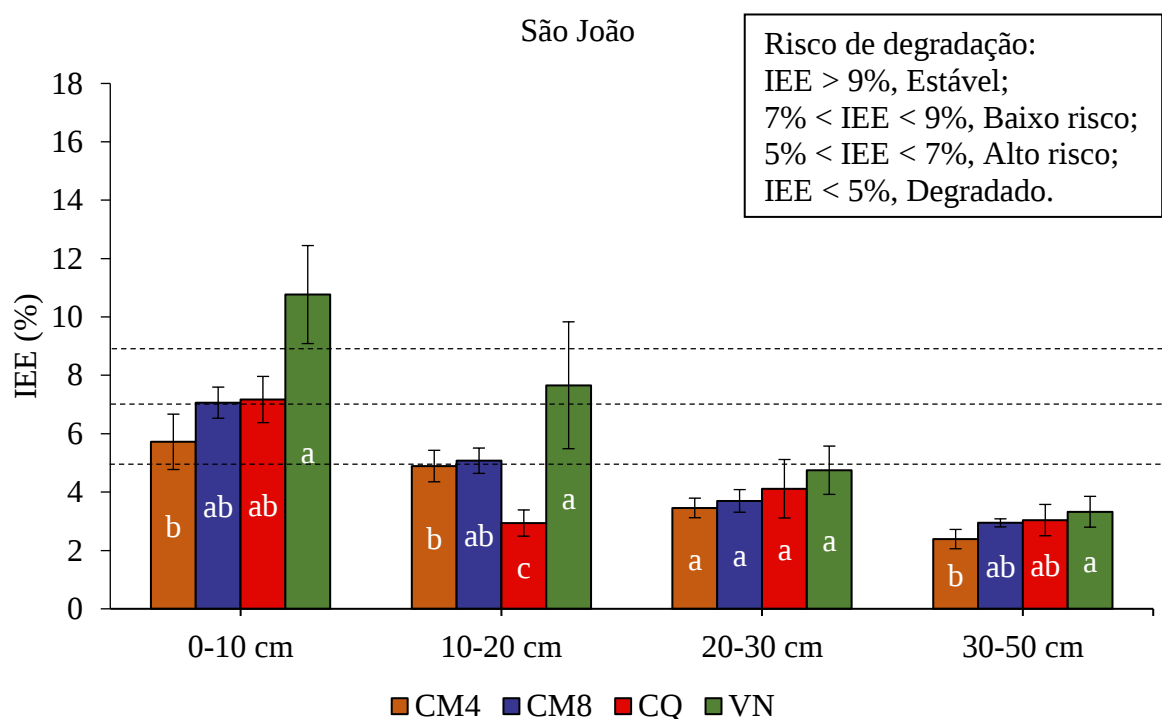
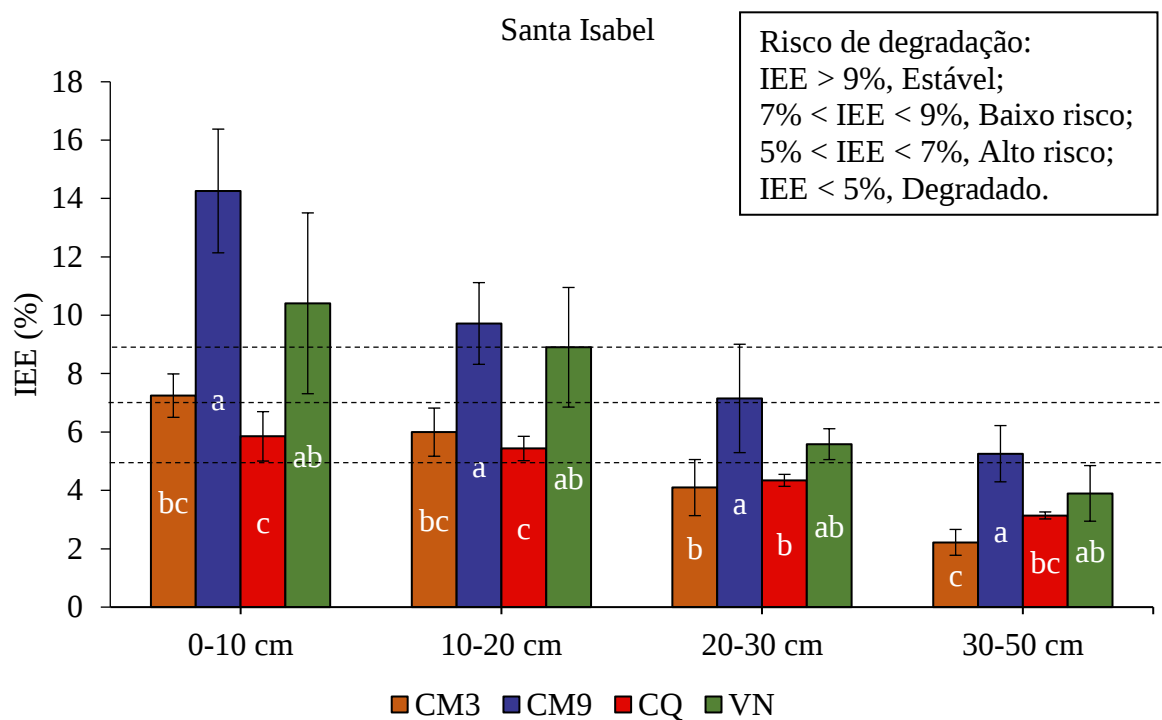
*Médias seguidas de mesma letra minúscula nas linhas e mesma letra maiúscula nas colunas, não se diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade (p<0,05).

Fonte: Autor (2023).

A vegetação nativa apresentou valores de IEE mais altos do que as áreas de cana-de-açúcar com queima e com colheita mecanizada, principalmente na camada de 0-10 cm para as três áreas de estudo (Figura 4). A exceção foi na fazenda Santa Isabel, onde a conversão VN-CM9 apresentou índice 3,8% maior na área de cana-de-açúcar. O valor de IEE apresentou uma tendência decrescente em profundidade para as três áreas de estudo. Observou-se, nas áreas com colheita mecanizada, valores de IEE mais altos nos locais Pindoba e Santa Isabel, principalmente na superfície do solo, 0-10 cm, com valores de IEE entre 3% e 14%. Na fazenda São João, a cana com queima apresentou valor de IEE maior, 7,17%, em relação às áreas com colheita mecanizada, 5,72% (CM4) e 7,06% (CM8), camada 0-10 cm, porém não apresentou diferenças significativas ($p>0,05$). Observou-se a mesma tendência nas camadas 20-30 cm e 30-50 cm, porém, a camada 10-20 cm apresentou valores de IEE menor na área com queima, 2,93%, em comparação com a colheita mecanizada, média de 5%, apresentando diferença significativa ($p<0,05$) (Figura 4).

Figura 4 - Índice de estabilidade estrutural do solo dos locais nos tratamentos de cana com colheita mecanizada, cana com queima e vegetação nativa, nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-50 cm.





* Mesma letra minúscula entre os tratamentos na mesma profundidade, não se diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ($p < 0,05$).

Fonte: Autor (2023).

8.2 Estoques de carbono do solo

O processo de conversão e mudança no sistema de colheita alterou os estoques de COS nos três locais (Figura 5). Na fazenda Pindoba, a conversão de vegetação nativa em cana-de-

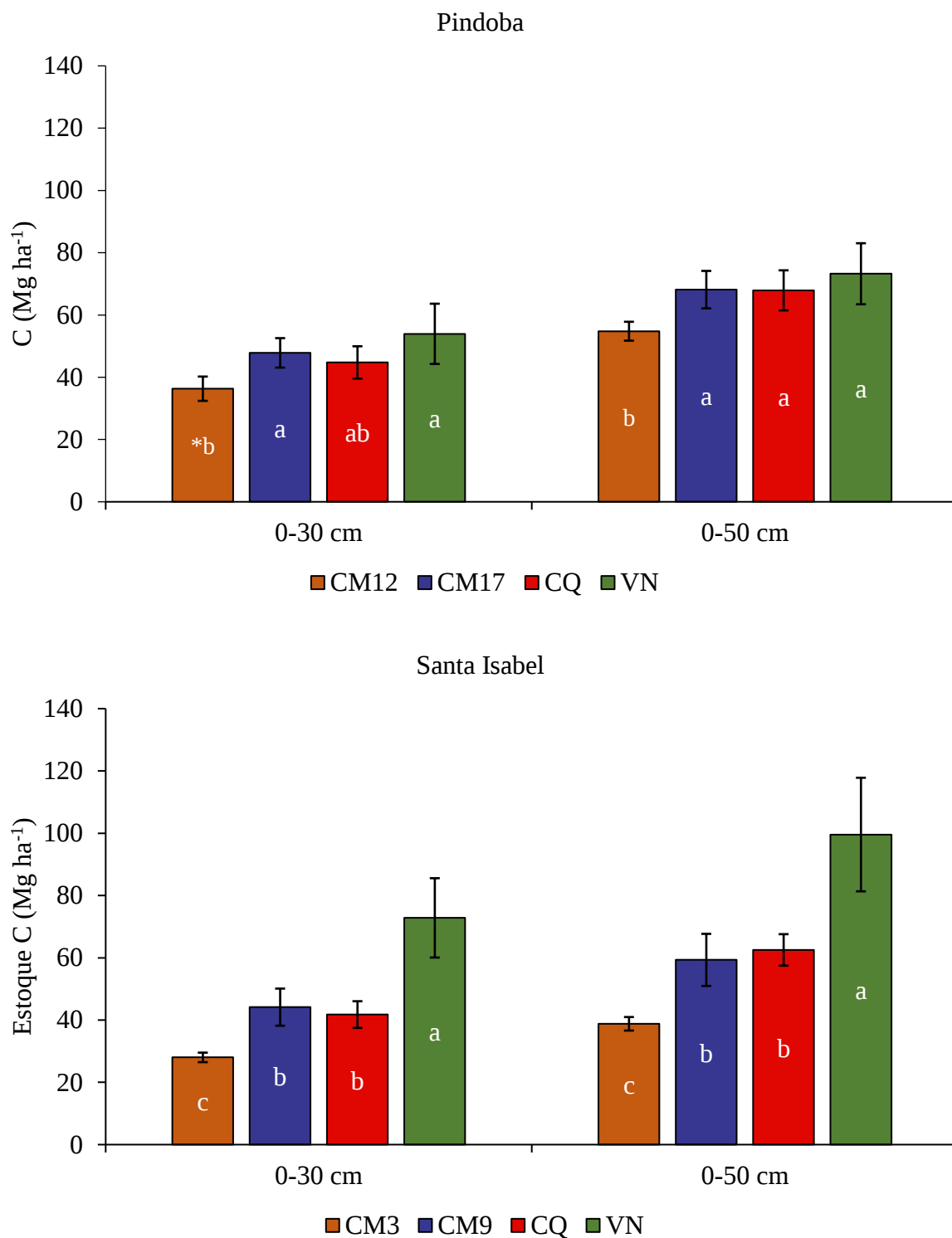
açúcar reduziu os estoques de C em 33% na camada de 0-30 cm e em 25%, na camada de 0-50 cm, no tratamento CM12 ($p < 0,05$). Porém as alterações no estoque de C não foram significativas ($p > 0,05$) nos tratamentos, CM17 e CQ. Na camada de 0-50 cm observou-se que houve redução no estoque de C no tratamento CM12 (19%) em relação a CQ, diferindo estatisticamente ($p < 0,05$).

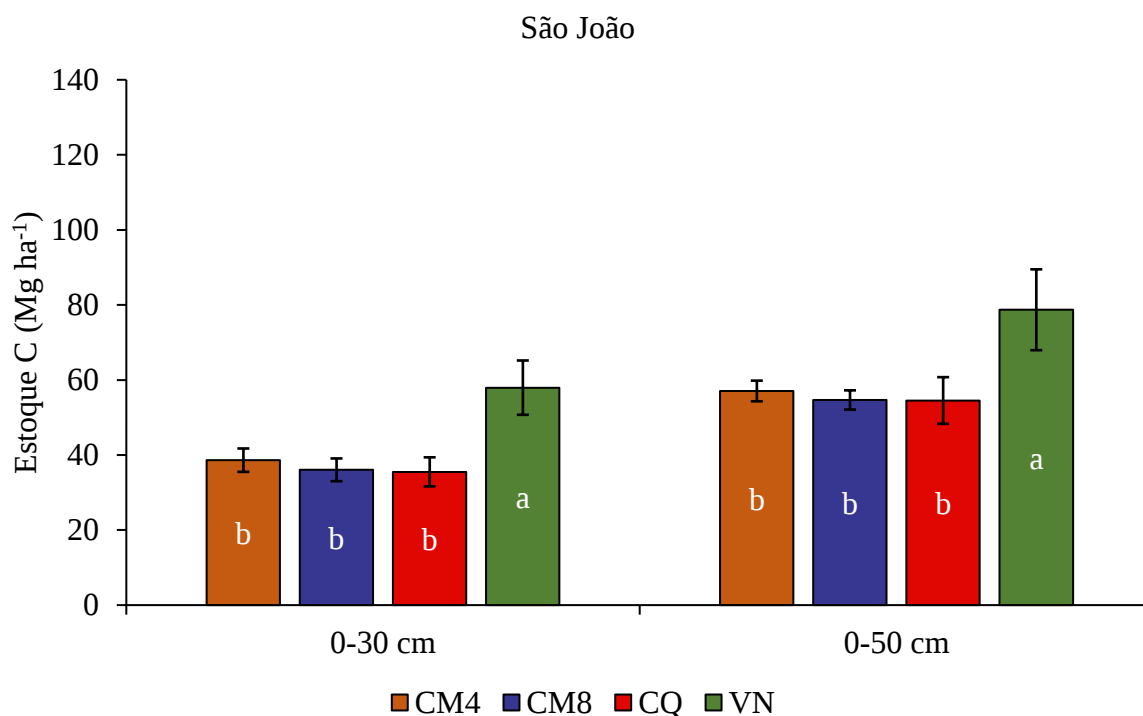
Na fazenda Santa Isabel, nas camadas 0-30 e 0-50 cm, o estoque de C do solo sob VN foi de 72,81 e 99,58 Mg ha⁻¹, respectivamente, quando houve a conversão para área cultivada ocorreu redução no estoque de C de 62, 39 e 43% ($p < 0,05$) (0-30 cm) e de 61, 40 e 37% ($p < 0,05$) (0-50 cm), em CM3, CM9 e CQ, respectivamente. Fazendo as comparações entre área com queima e área sob colheita mecanizada observa-se que na camada 0-30 e 0-50 cm, na conversão CQ-CM3, os estoques de COS reduziram em 33 e 38% ($p < 0,05$), respectivamente.

Na fazenda São João, a VN apresentou o maior estoque de COS, 57,95 e 78,70 Mg ha⁻¹, nas camadas 0-30 e 0-50 cm, respectivamente, apresentando redução de 33, 38 e 39% ($p < 0,05$) (0-30 cm), e de 27, 31 e 31% ($p < 0,05$) (0-50 cm), nos tratamentos CM4, CM8 e CQ, respectivamente. As comparações de cana-de-açúcar com queima e com colheita mecanizada não apresentaram diferenças significativas ($p > 0,05$) em relação aos estoques de COS, em ambas as profundidades (0-30 e 0-50 cm) e tratamentos (CQ, CM4 E CM8).

Entre os tratamentos sob cana mecanizada, observa-se uma tendência de menor acúmulo nos estoques de C para as áreas com menos anos de conversão. Na fazenda Pindoba o estoque de C no tratamento CM12 foi 24 e 20% menor comparativamente com CM17 ($p < 0,05$), nas camadas de 0-30 e 0-50 cm, respectivamente. Na fazenda Santa Isabel o tratamento CM3 foi 37 e 35% menor comparativamente com CM9 ($p < 0,05$), nas profundidades 0-30 e 0-50 cm, respectivamente.

Figura 5 - Estoques de C dos locais e nos tratamentos de cana com colheita mecanizada, cana com queima e vegetação nativa, nas camadas de 0-30 e 0-50 cm.





*Mesma letra minúscula acima da barra entre os tratamentos na mesma profundidade, não se diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ($p < 0,05$). Barras de erro representam o desvio padrão.

Fonte: Autor (2023).

8.3 Estoque de C das frações da matéria orgânica particulada e associada a minerais

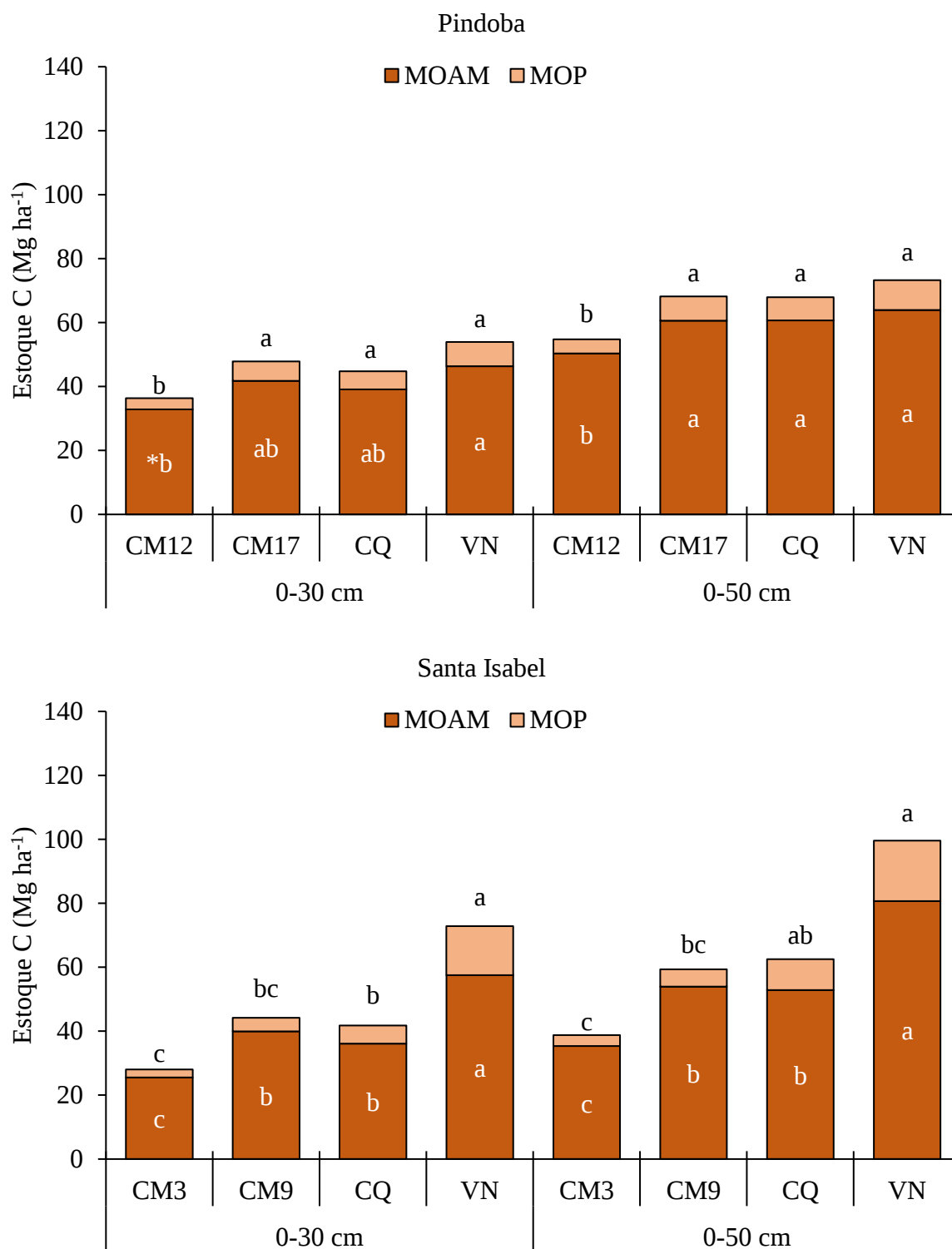
No que se refere às frações da matéria orgânica do solo (Figura 6), observou-se na fazenda Pindoba, que o tratamento CM12 resultou na redução significativa ($p < 0,05$) das duas frações (Matéria Orgânica Particulada - MOP e em Matéria Orgânica Associada aos Minerais - MOAM) em comparação com a VN. A maior perda ocorreu na MOP, que teve diminuição de 54% e 51% de C em comparação a VN nas camadas de 0-30 e 0-50 cm, respectivamente. Efeito semelhante foi observado na fração MOAM, entretanto, as perdas de C ocorreram em menor proporção, demonstrando uma diminuição de 29 e 21% em comparação com a VN, para as camadas de 0-30 e 0-50 cm, respectivamente ($p < 0,05$). Comparando o tratamento de cana com queima com os de colheita mecanizada, observa-se na camada de 0-30 cm que o tratamento CM12 apresentou diferença significativa ($p < 0,05$) na fração MOP, apresentando redução no estoque de C do solo de 2,12 Mg ha⁻¹, em comparação a CQ. Na camada de 0-50 cm o tratamento CM12 apresentou redução de 17 e 38% ($p < 0,05$), para as frações MOAM e MOP, respectivamente, em comparação com as frações do tratamento CQ.

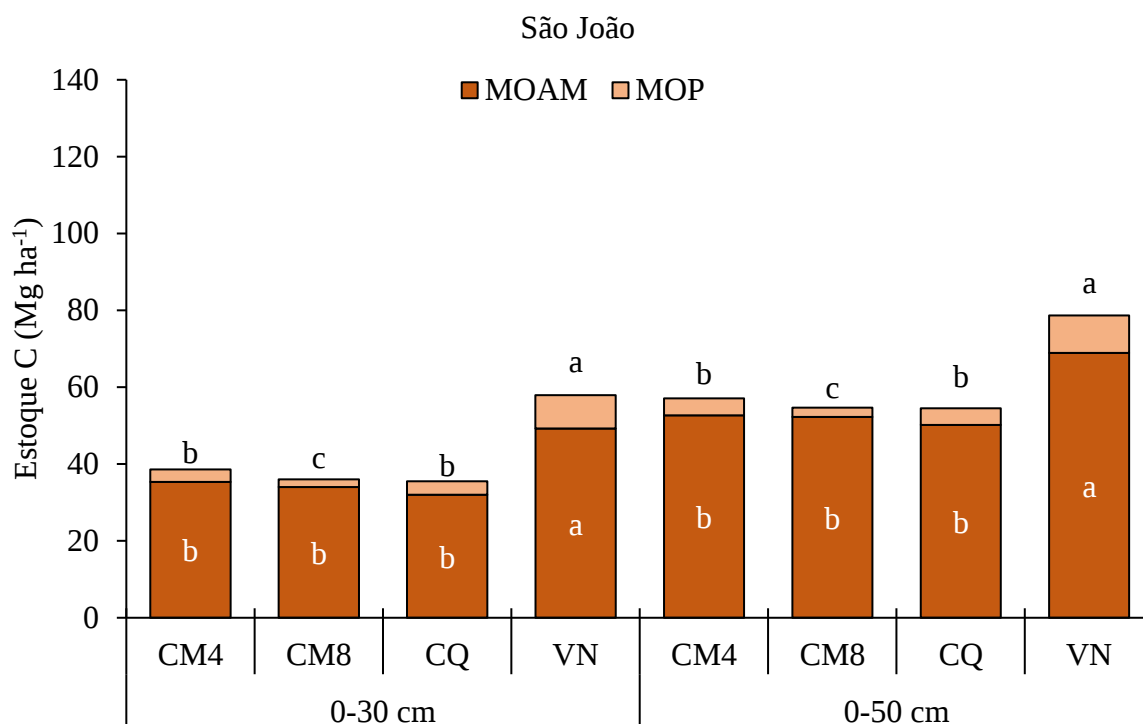
Na fazenda Santa Isabel houve redução significativa das frações em todos os tratamentos com cana-de-açúcar quando comparados com a VN, com exceção do tratamento CQ na fração MOP (0-50 cm) (Figura 6). A MOP diminuiu de 15,29 Mg ha⁻¹ sob VN para 2,50,

4,21 e 5,70 Mg ha⁻¹ em CM3, CM9 e CQ, respectivamente, na camada 0-30 cm, e de 18,89 Mg ha⁻¹ sob VN para 3,46 Mg ha⁻¹ em CM3, 5,42 Mg ha⁻¹ em CM9 e 9,69 Mg ha⁻¹ em CQ, na camada 0-50 cm, apresentando reduções de até 83% nesta fração. A MOAM apresentou reduções em seus estoques de C de 55, 30 e 37% em CM3, CM9 e CQ, respectivamente, na camada de 0-30 cm, e de 56, 33 e 34% em CM3, CM9 e CQ, respectivamente, na camada de 0-50 cm ($p<0,05$) comparativamente a vegetação nativa. Na comparação entre cana com queima e cana com colheita mecanizada ocorreu diferença significativa apenas na conversão CQ-CM3. Os estoques de MOP na CM3 tiveram redução de 56 e 64% nas camadas de 0-30 e 0-50 cm, respectivamente ($p<0,05$). Já os estoques de MOAM, tiveram redução menos acentuada de 29 e 33% nas camadas de 0-30 e 0-50 cm, respectivamente ($p<0,05$).

Na fazenda São João, houve depleção de C do solo devido a conversão de vegetação nativa para áreas com cana-de-açúcar (Figura 6). A maior proporção de perda ocorreu na fração MOP, que teve uma diminuição de 62, 76 e 60% de C em CM4, CM8 e CQ, respectivamente, em comparação com a VN na camada 0-30 cm ($p<0,05$), e de 55, 75 e 55% na camada 0-50 cm ($p<0,05$). Efeito semelhante foi observado nas perdas de C da MOAM, apresentando uma diminuição média de 31% dos sistemas com cana em comparação com VN na camada de 0-30 cm, e redução média de 24% da comparação de cana-VN, na camada de 0-50 cm. Na comparação entre cana com queima com os tratamentos de cana com colheita mecanizada, ocorreu diferença significativa em CQ-CM8 na fração MOP. Os estoques de MOP tiveram redução de 41% e 44% nas camadas de 0-30 e 0-50 cm, respectivamente ($p<0,05$), em comparação com CQ.

Figura 6 - Estoques de C nas frações da MOS (MOP - matéria orgânica particulada, MOAM - matéria orgânica associada aos minerais) nos locais e nos tratamentos de cana com colheita mecanizada, cana com queima e vegetação nativa, nas camadas de solo de 0-30 e 0-50 cm.



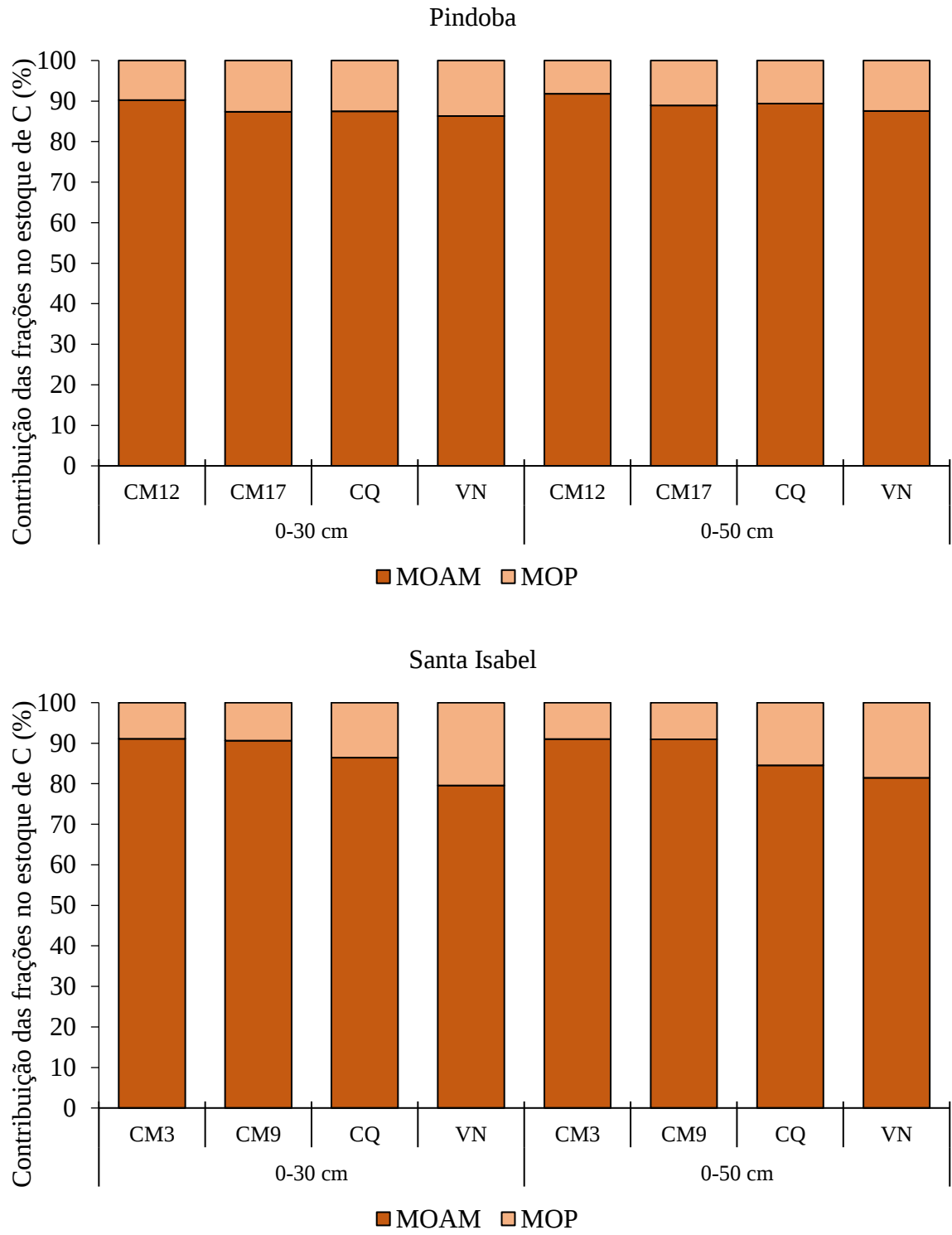


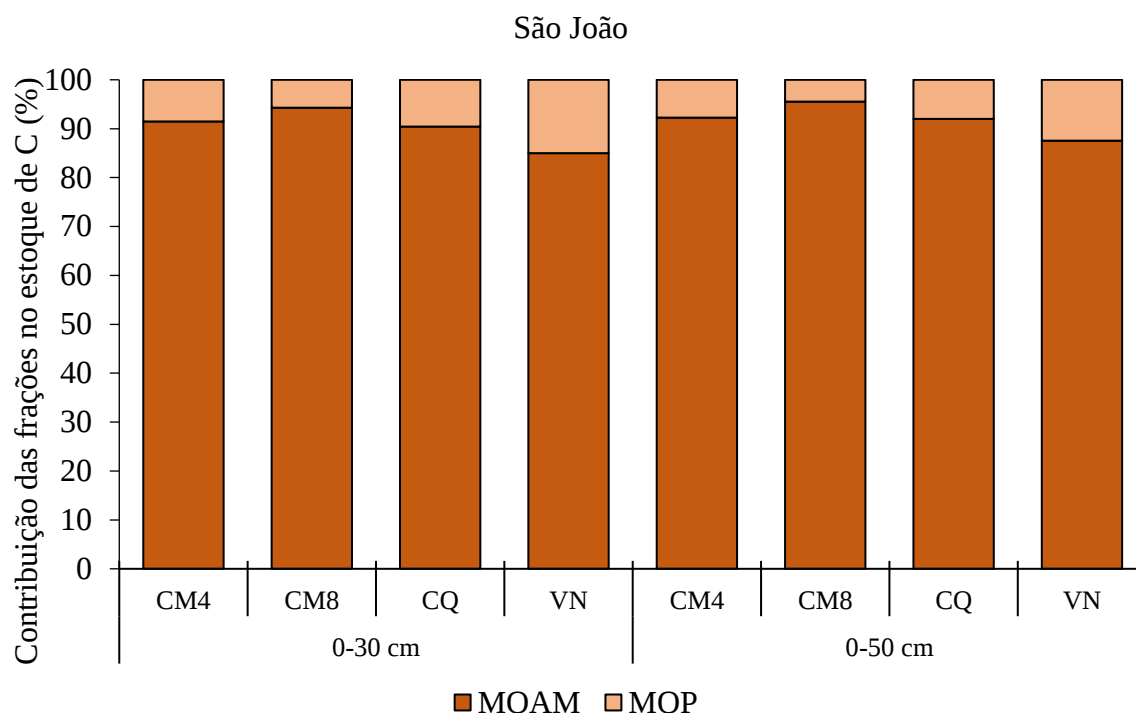
* Mesma letra minúscula acima da barra entre os tratamentos na mesma profundidade e na mesma fração (MOAM ou MOP), não se diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ($p < 0,05$).

Fonte: Autor (2023).

De maneira geral, a MOAM contribuiu com 79,56% a 95,51% e a MOP com 4,48% a 20,43% dos estoques totais de COS, para os três locais do estudo e ambas as profundidades (0-30 e 0-50 cm) (Figura 7). Na fazenda Pindoba, a participação da MOP foi semelhante entre os tratamentos, com 9,74, 12,63, 12,50 e 13,72% em CM12, CM17, CQ e VN, respectivamente, na camada 0-30 cm, e de 8,21, 11,04, 10,63 e 12,47% nos tratamentos CM12, CM17, CQ e VN, respectivamente, na camada 0-50 cm. A fazenda Santa Isabel apresentou na VN a maior participação da fração MOP, 20%, por outro lado, nas áreas sob cana-de-açúcar a contribuição da MOP foi de 8,92, 9,40 e 13,53%, nos tratamentos CM3, CM9 e CQ, respectivamente, na camada 0-30 cm. Na camada 0-50 cm, os tratamentos sob cana colhida mecanicamente (CM3 e CM9) apresentaram as menores proporções da MOP, com valores de 8,97 e 9,04%, em CM3 e CM9, respectivamente. A fazenda São João apresentou no tratamento CM8 a menor participação da MOP, 5,71% na profundidade de 0-30 cm e de 4,48% na profundidade de 0-50 cm. Entretanto, as demais áreas (CM3, CQ e VN) apresentaram valores semelhantes aos outros locais do estudo, com valores de 8,49, 9,59 e 15,01% em CM3, CQ e VN, respectivamente, na camada 0-30 cm e de 7,70, 7,97 e 12,43% em CM3, CQ e VN, respectivamente, na camada 0-50 cm.

Figura 7 - Contribuição das frações da matéria orgânica do solo MOS (MOP - matéria orgânica particulada, MOAM - matéria orgânica associada aos minerais) nos estoques de C, nos locais e nos tratamentos de cana com colheita mecanizada, cana com queima e vegetação nativa, nas camadas de solo de 0-30 e 0-50 cm.





Fonte: Autor (2023).

8.4 Densidade do solo (Ds)

De forma geral, a mudança de vegetação nativa para o cultivo de cana-de-açúcar resultou no aumento da densidade do solo até a profundidade de 20 cm, com exceção da fazenda Santa Isabel, na qual, houve aumento da densidade até a profundidade de 50 cm em áreas com cultivo de cana colhida mecanicamente, como pode ser visto na Tabela 5.

Em relação a fazenda Pindoba, quando se observa apenas as áreas de cana-de-açúcar, constata-se que o tratamento CQ apresentou o maior aumento nas camadas mais superficiais (0-10 e 10-20 cm), com os valores variando de 1,61 g cm⁻³ (0-10 cm) a 1,48, 1,40 e 1,27 g cm⁻³, nas camadas de 10-20, 20-30 e 30-50 cm, respectivamente. Além disto, a Ds do tratamento CQ diferiu significativamente dos tratamentos CM12 e CM17 ($p < 0,05$), na camada 0-10 cm, apresentando valores de 1,61, 1,38 e 1,39 g cm⁻³, nos tratamentos CQ, CM12 e CM17, respectivamente, sendo os valores de Ds nas áreas de cana com colheita mecanizada em média 14% menor em relação a CQ.

A fazenda Santa Isabel apresentou aumento da Ds mais acentuado nas áreas de cana com colheita mecanizada. A Ds foi maior nas camadas mais subsuperficiais (10-20 e 20-30 cm) do solo nos tratamentos CM3 e CM9. Em CM3 a Ds foi de 1,39, 1,50, 1,60 e 1,49 g cm⁻³, nas camadas 0-10, 10-20, 20-30 e 30-50 cm, respectivamente, o que significa um aumento de 32,44% (30-50 cm) na Ds, em relação ao tratamento CQ, e em 40,62% (20-30 cm), em relação

ao tratamento VN. Em CM9 os valores de Ds foram de 1,42, 1,54, 1,63, e 1,51 g cm⁻³, nas camadas 0-10, 10-20, 20-30 e 30-50 cm, respectivamente, comparando CM9 com VN e CQ, houve aumento máximo da Ds no tratamento CM9 de 43,56 (20-30 cm) e 33,6% (30-50 cm), em VN e CQ, respectivamente.

O tratamento CM8 da fazenda São João apresentou o menor aumento de Ds quando comparado a área sob vegetação nativa, na profundidade de 10 cm. Os valores determinados de Ds no VN e CM8 foram de 1,06 e 1,26 g cm⁻³, respectivamente, na camada de 0-10 cm, apresentando um aumento de 18% na Ds do tratamento CM8 em relação a VN. Em contrapartida, o tratamento CM4 apresentou o maior aumento Ds em relação a VN, sendo os valores determinados para Ds no CM4 e VN de 1,5 e 1,0 g cm⁻³, respectivamente, na camada de 0-10 cm, a mudança de uso da terra (VN-CM4) proporcionou aumento de 45,04% na densidade do solo. Os resultados de Ds foram significativamente influenciados na conversão VN-CQ. O valor de Ds variou de 1,41 a 1,50 g cm⁻³ para CQ e de 1,06 a 1,23 g cm⁻³ para VN, sendo os valores de Ds para CQ 33,05 a 17,99% maior que no solo sob VN.

Tabela 5 - Densidade do solo dos locais e nos tratamentos de cana com colheita mecanizada, cana com queima e vegetação nativa, nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-50 cm.

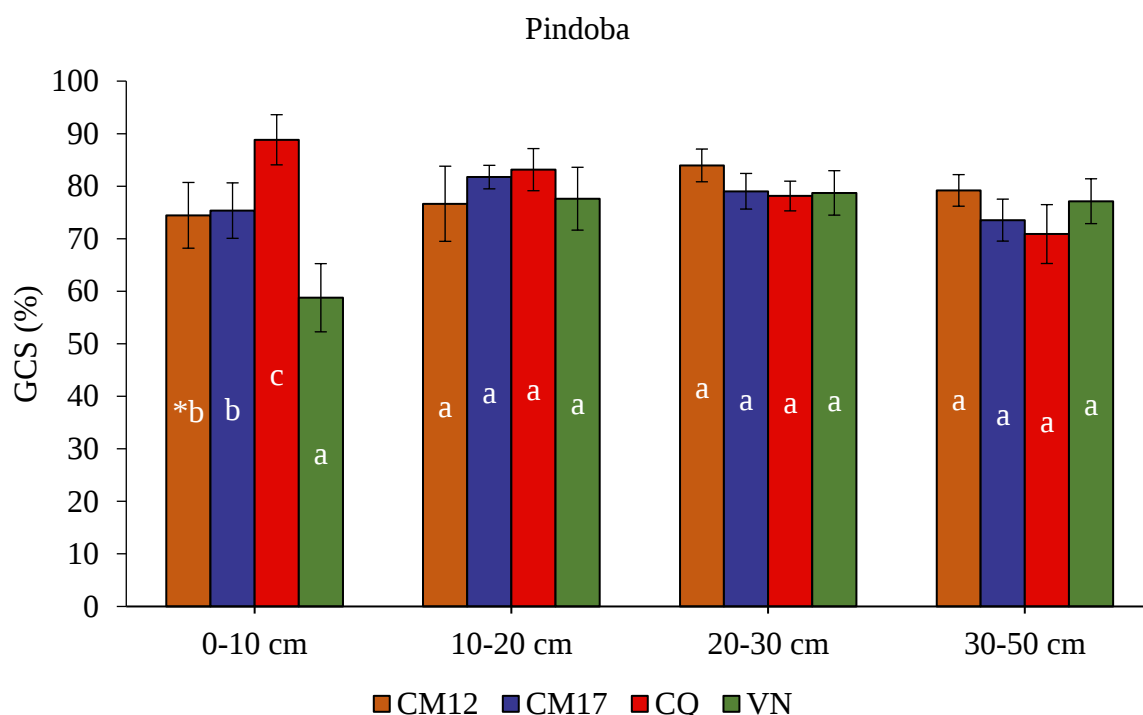
Locais	Pindoba				Santa Isabel				São João			
Camada	CM12	CM17	CQ	VN	CM3	CM9	CQ	VN	CM4	CM8	CQ	VN
(cm)	Densidade (g cm ⁻³)											
0-10	1,38 *bA	1,39 bA	1,61 cB	1,05 aA	1,39 bA	1,42 bA	1,37 bB	1,02 aA	1,54 cA	1,26 abAB	1,41 bcA	1,06 aA
10-20	1,42 aA	1,51 aA	1,48 aAB	1,38 aB	1,50 cAB	1,54 cAB	1,27 bAB	1,09 aA	1,45 abA	1,45 abB	1,48 bA	1,23 aA
20-30	1,56 aA	1,45 aA	1,45 aA	1,45 aB	1,60 bB	1,63 bB	1,24 aAB	1,14 aA	1,38 abA	1,42 abB	1,50 bA	1,22 aA
30-50	1,44 aA	1,35 aA	1,27 aA	1,39 aB	1,49 bAB	1,51 bAB	1,13 aA	1,09 aA	1,33 aA	1,19 aA	1,40 aA	1,11 aA

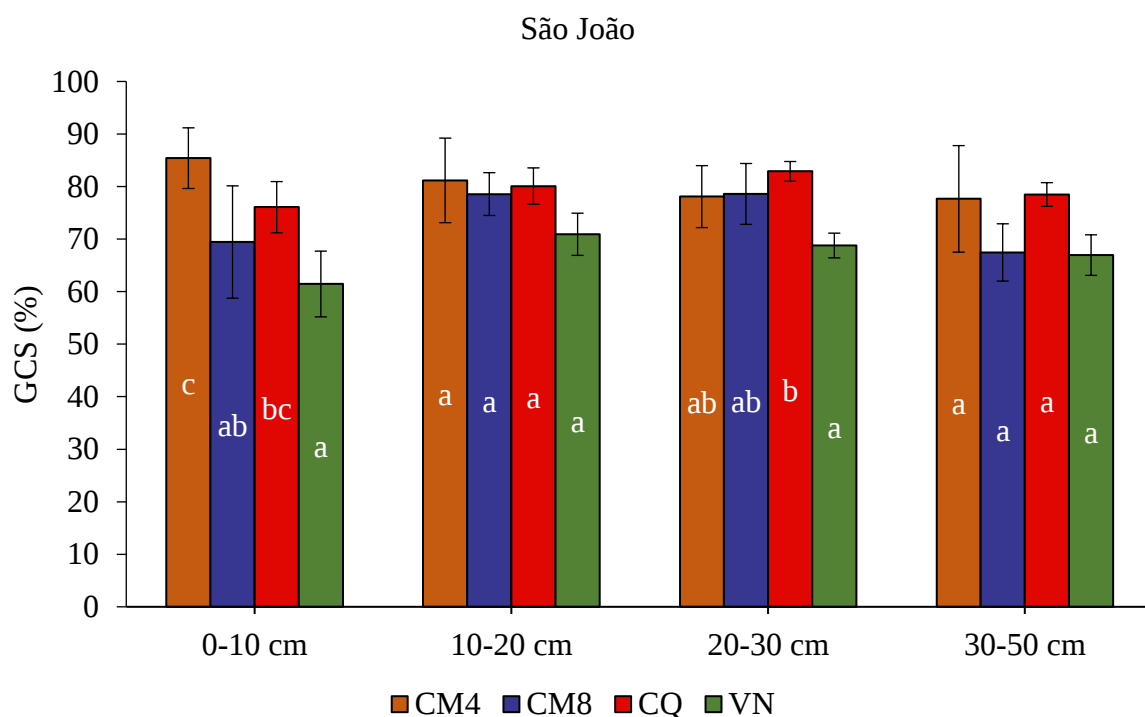
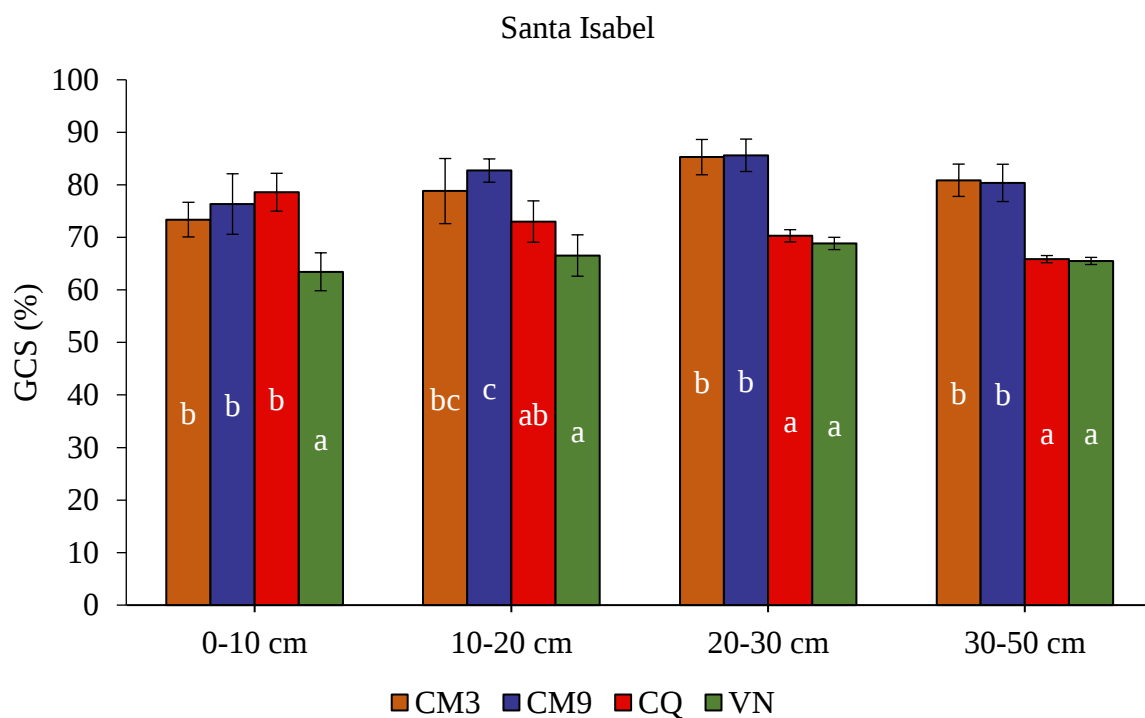
*Médias seguidas de mesma letra minúscula nas linhas e mesma letra maiúscula nas colunas, não se diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade (p<0,05).

Fonte: Autor (2023).

Visando normalizar os limites de densidade do solo, em função da textura e outras propriedades do solo, é utilizado o grau de compactação. De maneira geral, os valores do grau de compactação (GCS) variaram entre 58% e 78% sob vegetação nativa, 65% a 88% sob cana-de-açúcar com queima e 67% a 85% sob cana-de-açúcar com colheita mecanizada (Figura 8). O GCS mostrou uma transição crescente de vegetação nativa para cana-de-açúcar de 8% a 30%, para os três locais do estudo (Pindoba, Santa Isabel e São João) na profundidade de 0-10 cm, apresentando efeito significativo ($p < 0,05$), exceto na fazenda São João, conversão VN-CM8. Nas demais profundidades, a mudança ocasionou redução de 6% até acréscimo de 16%. A conversão de cana-de-açúcar com queima para cana-de-açúcar com colheita mecanizada ocasionou, na maior parte dos casos, transição decrescente do GCS, variando de 2% a 14%, para os três locais do estudo (Pindoba, Santa Isabel e São João) na profundidade de 0-10 cm, exceto a fazenda São João conversão CQ-CM4 que apresentou acréscimo de 9% no GCS. Nas outras profundidades, a fazenda Pindoba apresentou redução de 1% a 6% na camada de 10-20 cm e acréscimo de 1% a 8% nas camadas de 20-30 cm e 30-50 cm. A fazenda Santa Isabel apresentou acréscimo de 5% a 15% nas camadas 10-20, 20-30 e 30-50 cm. A fazenda São João apresentou redução de 1% a 11% nas camadas subsuperficiais (10-20, 20-30 e 30-50 cm), exceto na camada 10-20 cm da conversão CQ-CM4 que apresentou aumento de 1%.

Figura 8 - Índice do grau de compactação do solo dos locais nos tratamentos de cana com colheita mecanizada, cana com queima e vegetação nativa, nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-50 cm.





* Mesma letra minúscula entre os tratamentos na mesma profundidade, não se diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ($p < 0,05$).

Fonte: Autor (2023).

8.5 Mineralização do Carbono

Após 50 dias de incubação da camada 0-10 cm do solo, os resultados para emissão total de C-CO₂ (Tabela 6), mostram que não houve diferença significativa entre os tratamentos da

fazenda Pindoba em relação a mineralização do C do solo. Já na fazenda Santa Isabel, houve diferença ($p < 0,05$) entre a VN e a área com colheita mecanizada com 3 anos (CM3), os valores determinados para VN e CM3 foram de $0,77 \text{ mg C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ solo}$ e $0,55 \text{ mg C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ solo}$, respectivamente, apresentando liberação de C-CO₂ 29,14% menor. Por fim, na fazenda São João, os tratamentos CM4 e CM8 apresentaram as menores taxas de C-CO₂ total respirado, diferenciando dos tratamentos CQ e VN ($p < 0,05$), obtendo uma diferença de até $0,65 \text{ mg C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ solo}$, o que equivale a uma redução de 76%, na comparação VN-CM4.

Tabela 6 - Emissões total de C-CO₂ nos tratamentos de cana com colheita mecanizada, cana com queima e vegetação nativa dos locais, na camada de 0-10 cm, após 50 dias de incubação.

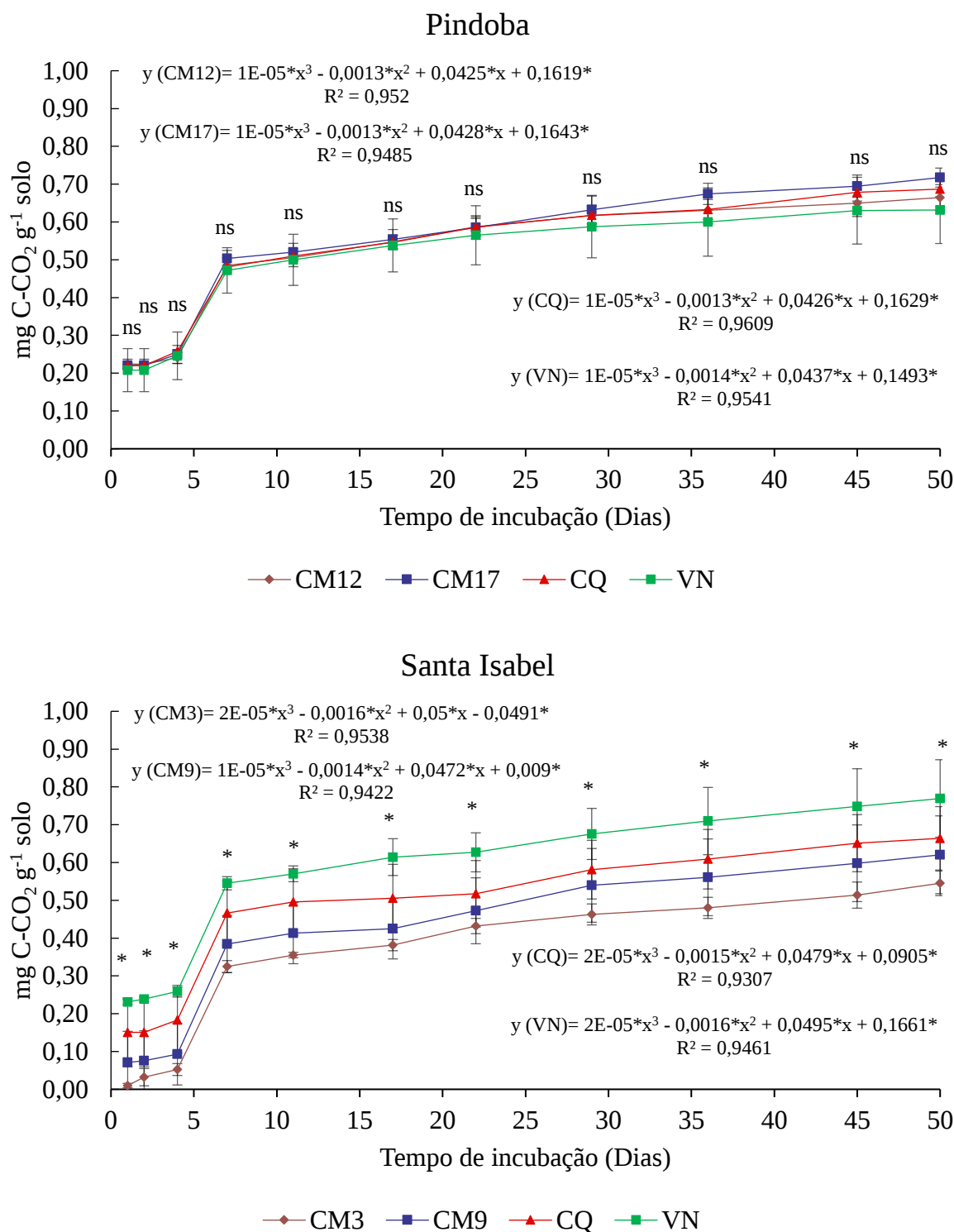
Locais	mg C-CO ₂ g ⁻¹ solo			
Fazenda Pindoba	CM12	CM17	CQ	VN
	0,66 a* $\pm$ 0,03	0,72 a $\pm$ 0,03	0,69 a $\pm$ 0,02	0,63 a $\pm$ 0,09
Fazenda Santa Isabel	CM3	CM9	CQ	VN
	0,55 b $\pm$ 0,03	0,62 ab $\pm$ 0,10	0,66 ab $\pm$ 0,08	0,77 a $\pm$ 0,10
Fazenda São João	CM4	CM8	CQ	VN
	0,19 b $\pm$ 0,05	0,35 b $\pm$ 0,10	0,60 a $\pm$ 0,25	0,84 a $\pm$ 0,08

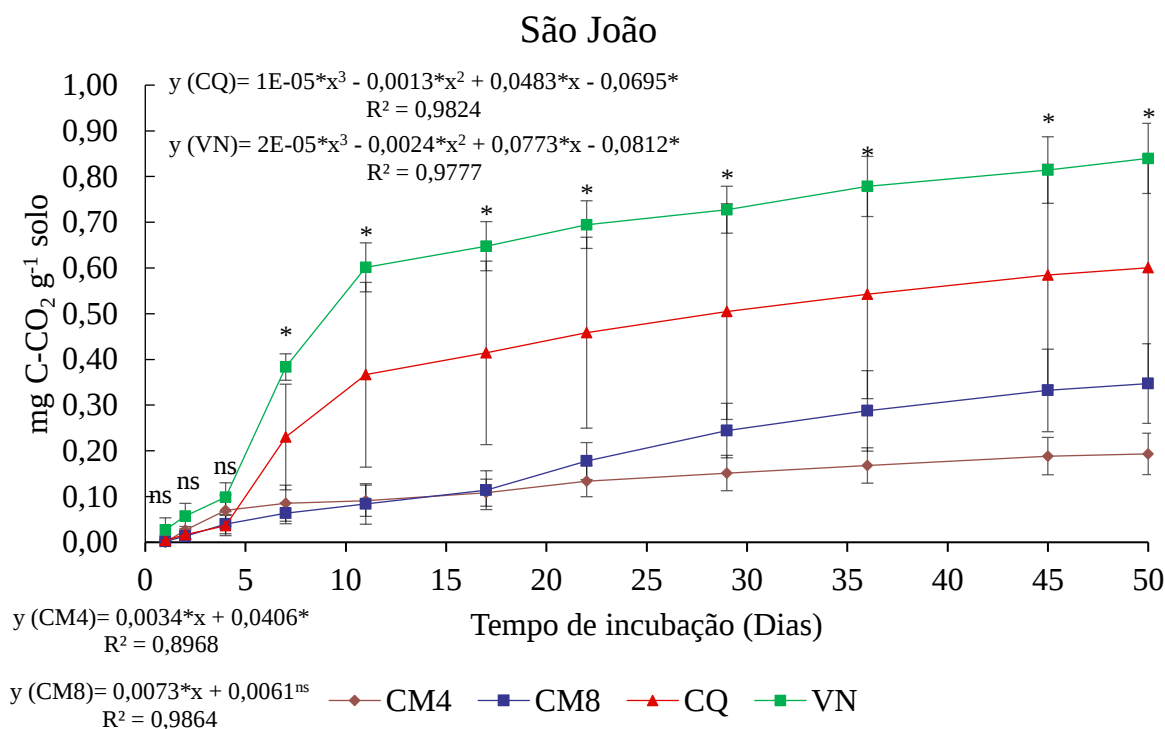
*Médias seguidas de mesma letra nas linhas, não se diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ($p < 0,05$). Número ao lado da média representam o desvio padrão.

Fonte: Autor (2023).

Em relação aos resultados das emissões de C-CO₂ cumulativas, as regressões são adequadas para descrever a relação entre o tempo de incubação e as emissões de C-CO₂ cumulativas, para os tratamentos da fazenda Pindoba (CM17, CM12, CQ e VN), Santa Isabel (CM3, CM9, CQ e VN) e São João (CM4, CM8, CQ e VN). Os tratamentos da fazenda Pindoba (CM17, CM12, CQ e VN) não apresentaram diferença significativa ($p > 0,05$), indicando que a emissão cumulativa de C-CO₂ dos tratamentos não diferiu nos dias de incubação. A fazenda Santa Isabel apresentou diferença significativa entre os tratamentos (CM3, CM9, CQ e VN) em todos os dias de incubação, enquanto a fazenda São João apresentou diferença significativa entre os tratamentos (CM4, CM8, CQ e VN) a partir do 7º dia de incubação. De maneira geral, observa-se nos locais Santa Isabel e São João que as áreas de VN tiveram valores maiores das emissões cumulativas de C-CO₂, e em ambos os casos as áreas de cana com queima vieram em seguida (Figura 9).

Figura 9 - Emissões de C-CO₂ cumulativas nos tratamentos de cana com colheita mecanizada, cana com queima e vegetação nativa dos locais, na camada de 0-10 cm, após 50 dias de incubação.





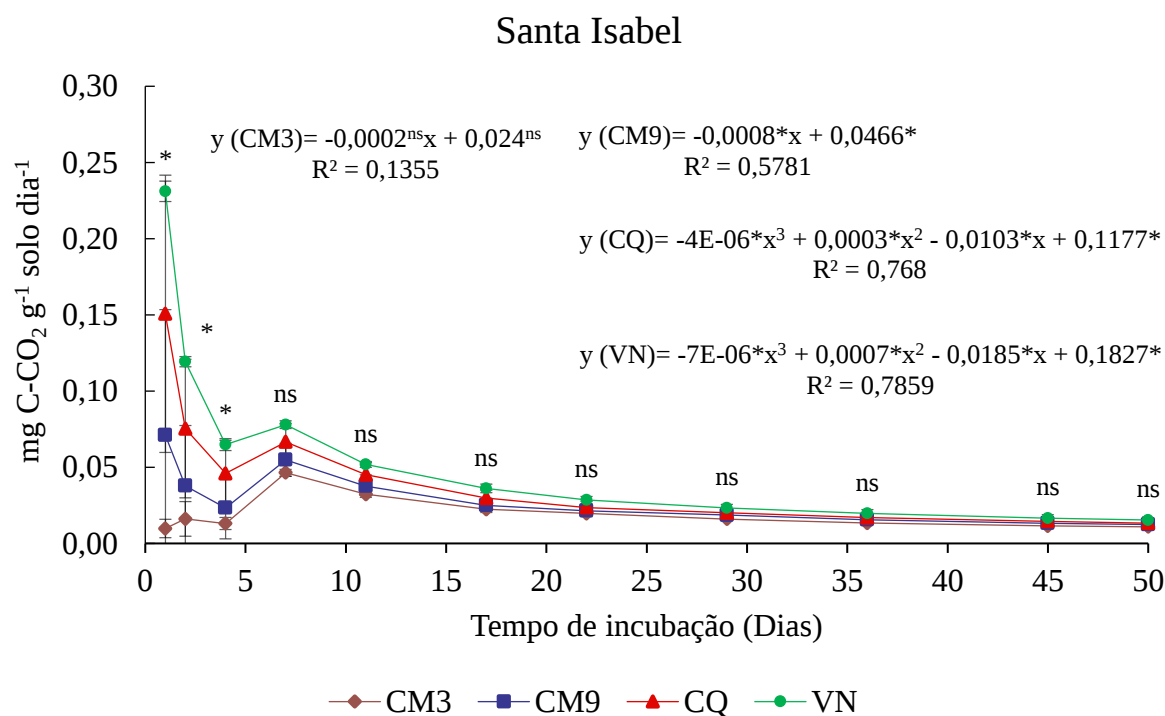
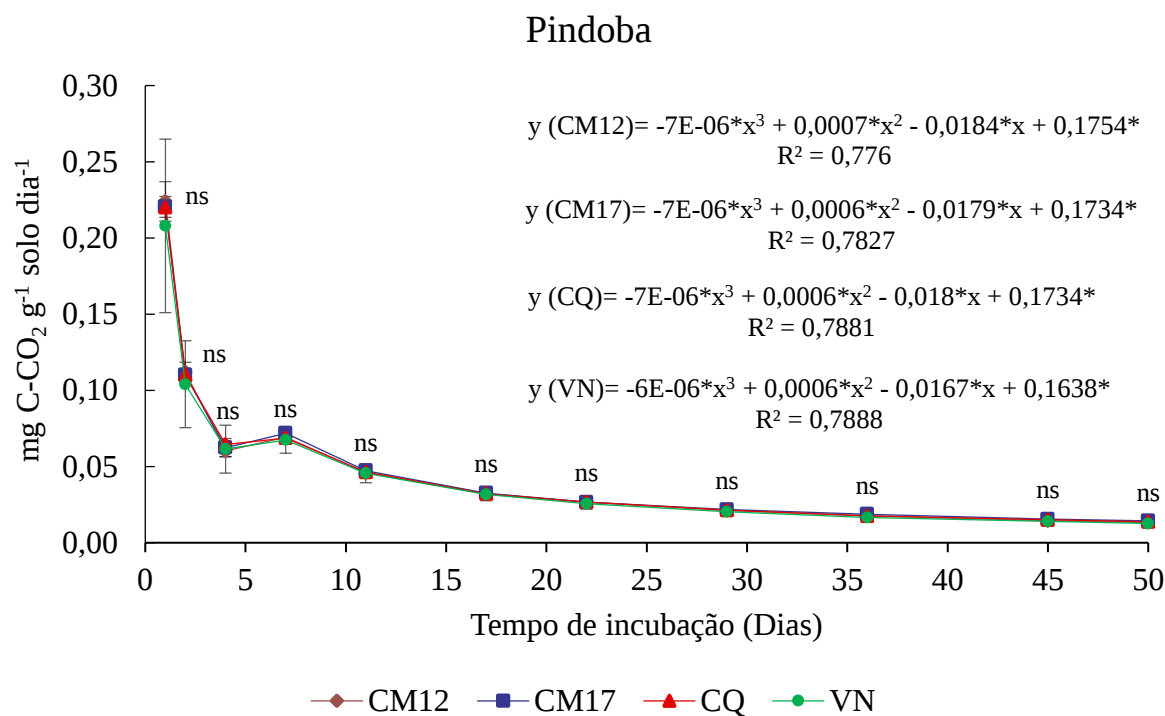
*Apresentam diferenças pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ($p < 0,05$) no dia de incubação. Barras de erro representam o desvio padrão.

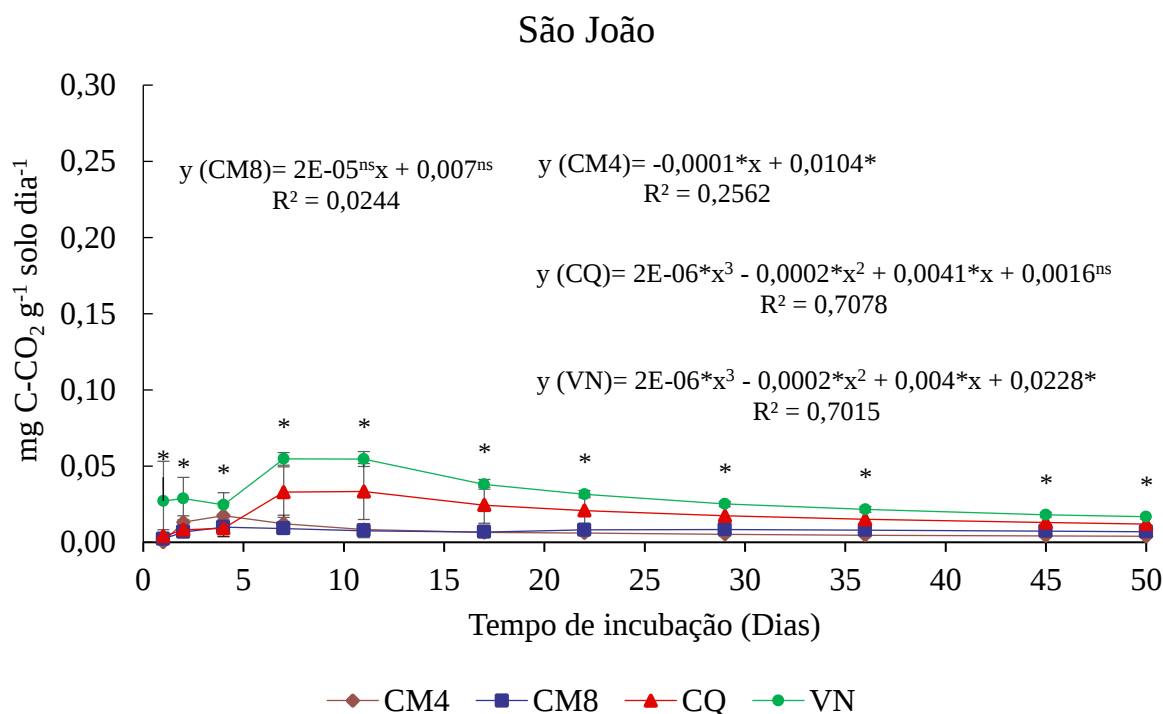
Fonte: Autor (2023).

O resultado da taxa de decomposição relatou que o ajuste de regressão foi adequado para descrever a relação entre o tempo de incubação e as taxas de decomposição do COS nos tratamentos da fazenda Pindoba (CM17, CM12, CQ e VN), fazenda Santa Isabel (CM9, CQ e VN) e fazenda São João (CM4, CQ e VN), portanto, verifica-se que com o decorrer do tempo ocorre uma diminuição da taxa de decomposição do COS. Entretanto, o tratamento CM3 e CM8 não obteve um ajuste adequado, pois, de acordo com o teste F, as médias desse fator são estatisticamente iguais (Figura 10).

Os tratamentos (CM17, CM12, CQ e VN) não apresentaram diferenças estatísticas no período de incubação, apresentando taxa de decomposição de COS próximos durante o decorrer da incubação. Na fazenda Santa Isabel e São João observa-se que os tratamentos que se destacam são VN e CQ, assim como nas emissões cumulativas de C-CO₂, em ambos os casos as áreas de VN apresentaram valores maiores de taxa de decomposição, seguido das áreas de cana com queima, sobretudo nos primeiros dias de incubação (Figura 10).

Figura 10 - Taxas de decomposição do COS nos tratamentos de cana com colheita mecanizada, cana com queima e vegetação nativa dos locais, na camada de 0-10 cm, após 50 dias de incubação.





*Apresentam diferenças pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ($p < 0,05$) no dia de incubação. Barras de erro representam o desvio padrão.

Fonte: Autor (2023).

8.6 Carbono da biomassa microbiana

Os teores de Cmic não apresentaram diferença significativa ($p > 0,05$) entre as profundidades 0-10 e 10-20 cm, bem como entre os diferentes sistemas de colheita. Porém, quando se compara a mudança de uso da terra de vegetação nativa para cultivo de cana-de-açúcar, observa-se diferenças significativas para todos os tratamentos nos três locais ($p < 0,05$), na camada 0-10 cm de profundidade. Essa diferença é mais acentuada na fazenda Santa Isabel, a qual obteve redução de até 0,64 mg Cmic. g⁻¹ solo no tratamento CM3. Na profundidade de 10-20 cm, os locais Santa Isabel e São João apresentaram diferenças significativas na conversão de vegetação nativa para cana-de-açúcar ($p < 0,05$). Em detalhes, os valores de Cmic, na profundidade de 10-20 cm, para os solos sob tratamento CM3, CM9, CQ e VN, da fazenda Santa Isabel, foram de 0,08, 0,11, 0,13 e 0,54 mg Cmic. g⁻¹ solo, respectivamente, os valores de Cmic para os solos sob tratamento CM4, CM8, CQ e VN, da fazenda São João, foram de 0,18, 0,13, 0,11 e 0,34 mg Cmic. g⁻¹ solo (Tabela 7).

Tabela 7 - Teor de C da biomassa microbiana do solo nos tratamentos de cana com colheita mecanizada, cana com queima e vegetação nativa dos locais, na camada de 0-10 e 10-20 cm.

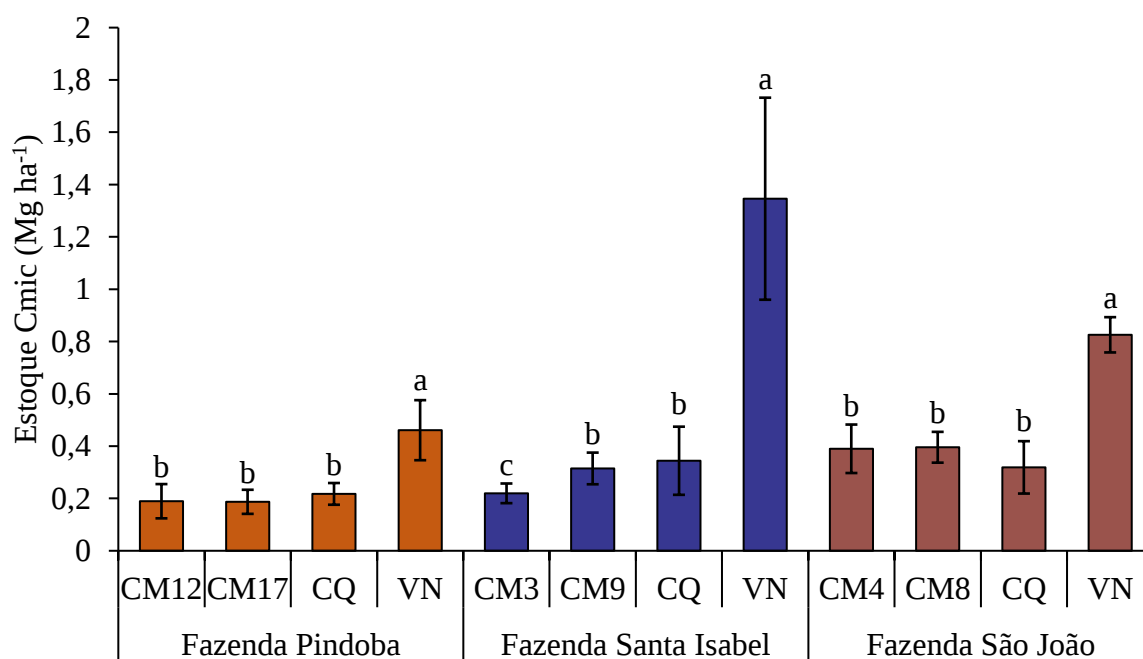
Locais	Pindoba				Santa Isabel				São João			
Camada	CM12	CM17	CQ	VN	CM3	CM9	CQ	VN	CM4	CM8	CQ	VN
(cm)	Cmic (mg Cmic. g⁻¹ solo)											
0-10	0,09 bA*	0,09 bA	0,09 bA	0,25 aA	0,12 bA	0,17 bA	0,18 bA	0,76 aA	0,17 bA	0,21 bA	0,16 bA	0,39 aA
10-20	0,06 aA	0,06 aA	0,09 aA	0,14 aA	0,08 bA	0,11 bA	0,13 bA	0,54 aA	0,18 bA	0,13 bA	0,11 bA	0,34 aA

*Médias seguidas de mesma letra minúscula nas linhas e mesma letra maiúscula nas colunas, não se diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade (p<0,05).

Fonte: Autor (2023).

Os estoques de C da biomassa microbiana não tiveram diferenças significativas entre os tratamentos sob cana-de-açúcar ($p>0,05$), na fazenda Pindoba. Entretanto, para a comparação com a vegetação nativa, essa diferença foi significativa ($p<0,05$), reduzindo em 58, 59 e 52%, nos tratamentos CM12, CM17 e CQ, respectivamente. A fazenda Santa Isabel apresentou as reduções do estoque de Cmic mais relevantes, pois, atingiu valores de 83% de perda para o tratamento CM3, e de 76 e 74% para os tratamentos CM9 e CQ, respectivamente, sendo a única fazenda a apresentar diferença significativa entre os tratamentos sob cana-de-açúcar, CQ-CM3 ($p<0,05$), apresentado uma redução de 36% mesmo quando convertido de colheita com queima para colheita mecanizada. A fazenda São João, apresentou diferença de 0,43, 0,42 e 0,50 Mg ha⁻¹ para CM4, CM8 e CQ, respectivamente, quando comparados com VN ($p<0,05$). Mesmo não apresentando diferenças significativas entre os tratamentos sob cana-de-açúcar, as áreas de cana com colheita mecanizada tiveram um acréscimo médio de 0,07 Mg ha⁻¹ em relação a cana com queima (Figura 11).

Figura 11 - Estoque de C da biomassa microbiana do solo nos tratamentos de cana com colheita mecanizada, cana com queima e vegetação nativa dos locais, na camada de 0-20 cm.



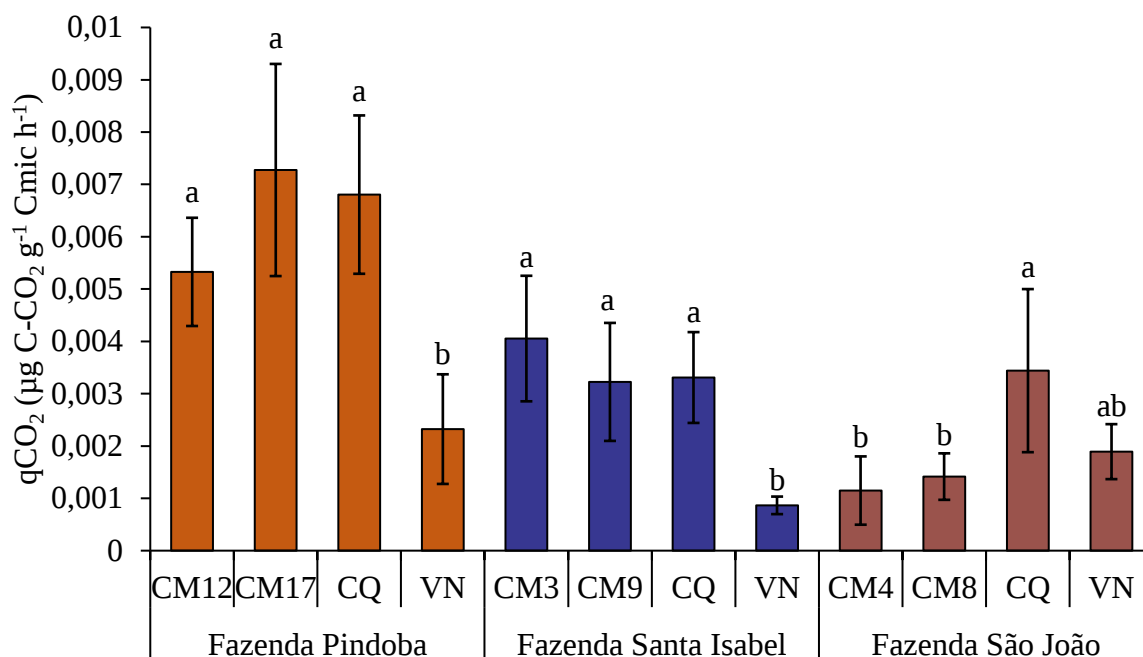
*Mesma letra minúscula acima da barra entre os tratamentos na mesma fazenda, não se diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ($p<0,05$). Barras de erro representam o desvio padrão.

Fonte: Autor (2023).

O qCO₂ variou de 0,007 a 0,002 µg C-CO₂ g⁻¹ Cmic h⁻¹ para a área Pindoba, apresentando diferença significativa dos tratamentos sob cana-de-açúcar em relação a vegetação nativa ($p<0,05$), no qual o tratamento CM17 apresentou o maior valor de quociente

metabólico do solo. A área da fazenda Santa Isabel seguiu o mesmo padrão da fazenda Pindoba, no qual os tratamentos de cana-de-açúcar diferiram significativamente da área de VN. Já a área São João, houve um menor qCO_2 para as áreas de cana mecanizada (CM3 e CM8), aproximadamente $0,001 \mu g \text{ C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ Cmic h}^{-1}$, diferindo de CQ ($p < 0,05$), entretanto não diferiu de VN (Figura 12).

Figura 12 - Quociente metabólico (qCO_2) de solos nos tratamentos de cana com colheita mecanizada, cana com queima e vegetação nativa dos locais, na camada de 0-10 cm.

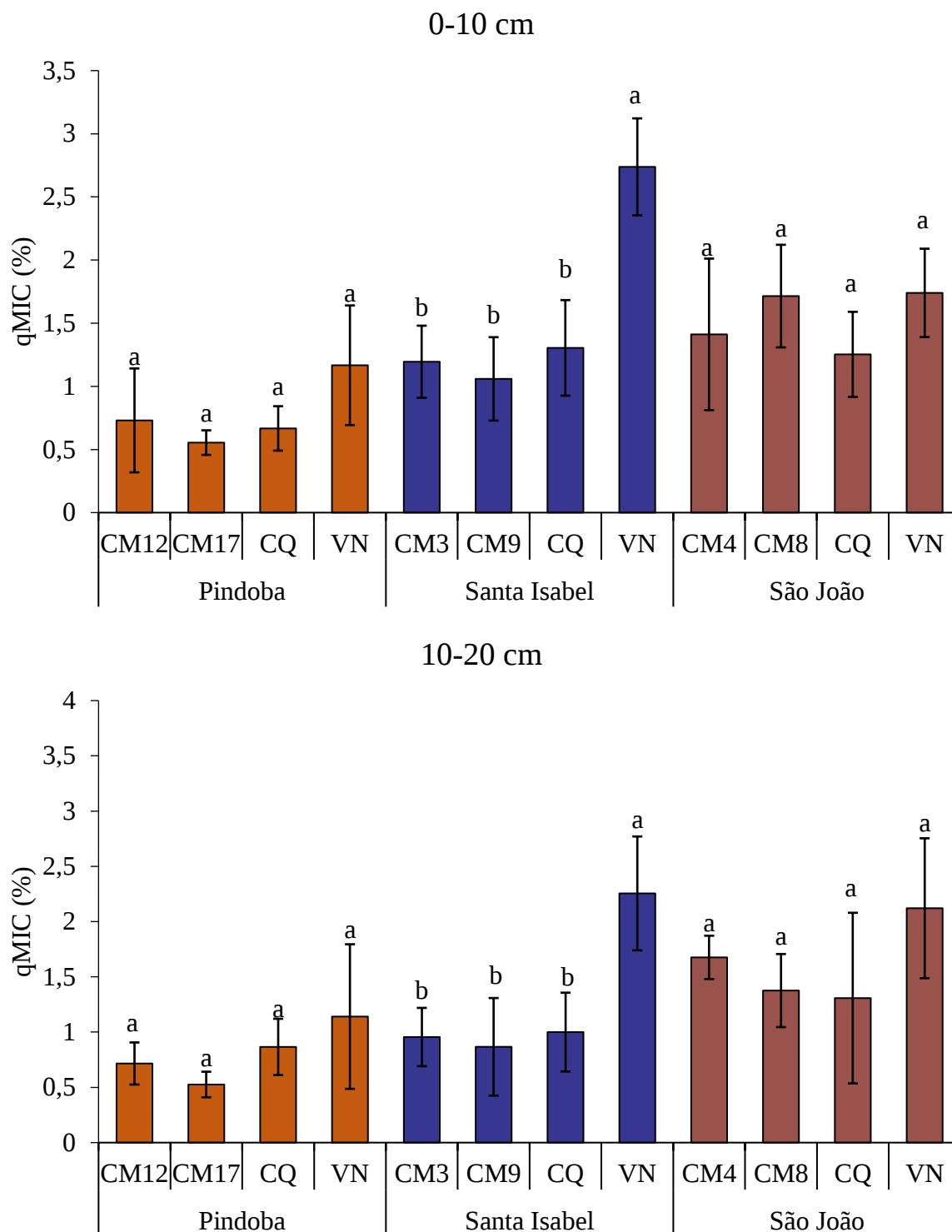


*Mesma letra minúscula acima da barra entre os tratamentos na mesma fazenda, não se diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ($p < 0,05$). Barras de erro representam o desvio padrão.

Fonte: Autor (2023).

Os valores determinados para $qMIC$ (Figura 13) variaram de 0,55 a 1,16% na fazenda Pindoba, e de 1,25 a 1,73% na fazenda São João, na profundidade de 0-10 cm, porém, não apresentaram diferenças significativas ($p > 0,05$). Já a fazenda Santa Isabel, apresentou 2,73% para a área de vegetação nativa, que diferiu estatisticamente de 1,19, 1,05 e 1,30% dos tratamentos CM3, CM9 e CQ, respectivamente ($p < 0,05$). A profundidade 10-20 cm seguiu o mesmo padrão da profundidade 0-10 cm, no qual constatou apenas diferenças significativas na fazenda Santa Isabel, que obteve na VN 2,25%, apresentou um declínio de 57, 61 e 55% nos tratamentos CM3, CM9 e CQ, respectivamente ($p < 0,05$).

Figura 13 - Coeficiente microbiano (qMIC) de solos nos tratamentos de cana com colheita mecanizada, cana com queima e vegetação nativa dos locais, na camada de 0-10 e 10-20 cm.



*Mesma letra minúscula acima da barra entre os tratamentos na mesma fazenda, não se diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ($p < 0,05$). Barras de erro representam o desvio padrão.

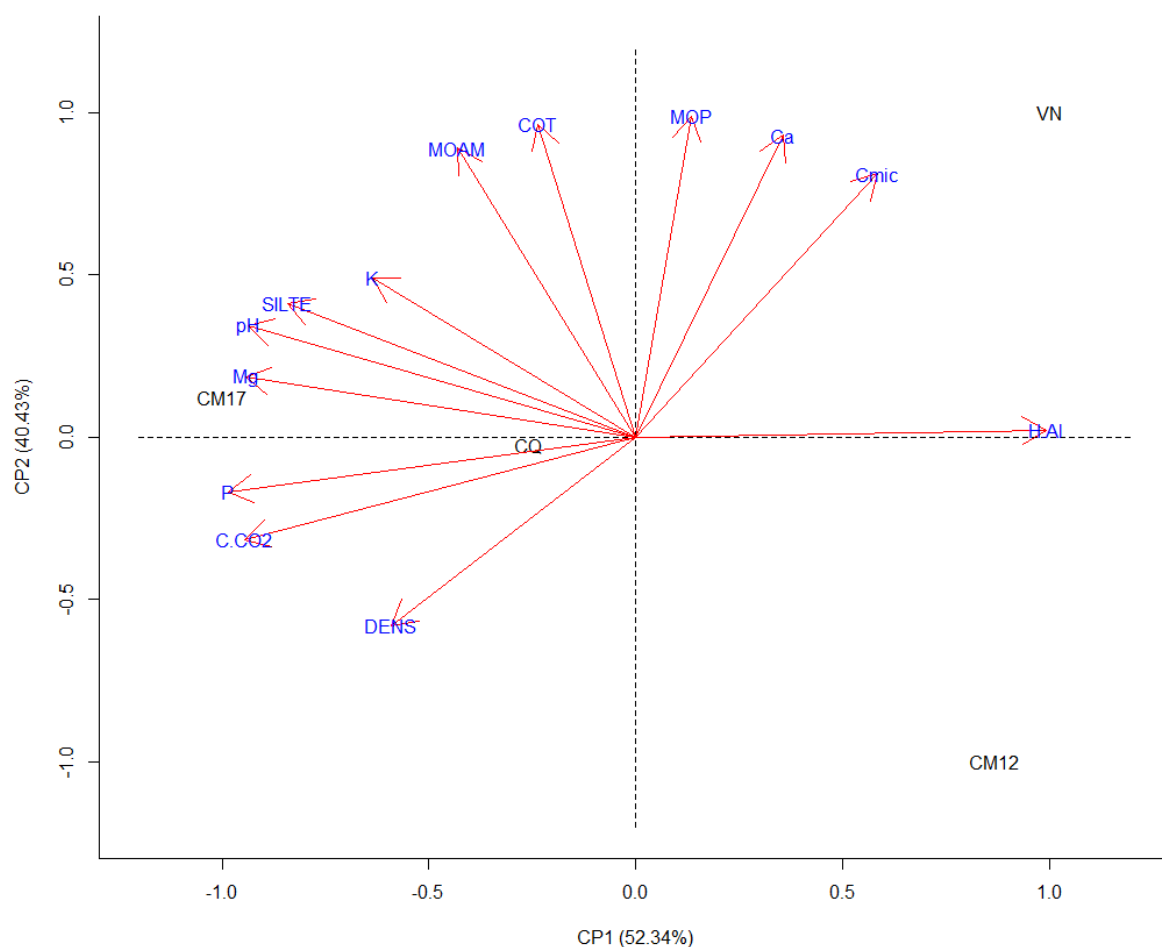
Fonte: Autor (2023).

8.7 Relação dos sistemas de uso da terra com a qualidade do solo

As relações entre os sistemas de uso da terra com as variáveis de estoque de COT, estoque das frações da MOS (MOP e MOAM), densidade do solo (Ds), estoque de carbono da biomassa microbiana (Cmic), mineralização do carbono (C-CO₂), granulometria e atributos químicos do solo (pH, P, K, Ca, Mg e H+Al) são demonstrados pela análise de componentes principais para a fazenda Pindoba (Figura 14), fazenda Santa Isabel (Figura 15) e fazenda São João (Figura 16).

Para a fazenda Pindoba (Figura 14), os dois primeiros componentes principais correspondem a 92,77% da variância dos dados. Nota-se que na camada 0-10 cm a CP1 foi formada por C-CO₂, atributos físicos (Ds e silte) e atributos químicos do solo (pH, P, K, Mg e H+Al), enquanto a CP2 foi representada por variáveis associadas a matéria orgânica (COT, MOP, MOAM e Cmic) e pelo teor de Ca. A CP1 se correlacionou positivamente com os sistemas CM17 e CQ, os quais apresentaram os maiores valores de Ds, C-CO₂, silte, pH, P, K e Mg, e menor valor de H+Al, e correlação negativa com VN e CM12, os quais apresentaram os menores valores destes atributos e maior valor de H+Al, consequentemente apresentaram pH mais ácido, Ds mais baixas e menor respiração microbiana do solo. A CP2 (COT, MOP, MOAM, Cmic e Ca) apresentou correlação positiva com VN e CM17 e negativa com CQ e CM12, as quais proporcionaram os menores valores destes atributos, e por conseguinte as maiores perdas de qualidade do solo. Entretanto o tratamento de colheita mecanizada com 12 anos consecutivos (CM12) foi o que mais se distanciou dos atributos da CP2, apresentando grande correlação negativa com os mesmos, evidenciando as maiores perdas de COT.

Figura 14 - Análise de componentes principais na fazenda Pindoba, camada 0-10 cm.

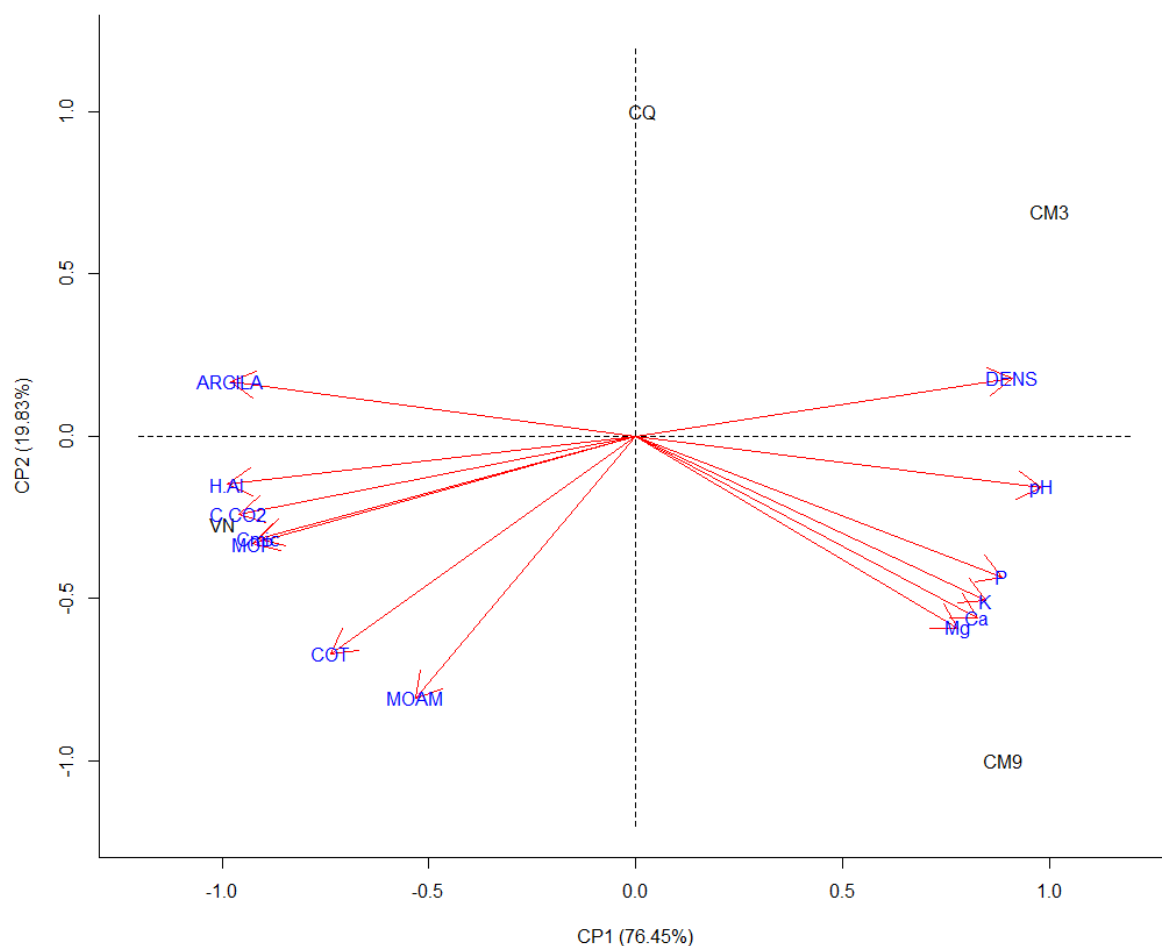


Fonte: Autor (2023).

Em relação a análise da fazenda Santa Isabel (Figura 15), os dois primeiros componentes explicam 96,28% da variância dos dados. Com base nos resultados da ACP, na camada de 0-10 cm a CP1 foi formada por variáveis associadas a matéria orgânica do solo (COT, MOP, C-CO₂, Cmic), atributos físicos do solo (Ds e Argila) e atributos químicos do solo (pH, P, K Ca, Mg e H+Al), enquanto a CP2 foi representada apenas por MOAM. Nota-se que, na camada de 0-10 cm, as variáveis da CP1 (COT, MOP, C-CO₂, Cmic, Argila e H+Al) e CP2 (MOAM) foram as que melhor distinguiram a área de VN dos seus respectivos sistemas agrícolas (CM3, CM9 e CQ), as quais apresentaram os menores valores destes atributos, e consequente as maiores perdas da qualidade do solo. A CP1 (Ds, pH, P, K, Ca e Mg) apresentou correlação positiva com as áreas de cana-de-açúcar (CM3, CM9 e CQ) e negativa com VN, entretanto os maiores valores destes atributos foram apresentados para as áreas de colheita mecanizada (CM3 e CM9), a qual proporcionou Ds maior, pH menos ácido e maiores teores de P, K, Ca e Mg. De

um modo geral, as variáveis da CP1 e CP2 apresentaram baixa correlação entre as variáveis estudadas e o sistema de colheita com prévia despalha a fogo (CQ).

Figura 15 - Análise de componentes principais na fazenda Santa Isabel, camada 0-10 cm.

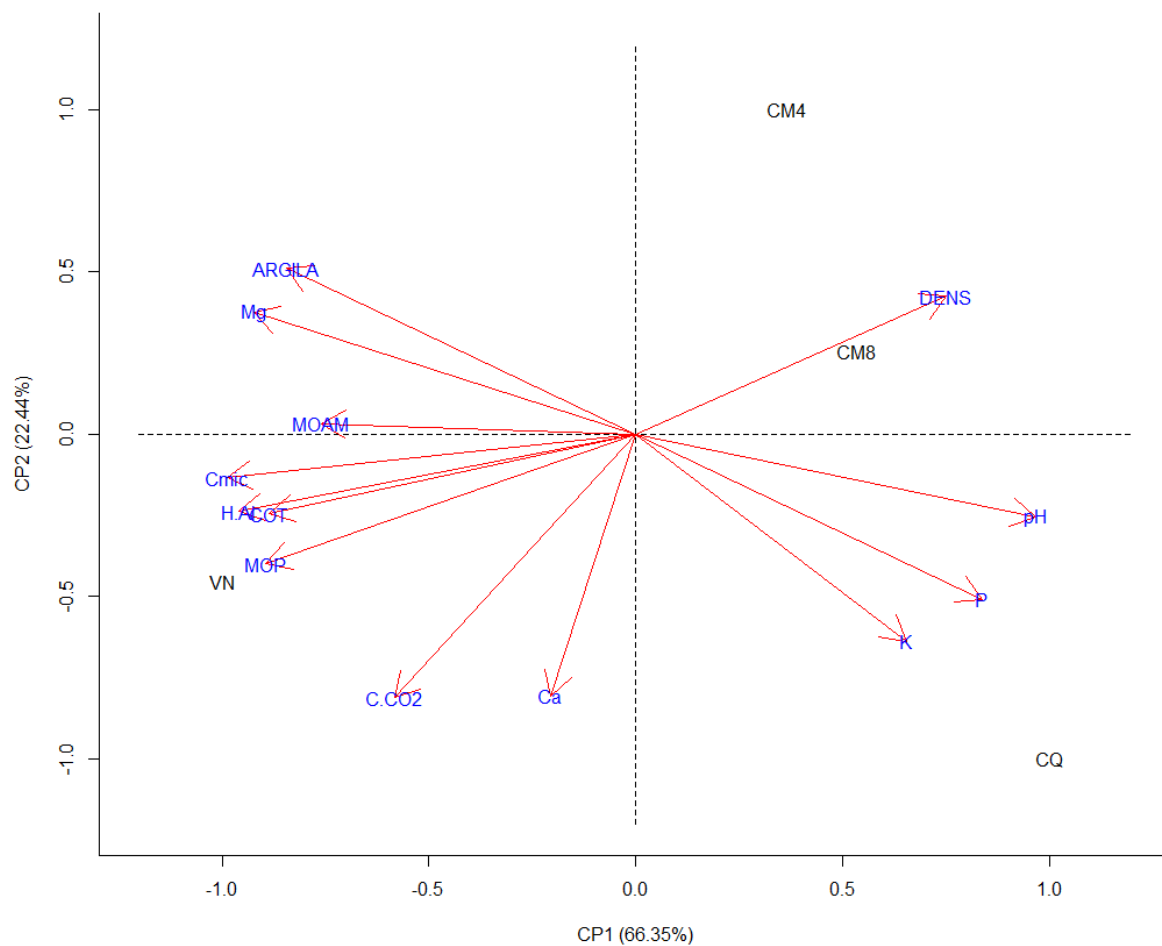


Fonte: Autor (2023).

Por fim, a análise de componentes principais da fazenda São João (Figura 16), mostra que os dois componentes correspondem a 88,79% da variação dos dados. Com base nos resultados da ACP, na camada de 0-10 cm, a CP1 foi constituída por variáveis associadas a matéria orgânica do solo (COT, MOP, MOAM e Cmic), atributos físicos do solo (Ds e argila) e atributos químicos do solo (pH, P, K, Mg e H+Al), enquanto a CP2 foi formada pela mineralização do carbono do solo (C-CO₂) e atributo químico (Ca). Variáveis da CP1 (COT, MOP, MOAM, Cmic, argila, Mg e H+Al) correlacionaram-se com o tratamento VN e as variáveis (Ds, pH, P e K) com os sistemas CM4, CM8 e CQ, positivamente. A CP2 (C-CO₂ e

Ca) apresentou relação negativa com os tratamentos CM4 e CM8, os quais apresentaram solos com menor mineralização do carbono e menor teor de Ca.

Figura 16 - Análise de componentes principais na fazenda São João, camada 0-10 cm.



Fonte: Autor (2023).

9 DISCUSSÃO

9.1 Conteúdo e estoques totais de carbono orgânico do solo

Os resultados para conteúdo e para estoques de carbono orgânico do solo (COS) evidenciaram que a conversão de vegetação nativa para cultivo de cana-de-açúcar resultou em diminuição substancial do COS, e que as mudanças do teor ocorrem com mais ênfase até a profundidade de 20 cm nos locais Pindoba e São João e até a 50 cm na fazenda Santa Isabel. A redução no estoque de C nas áreas sob cana-de-açúcar em comparação com a VN, estão relacionados a diversos fatores, como o revolvimento do solo, principalmente no replantio da cultura (LUCA et al., 2018; CAVALCANTI et al., 2020) e a prática de queima para posterior colheita, que contribui para a perda de carbono orgânico do solo em forma de CO₂ para a atmosfera (ROSSET et al., 2014); diferente das áreas sob vegetação nativa que possui baixa influência antrópica, aporte constante de resíduos vegetais e a formação pela floresta de um microclima que diminui a incidência dos raios solares, das gotas de chuva e reduz a temperatura no solo, preservando assim a matéria orgânica (FRACETTO et al., 2012; MEDEIROS et al., 2018). Os resultados do presente estudo são semelhantes aos de outros (SIGNOR et al., 2016; SATTOLO et al., 2017; SOARES et al., 2022), nos quais, foram observados valores maiores nos teores e estoques de C para áreas sob vegetação nativa.

No presente estudo, as áreas sob colheita mecanizada CM17 (Pindoba), CM9 (Santa Isabel) e CM4 e CM8 (São João) apresentaram estoques de C maior em relação às áreas de cana-de-açúcar sob colheita com prévia despalha a fogo, sobretudo na camada de 0-30 cm, onde verificou ganhos entre 0,54 e 3,11 Mg C ha⁻¹. Esse comportamento ocorreu principalmente devido a distribuição dos resíduos (palhada) da cana-de-açúcar acima do solo, os quais são a principal fonte de C para o solo no sistema canavieiro, e também da entrada de C por meio das raízes, exsudados radiculares e constituintes solúveis das plantas lavados pela chuva (CARVALHO et al., 2017; WEILER et al., 2019; BARROS et al., 2021). Moitinho et al. (2021) analisando o efeito de sistemas de colheita de cana-de-açúcar nos atributos do solo, concluíram que a conversão da colheita com queima para colheita sem queima aumentou os estoques de COS, corroborando com os resultados deste estudo, e, adicionalmente, influencia a preservação da umidade do solo por mais tempo, reduz a taxa de infiltração da água do solo e a expulsão do CO₂ para a atmosfera devido a entrada da água no solo ocorrer de forma mais lenta.

Embora a cana-de-açúcar colhida mecanicamente devolva grandes quantidades de matéria orgânica para o solo (10 a 20 t ha⁻¹ ano⁻¹ de material seco), o carbono orgânico do solo não aumenta rapidamente, pois, em regiões tropicais as perdas de carbono são mais elevadas, sobretudo por causa das condições climáticas (altas temperaturas) da região, que favorecem a

rápida decomposição da matéria orgânica (BLAIR, 2000; SILVA; MACHADO, 2000; VITTI et al., 2008).

Por outro lado, as áreas de cana-de-açúcar com queima apresentaram estoques de C relativamente maiores em relação às áreas com colheita mecanizada CM12 e CM3, dos locais Pindoba e Santa Isabel, comportamento este também observado por outros autores (GALDOS et al., 2009; CERRI et al., 2011; ZANI et al., 2018). Evidencia-se algumas possíveis causas. Nas condições de clima do estado de Alagoas, os benefícios da colheita mecanizada podem ser menores, dado que, a decomposição da MOS é elevada por causa da temperatura máxima ser alta, varia entre 31°C a 35°C, e o menor aporte de resíduo em decorrência da produtividade da região, 62 t ha⁻¹ (BLAIR, 2000; VITTI et al., 2008; CONAB, 2022; INMET, 2023). De acordo com Macedo; Nogueira (2005), a cada tonelada de cana-de-açúcar, são produzidos 140 kg de palhada (matéria seca), a partir da produtividade média em Alagoas, 8,54 t ha⁻¹ ano⁻¹ de material seco fica em campo, comparando com São Paulo, que tem uma produtividade média de 71 t ha⁻¹, a palhada remanescente é de 9,94 t ha⁻¹ ano⁻¹ de material seco (CONAB, 2022). Estas áreas podem ter sido revolvidas para plantio há pouco tempo, e com isto, perdido até 80% do COS anteriormente acumulado (SILVA-OLAYA et al., 2013). Por fim, estas áreas possivelmente foram submetidas a queima em algum período.

Nota-se uma diminuição na quantidade de estoques de C para as áreas com menos anos de conversão, quando comparados os tratamentos sob cana mecanizada. Estes resultados foram semelhantes aos de Signor et al. (2016), que verificaram área sob cana-de-açúcar sem queima por 6 anos apresentou estoque de C menor (12,0 Mg ha⁻¹) em comparação com áreas cultivadas sem queima por 12 anos (14,8 Mg ha⁻¹). Desta forma, os resultados deste estudo mostram que o manejo a longo prazo da palhada, quando bem realizado, promove o acréscimo dos estoques de C do solo.

O IEE é uma relação entre a MOS e a área superficial do adsorvente mineral, argila e silte, o qual, fornece um índice para avaliar o risco de degradação estrutural do solo (PIERI, 1992), sendo assim, está diretamente relacionado com a MOAM, que representa a MOS associada a silte e argila, estando associado aos mecanismos de estabilização do C do complexo organo-mineral. Os resultados mostraram que o cultivo de cana-de-açúcar com queima tem alto risco de degradação do solo, pois, os valores encontrados de IEE variaram de 5,85% e 7,57%, na camada 0-10 cm. Evidenciando que o cultivo de cana-de-açúcar com queima está levando a redução da interação organo-mineral, desta maneira, vai levar a redução da capacidade de retenção de água, aumento da erodibilidade e redução dos macroagregados (CHERUBIN et al., 2016b; HE et al., 2021). Os maiores valores encontrados para cana-de-açúcar com colheita

mecanizada, principalmente CM9, 14,25%, evidenciam o potencial de melhora da qualidade do solo e redução do risco de degradação. Cherubin et al. (2016b), constataram valores entre 4,1% e 7,1% em áreas com cultivo de cana-de-açúcar.

9.2 Fracionamento físico da matéria orgânica do solo

No que se refere às frações da MOS (MOP e MOAM), diversos trabalhos (GALDOS et al., 2009; KUNDE et al., 2018; ROSSET et al., 2021), têm apontado a influência do manejo da cana-de-açúcar no carbono, promovendo uma redução acentuada no C destas frações quando convertido de vegetação nativa, assim como, demonstram que a MOAM é a fração predominante nos diferentes sistemas e camadas do solo avaliados, corroborando com nossos resultados. A maior quantidade de MOAM pode ser explicada pelas diferenças entre as duas frações, principalmente no que diz respeito às taxas de entrada e saída do C nas frações, que sofrem influência dos microrganismos, da matriz mineral do solo e das alterações no uso da terra (LAVALLEE et al., 2020; LOCATELLI et al., 2022).

A diferença mais marcante entre essas duas frações é que a MOP não é protegida da decomposição por meio de associações com os minerais do solo, o que a torna mais acessível aos microrganismos e suas enzimas, principalmente com o revolvimento do solo, enquanto a MOAM é protegida (ZOTARELLI et al., 2007; LAVALLEE et al., 2020). Diante disso, a conservação da MOP se dá por meio da inibição microbiana, enzimática e conservação do meio, enquanto que a MOAM também é controlada por meio da própria associação aos minerais, porém, ambas podem sofrer proteção a curto prazo de agregados (LAVALLEE et al., 2020). Com o revolvimento do solo, a fração MOP fica mais acessível ao ataque microbiano enquanto a MOAM está parcialmente protegida pela associação aos minerais, isso explica a maior perda de C na fração MOP das áreas de cana-de-açúcar, com perdas que variam de 50 a 83% de C da MOP em comparação a VN nas camadas de 0-30 e 0-50 cm, respectivamente.

A contribuição da MOAM varia de 79,56 % a 95,51% nos estoques totais de COS, sendo maior que a participação da fração MOP. Estes resultados corroboram outros trabalhos, em que, apesar da importância da MOP, a contribuição dela para os estoques totais de carbono é menor (GALDOS et al., 2009; LOPES et al., 2017; GMACH et al., 2018; KUNDE et al., 2018; MORAIS et al., 2020). Apesar da menor quantidade em relação a MOAM, a MOP é mais responsiva à mudança e uso da terra, sendo apropriada como um bom indicador dos impactos causados pela mudança e uso da terra (SKJEMSTAD et al., 2006).

Os resultados apresentaram que tanto a mudança de vegetação nativa em cana-de-açúcar, quanto a mudança do sistema de colheita alteraram os estoques de C na MOP nos três

locais em estudo, no qual, o estoque de C da MOP apresentou maior sensibilidade às mudanças do uso da terra em comparação ao estoque de COT, pois apresentou modificações mais extremas. Apesar de menos acentuada, houve alterações nos estoques de C da MOAM, as quais podem ser resultado da redução do estoque de C da MOP, visto que, a utilização dos compostos associados a minerais pelos microrganismos pode ter sido induzida pela redução do estoque de C da MOP (BLAIR et al., 1998; SILVA et al., 2007).

No geral, as áreas com queima apresentaram valores de MOP maiores em comparação às áreas com colheita mecanizada. Rosset et al. (2021), observaram que em áreas com queima a MOP apresentou, na maioria das comparações, maior enriquecimento, comparado com áreas sem queima, corroborando com os resultados do estudo. Este fato pode estar associado a utilização da MOP para a formação da MOAM em um nível mais elevado nas áreas de colheita mecanizada, em decorrência da melhor condição para a atividade da macrofauna do solo, especialmente as minhocas, promovida pela cobertura morta, que contribui para o soterramento e decomposição dos resíduos (RAZAFIMBELO et al., 2006). O enriquecimento das frações mais finas do solo, MOAM, é fundamental para a preservação do COS a longo prazo, visto que esse compartimento tem alto tempo de permanência no solo (LAVALLEE et al., 2020). O armazenamento preferencial nas frações mais finas do solo em sistemas que envolve cobertura morta é apoiado por diversos autores na literatura (BAYER et al., 2001; GRAHAM et al., 2002; RAZAFIMBELO et al., 2006; BESEN et al., 2018).

9.3 Densidade do solo

As áreas sob VN apresentaram os menores valores de densidade em comparação com as áreas sob cana-de-açúcar, principalmente na superfície do solo (até 20 cm). Os resultados corroboram com pesquisas que estudaram o impacto da colheita mecanizada e com prévia despalha a fogo na densidade do solo (SIGNOR et al., 2016; CAVALCANTI et al., 2020). Os maiores valores de densidade do solo são resultantes de áreas intensamente cultivadas, com uso de maquinário agrícola que desestabiliza e reduz a porosidade do solo que, consequentemente, reduz o volume total do solo e aumenta a densidade (ROCHA JUNIOR et al., 2014).

Além disso, para Braidá et al. (2006), o fato de os sistemas sob colheita mecanizada apresentarem menor densidade está relacionado com a quantidade de resíduo vegetal depositada sob a superfície do solo, quanto maior a quantidade de palha sobre o solo menor será o valor de sua densidade, devido a dissipação de energia de pressão gerada pelo uso de maquinário agrícola, dissipando-se até 30% da energia de compactação. Em acréscimo, a densidade radicular da camada superficial do solo, maior teor de matéria orgânica (SOANE, 1990; OTTO

et al., 2011) e a proteção contra o impacto das gotas de chuvas fornecida pela palhada (LUCA et al., 2008) pode ter sido favorável a redução da compactação do solo, principalmente na superfície.

Em contrapartida, as áreas CM3, CM9 (Santa Isabel) e CM4 (São João) apresentaram densidade maior que as áreas de CQ. Nas áreas CM3 e CM9 o aumento é constatado até a camada 30-50 cm e CM4 até a camada 0-10 cm. A compactação do solo em canaviais com colheita mecanizada devido ao intenso tráfego de máquinas é sustentada na literatura (LUCA et al., 2008; SOUZA et al., 2015; TAVARES et al., 2018; MOITINHO et al., 2021). De acordo com Cherubin et al. (2016b), os tratores, carretas e colheitadeiras usadas para realizar as operações nos canaviais exercem forças compressivas ao solo, causando redução do espaço poroso e aumentando a resistência do solo. Souza et al. (2014) em estudo sobre o controle do tráfego em canaviais, constataram que quando aplicado o sistema de gerenciamento houve maior densidade do solo na entrelinha (1,30 a 1,35 g cm⁻³) em comparação com a linha de plantio (1,10 a 1,17 g cm⁻³), isto ocorreu por decorrência da maior precisão dos tratores em permanecer na entrelinha, preservando assim a qualidade física do solo no canteiro da planta, mostrando que no lugar onde ocorre tráfego de máquinas agrícolas tem-se incremento de densidade do solo.

Sabendo que a densidade do solo ideal para o crescimento da cultura varia consideravelmente entre os solos, o intuito do GCS é fornecer uma avaliação mais robusta da compactação do solo, relacionando a densidade do solo a composição de minerais e a MOS (CHERUBIN et al., 2016b). Normalmente o valor ótimo de GCS encontra-se entre 80 e 90% (REICHERT et al., 2009). Os valores apresentados neste trabalho estão de acordo com os considerados ótimo pela literatura, também sugerem que apenas o tratamento CQ da fazenda Pindoba, camada de 0-10 cm, está próximo do limite superior, com 88%. Cherubin et al. (2016b) encontraram valores de GCS para solos sob cultivo de cana-de-açúcar entre 74% e 100%.

9.4 Atributos biológicos do solo

As bactérias e fungos estão entre os responsáveis pela liberação de CO₂, via degradação da matéria orgânica do solo (SILVA et al., 2007). A mineralização do carbono é definida como a soma de todas as funções metabólicas nas quais o CO₂ é produzido e por ser sensível às variações de temperatura, manejo, umidade e qualidade dos resíduos, é considerado um bom indicador de qualidade do solo (SILVA et al., 2007; BARBIERI et al., 2019). Assim, as taxas de mineralização do carbono podem ser interpretadas como um fator positivo ou negativo. Por

exemplo, altas taxas podem ser consideradas desejáveis quando se considera a liberação de nutrientes para as plantas ou o equilíbrio do ecossistema, e indesejáveis quando implica em decomposição mais acelerada da matéria orgânica do solo, oxidação de materiais orgânicos a partir da quebra de agregados pela ação humana ou em resposta a adição de resíduos orgânico (MAIA et al., 2007; NOVAK et al., 2022).

A elevada atividade microbiana indicada pelo conteúdo de C-CO₂, encontrada nas áreas de VN dos locais Santa Isabel e São João, pode ser resultado da maior reserva de MOP na camada 0-10 cm (Apêndice C), o qual é constituído de compostos orgânicos de fácil degradação. As áreas de cana com colheita mecanizada CM4 e CM8 apresentaram a menor atividade microbiana entre todas as áreas estudadas, indicando maior eficiência da biomassa microbiana, resultando em menores perdas para a atmosfera (BAZZO et al., 2018). Por outro lado, às demais áreas sob cana-de-açúcar tem maior atividade microbiana, o que pode ser indicativo de um estado de equilíbrio da matéria orgânica do solo ou estresse na biomassa microbiana do solo causada pela ação humana (MAIA et al., 2007). Vale ressaltar que a mineralização do C é melhor analisada quando consideramos os valores de qCO₂, pois consegue-se estimar a eficiência do uso de substrato pelos microrganismos do solo, estabilidade do sistema e presença de estresse metabólico (SILVA et al., 2007; NOVAK et al., 2022).

A razão entre a mineralização do carbono por unidade de C_{mic} e tempo (qCO₂) é utilizada para se avaliar a eficiência do uso de substratos pela comunidade microbiana do solo, onde condições ambientais estressantes resulta em valores mais elevados, necessitando mais carbono para a manutenção da biomassa microbiana, e, podendo ser utilizada como excelente indicador de estresse da comunidade microbiana (ANDERSON; DOMSCH, 1993; SILVA et al., 2007). O qCO₂ mostra que a maior eficiência no uso de substratos pela comunidade microbiana é encontrada na área de VN, representado pelo baixo valor de qCO₂ para os tratamentos de VN. Isto pode ser explicado pelo aporte de material orgânica de diversas origens, o qual favorece o aproveitamento mais eficiente da matéria orgânica do solo pelo microrganismo do solo (MAIA et al., 2007). Os menores valores para CM4 e CM8 evidenciam o potencial de menor perturbação do meio onde a colheita mecanizada foi realizada. Paredes Junior et al. (2015) constataram maior perturbação no ambiente onde tem queima para posterior colheita.

De forma geral, a taxa de emissão de C-CO₂ foi maior até o 11º dia de incubação, após isso as taxas de liberação foram menos acentuadas. Isto se deve, a rápida multiplicação exponencial dos microrganismos em resposta a quantidade de substrato presente no solo (MUTABARUKA et al., 2007). Por outro lado, os tratamentos CM4 e CM8 da fazenda São

João apresentaram taxas de emissões de C-CO₂ mais constantes no decorrer da incubação. Esse fato pode estar relacionado com a participação do carbono recalcitrante (CR) na decomposição do COS, no qual o aumento da contribuição do CR diminui as taxas de decomposição (MAIA et al., 2019). Como essas duas áreas apresentaram os menores teores de MOP (Apêndice C), a contribuição do CR na decomposição é maior, reduzindo e estabilizando a decomposição.

Em relação às taxas de decomposição, no geral a fazenda Pindoba e Santa Isabel apresentaram rápida diminuição da taxa no dia 17 e permanecendo constante até o fim da incubação. A rápida queda nas taxas de decomposição também foi encontrada em outros estudos (WHITE; WEBBER, 2018; RAHMAN et al., 2022). A redução e estabilização da emissão de CO₂ ao decorrer da incubação se deve ao fato do esgotamento gradual do compartimento de carbono lábil do solo, que estava prontamente disponível para os microrganismos do solo no início da incubação, e, como as amostras de solo foram removidas do sistema solo-planta, não ocorreu reposição do compartimento lábil após a rápida decomposição (XU et al., 2010; EL-NAGGAR et al., 2015; MAIA et al., 2019). De outro modo, a taxa de decomposição da fazenda São João e tratamento CM3 não apresentaram liberação acelerada no início da incubação. Métodos que medem atividade biológica podem necessitar do restabelecimento da microbiota do solo, principalmente se as amostras de solo foram armazenadas por longos períodos (MENDONÇA; MATOS, 2017). A liberação reduzida no início da incubação pode estar associada com a necessidade de um período maior, antes da primeira titulação, para que ocorra a recuperação da microbiota do solo.

Por ser sensível às mudanças de uso da terra, de forma positiva ou negativa, a biomassa microbiana do solo responde rapidamente ao manejo ou mudanças do uso da terra, consequentemente é indicada como medida para avaliar as mudanças na qualidade do solo (FRANCHINI et al., 2007; HUNGRIA et al., 2009). No presente estudo, o teor e estoque da biomassa microbiana do solo foram reduzidos na conversão da vegetação nativa em cultivo de cana-de-açúcar. Galdos et al. (2009) encontraram resultados semelhantes, nos quais foram observados maiores teores de C_{mic} em solos sob vegetação nativa em comparação com cultivo de cana-de-açúcar. No entanto, Czczyca (2009), em estudo sobre a MOS em sistemas de colheita de cana-de-açúcar nas estações seca e úmida, não encontrou diferenças significativas entre as áreas sob VN e áreas de cana-de-açúcar com e sem queima da palhada na estação seca, atribuindo esse fato a decorrência da baixa umidade do solo.

A conversão de cana com queima para cana sem queima proporcionou aumento de C_{mic} na fazenda São João e redução nos locais Pindoba e Santa Isabel. A quantidade da biomassa microbiana do solo pode ter sido influenciada pela mudança de uso da terra, mudança de

sistemas agrícolas, quantidade de matéria orgânica, temperatura e umidade (SANTOS et al., 2012; FERREIRA et al., 2016; ČAPEK et al., 2019; TIWARI et al., 2019).

A porcentagem de Cmic no carbono orgânico total (qMIC) tem sido utilizado como um indicador de qualidade do solo e por sua vez, normalmente encontra-se valores variando de 1% a 4% (SPARLING, 1992; BASTIDA et al., 2008). Os valores descritos neste trabalho para os locais Santa Isabel e São João estão de acordo com os encontrados na literatura, entretanto, os valores da fazenda Pindoba foram inferiores nos tratamentos de cana-de-açúcar, camada 0-10 cm. Abbruzzini (2011) comparando sistemas de produção de cana-de-açúcar reportou valores de qMIC de 0,9% a 2,3%. Essa diferença entre os sistemas pode ser explicada pelo fato de o Cmic ser um compartimento mais lábil, e quando tem alterações no solo ele é perdido primeiro, isso ocorre na conversão de vegetação nativa para cana-de-açúcar e nos diferentes manejos de cana-de-açúcar (GALDOS et al., 2009).

9.5 Análise de componentes principais

A análise de componentes principais, tem como finalidade analisar diversas variáveis dependentes e que geralmente são inter-relacionadas, com o objetivo de extrair e expressar o padrão de similaridade das observações, classificando-os em grupos mais ou menos homogêneos (ABDI; WILLIAMS, 2010).

No presente estudo, as áreas sob vegetação nativa se correlacionaram fortemente com as variáveis associadas à matéria orgânica do solo, sobretudo com a biomassa microbiana do solo e matéria orgânica particulada. Este comportamento está associado ao grande aporte de material orgânico ao solo e a não perturbação do sistema (ROSSET et al., 2014). Estes resultados corroboram estudos diversos, nos quais, as áreas de vegetação nativa apresentaram estoques de C orgânico maiores em relação às áreas sob cultivo. Por exemplo, Kunde et al. (2016) encontraram estoques de MOP na ordem de 2,16 e 7,60 Mg ha⁻¹ para as áreas de cana-de-açúcar e vegetação nativa, respectivamente, enquanto Sant'anna et al. (2009) constataram que áreas sob vegetação nativa apresentaram carbono da biomassa microbiana maior que áreas agrícolas com cana-de-açúcar.

Com os resultados da análise de componentes principais, também foi possível identificar a relação entre as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo e os sistemas de manejo (com queima, sem queima e vegetação nativa). Os atributos do solo serviram como indicadores da diferença entre os ambientes, porém, a densidade do solo e os atributos associados à MOS, como carbono da biomassa microbiana e matéria orgânica particulada, foram mais eficientes na separação desses sistemas, podendo servir como indicador da qualidade do solo. Na literatura

existe alguns estudos que corroboram com o fato dos estoques de C do solo, carbono da biomassa microbiana, matéria orgânica particulada e densidade são bons indicadores de qualidade do solo (ALVES et al., 2007; MAIA et al., 2007, 2010a, 2010b; SANT'ANNA et al., 2009; CHERUBIN et al., 2016a; OLIVEIRA et al., 2016; MORAIS et al., 2020).

10 CONCLUSÃO

A conversão de vegetação nativa em áreas de cultivo de cana-de-açúcar, independente do sistema de colheita, reduziu a qualidade do solo devido a perdas de propriedades importantes do solo, tais como, carbono orgânico total, C da matéria orgânica particulada, aumento da densidade do solo, redução da biomassa microbiana do solo, as quais são corroboradas pelos resultados de índices, como por exemplo, elevados valores do quociente metabólico (qCO_2), e grau de compactação do solo (GCS), e menores valores do Índice de Estabilidade Estrutural (IEE).

O sistema com colheita mecanizada apresentou resultados melhores que o sistema com queima, pois apresentou melhoria nas propriedades do solo, tais como, aumento do estoque de COS e do C da MOP, redução da densidade e aumento da biomassa microbiana. Os índices validam esses resultados, encontra-se valores menores do quociente metabólicos (qCO_2) e grau de compactação do solo (GCS) e valores maiores do Índice de Estabilidade Estrutural (IEE). Entretanto, não foi um consenso, algumas áreas com colheita mecanizada nos locais selecionados em Alagoas mostraram propriedades do solo mais prejudicadas.

A análise de componentes principais contribuiu para confirmar a diferença entre a vegetação nativa e os sistemas de cultivo de cana-de-açúcar, bem como, a diferença entre os sistemas de cultivo. Os atributos do solo indicaram diferenças entre os tratamentos, porém, a densidade, estoques de COS, carbono da biomassa microbiana e a matéria orgânica particulada, foram mais eficientes na separação desses sistemas. Para os três locais, a biomassa microbiana e a matéria orgânica particulada estão relacionadas principalmente com a vegetação nativa.

REFERÊNCIAS

- ABBRUZZINI, T. F. **Qualidade e quantidade da matéria orgânica do solo em cultivo convencional e orgânico de cana-de-açúcar**. Dissertação—Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2011.
- ABDI, H.; WILLIAMS, L. J. Principal component analysis. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics**, v. 2, n. 4, p. 433–459, 2010.
- ALVES, M. C.; SUZUKI, L. G. A. S.; SUZUKI, L. E. A. S. Densidade do solo e infiltração de água como indicadores da qualidade física de um Latossolo Vermelho distrófico em recuperação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 4, p. 617–625, 2007.
- ANDERSON, T.; DOMSCH, K. The metabolic quotient for CO₂ (qCO₂) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 25, n. 3, p. 393–395, 1993.
- ARAÚJO, A. O. et al. Modificações nas propriedades dos solos de uma área de manejo florestal na Chapada do Araripe. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 3, p. 754–762, 2013.
- BARBIERI, M. et al. Ensaio sobre a bioatividade do solo sob plantio direto em sucessão e rotação de culturas de inverno e verão. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 42, n. 1, p. 122–134, 2019.
- BARROS, D. R. S. et al. Effect of sugarcane harvesting systems on soil organic matter in northeastern region of Brazil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 52, n. 14, p. 1657–1668, 2021.
- BASTIDA, F. et al. Past, present and future of soil quality indices: A biological perspective. **Geoderma**, v. 147, n. 3–4, p. 159–171, 2008.
- BAYER, C. et al. Changes in soil organic matter fractions under subtropical no-till cropping systems. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, n. 5, p. 1473–1478, 2001.
- BAZZO, J. C. et al. **Biomassa e atividade microbiana do solo em diferentes fitofisionomias no pantanal da Nhecolândia, MS, Brasil**. 1. ed. Corumbá, MS: EMBRAPA, 2018.
- BESSEN, M. et al. Soil conservation practices and greenhouse gases emissions in Brazil. **Scientia Agropecuaria**, v. 9, n. 3, p. 429–439, 2018.
- BLAIR, G. J. et al. Soil carbon changes resulting from sugarcane trash management at two locations in Queensland, Australia, and in North-East Brazil. **Australian Journal of Soil Research**, 1998.
- BLAIR, N. Impact of cultivation and sugar-cane green trash management on carbon fractions and aggregate stability for a Chromic Luvisol in Queensland, Australia. **Soil and Tillage Research**, v. 55, n. 3–4, p. 183–191, 2000.

BRAIDA, J. A. et al. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio proctor. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 4, p. 605–614, 2006.

BRAUNBECK, O. A.; OLIVEIRA, J. T. A. Colheita de cana-de-açúcar com auxílio mecânico. **Engenharia Agrícola**, v. 26, n. 1, p. 300–308, 2006.

CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, n. 3, p. 777–783, 1992.

ČAPEK, P. et al. Apparent temperature sensitivity of soil respiration can result from temperature driven changes in microbial biomass. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 135, p. 286–293, 2019.

CARVALHO, J. L. N. et al. Contribution of above- and belowground bioenergy crop residues to soil carbon. **GCB Bioenergy**, v. 9, n. 8, p. 1333–1343, 2017.

CAVALCANTI, R. Q. et al. Soil physical changes induced by sugarcane cultivation in the Atlantic Forest biome, northeastern Brazil. **Geoderma**, v. 370, p. 114353, 2020.

CERRI, C. C. et al. Effect of sugarcane harvesting systems on soil carbon stocks in Brazil: an examination of existing data. **European Journal of Soil Science**, v. 62, n. 1, p. 23–28, 2011.

CHERUBIN, M. R. et al. Phosphorus pools responses to land-use change for sugarcane expansion in weathered Brazilian soils. **Geoderma**, v. 265, p. 27–38, 2016a.

CHERUBIN, M. R. et al. Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil. **Geoderma**, v. 267, p. 156–168, 2016b.

CONAB. **Cana-de-açúcar: acompanhamento da safra brasileira 2022/2023, 2º levantamento**. Brasília, DF: COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2022.

CURL, E. A.; RODRIGUEZ-KABANA, R. Microbial interactions. In: WILKINSON, R.E., ed Research methods in weed science. **Atlanta, Southern Weed Science Society**, p. 162–194, 1972.

CZYCZA, R. V. **Quantidade e qualidade da matéria orgânica do solo em sistemas de colheita com e sem queima da cana-de-açúcar**. Dissertação—Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2009.

EL-NAGGAR, A. H. et al. Carbon mineralization and nutrient availability in calcareous sandy soils amended with woody waste biochar. **Chemosphere**, v. 138, p. 67–73, 2015.

EMBRAPA. **Avaliação da Aptidão Agrícola das Terras do Médio Alto Curso do Rio Grande (RJ): Subsídios ao Planejamento de Paisagens Rurais Montanhosas da Serra do Mar**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2012.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. Brasília: Embrapa, 2017.

- FARIAS, P. G. da S. et al. Physical fractions of organic matter and mineralizable soil carbon as quality indicators in areas under different forms of use in the Cerrado-Pantanal Ecotone. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 194, n. 7, p. 517, 2022.
- FERREIRA, A. C. C. et al. Land-Use Type Effects on Soil Organic Carbon and Microbial Properties in a Semi-arid Region of Northeast Brazil. **Land Degradation & Development**, v. 27, n. 2, p. 171–178, 2016.
- FONTANA, A. et al. Avaliação dos compartimentos da matéria orgânica em área de Mata Atlântica. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 33, n. 3, p. 545–550, 2011.
- FRACETTO, F. J. C. et al. Estoques de carbono e nitrogênio no solo cultivado com mamona na Caatinga. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 5, p. 1545–1552, 2012.
- FRANCHINI, J. et al. Microbiological parameters as indicators of soil quality under various soil management and crop rotation systems in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 92, n. 1–2, p. 18–29, 2007.
- FRANCO, A. L. C. et al. Soil carbon, nitrogen and phosphorus changes under sugarcane expansion in Brazil. **Science of The Total Environment**, v. 515–516, p. 30–38, 2015.
- GALDOS, M. V.; CERRI, C. C.; CERRI, C. E. P. Soil carbon stocks under burned and unburned sugarcane in Brazil. **Geoderma**, v. 153, n. 3–4, p. 347–352, 2009.
- GAVA, G. J. C. et al. Recuperação do nitrogênio (^{15}N) da ureia e da palhada por soqueira de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 4, p. 621–630, 2003.
- GMACH, M.-R. et al. Soil organic matter dynamics and land-use change on Oxisols in the Cerrado, Brazil. **Geoderma Regional**, v. 14, p. e00178, 2018.
- GRAHAM, M. H.; HAYNES, R. J.; MEYER, J. H. Soil organic matter content and quality: effects of fertilizer applications, burning and trash retention on a long-term sugarcane experiment in South Africa. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 34, n. 1, p. 93–102, 2002.
- HE, M. et al. A critical review on performance indicators for evaluating soil biota and soil health of biochar-amended soils. **Journal of Hazardous Materials**, v. 414, p. 125378, 2021.
- HUNGRIA, M. et al. Soil microbial activity and crop sustainability in a long-term experiment with three soil-tillage and two crop-rotation systems. **Applied Soil Ecology**, v. 42, n. 3, p. 288–296, 2009.
- INMET. **Instituto Nacional de Meteorologia**. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/>>. Acesso em: 2023.
- ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. Microwave irradiation of soil for routine measurement of microbial biomass carbon. **Biology and Fertility of Soils**, v. 27, n. 4, p. 408–416, 1998.

KUNDE, R. J. et al. Frações físicas da matéria orgânica em Latossolo cultivado com cana-de-açúcar no Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1520–1528, 2016.

KUNDE, R. J. et al. Tensile strength, friability, aggregation, and soil organic matter physical fractions of an Oxisol cultivated with sugarcane. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, n. 4, p. 487–494, 2018.

LAVALLEE, J. M.; SOONG, J. L.; COTRUFO, M. F. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. **Global Change Biology**, v. 26, n. 1, p. 261–273, 2020.

LIMA NETO, J. de A. et al. Caracterização e gênese do caráter coeso em latossolos amarelos e argissolos dos tabuleiros costeiros do estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 4, p. 1001–1011, 2009.

LOCATELLI, J. L. et al. Changes in soil organic matter fractions induced by cropland and pasture expansion in Brazil's new agricultural frontier. **Geoderma Regional**, v. 28, p. e00474, 2022.

LOPES, I. M. et al. Carbon fractions and soil fertility affected by tillage and sugarcane residue management an Xanthic Udult. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 38, n. 5, p. 2921, 2017.

LUCA, E. F. de et al. Avaliação de atributos físicos e estoques de carbono e nitrogênio em solos com queima e sem queima de canavial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 2, p. 789–800, 2008.

LUCA, E. F. et al. Effect of conversion from sugarcane preharvest burning to residues green-trashing on SOC stocks and soil fertility status: Results from different soil conditions in Brazil. **Geoderma**, v. 310, p. 238–248, 2018.

MACEDO, I. de C.; NOGUEIRA, L. A. H. **Biocombustíveis**. Brasília, DF: Cadernos NAE, 2005.

MAIA, S. M. F. et al. Organic carbon pools in a Luvisol under agroforestry and conventional farming systems in the semi-arid region of Ceará, Brazil. **Agroforestry Systems**, v. 71, n. 2, p. 127–138, 2007.

MAIA, S. M. F. et al. Changes in soil organic carbon storage under different agricultural management systems in the Southwest Amazon Region of Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 106, n. 2, p. 177–184, 2010a.

MAIA, S. M. F. et al. Soil organic carbon stock change due to land use activity along the agricultural frontier of the southwestern Amazon, Brazil, between 1970 and 2002. **Global Change Biology**, v. 16, n. 10, p. 2775–2788, 2010b.

MAIA, S. M. F. et al. Soil organic carbon temperature sensitivity of different soil types and land use systems in the Brazilian semi-arid region. **Soil Use and Management**, v. 35, n. 3, p. 433–442, 2019.

MARCOLIN, C. D.; KLEIN, V. A. Determinação da densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 33, n. 2, p. 349–354, 2011.

MEDEIROS, A. de S. et al. Organic carbon, nitrogen and the stability of soil aggregates in areas converted from sugarcane to eucalyptus in the state of Alagoas. **Revista Árvore**, v. 42, n. 4, 2018.

MENANDRO, L. M. S. **Caracterização e aproveitamento agrônômico e industrial de ponteiros e folhas secas da cana-de-açúcar**. Dissertação—Campinas, SP: Instituto Agrônômico, 2016.

MENDONÇA, E. de S.; MATOS, E. da S. **Matéria Orgânica do solo: Métodos de Análises**. 2ª ed. Viçosa: UFV-Gefert, 2017.

MOITINHO, M. R. et al. Effects of burned and unburned sugarcane harvesting systems on soil CO₂ emission and soil physical, chemical, and microbiological attributes. **CATENA**, v. 196, p. 104903, 2021.

MORAIS, M. C. et al. Trade-Offs between Sugarcane Straw Removal and Soil Organic Matter in Brazil. **Sustainability**, v. 12, n. 22, p. 9363, 2020.

MUTABARUKA, R.; HAIRIAH, K.; CADISCH, G. Microbial degradation of hydrolysable and condensed tannin polyphenol–protein complexes in soils from different land-use histories. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 39, n. 7, p. 1479–1492, 2007.

NOVAK, E. et al. Biomassa e atividade microbiana do solo sob diferentes coberturas vegetais em Região Cerrado - Mata Atlântica. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 15, n. 3, p. 1–16, 2022.

OLIVEIRA, D. M. da S. et al. Soil carbon changes in areas undergoing expansion of sugarcane into pastures in south-central Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 228, p. 38–48, 2016.

OLIVEIRA, M. W. de et al. Decomposição e liberação de nutrientes da palhada de cana-de-açúcar em campo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, n. 12, p. 2359–2362, 1999.

OTTO, R. et al. High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development. **Soil and Tillage Research**, v. 117, p. 201–210, 2011.

PAREDES JUNIOR, F. P.; PORTILHO, I. I. R.; MERCANTE, F. M. Atributos microbiológicos de um latossolo sob cultivo de cana-de-açúcar com e sem queima da palhada. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 36, n. 1, p. 151, 2015.

PEREIRA, M. G. et al. Decomposição e liberação do nitrogênio, fósforo e potássio da palhada de duas variedades de cana-de-açúcar no nordeste do Brasil. **Concilium**, v. 22, n. 4, p. 411–418, 2022.

PIERI, C. J. M. G. **Fertility of Soils**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1992.

- PORTELA, M. G. T.; LEITE, L. F. C.; BARBOSA, R. P. Microbiological attributes of a cultivated Plinthosol with sugarcane on different levels of straw. **Acta Agronomica**, v. 69, n. 4, p. 306–313, 2020.
- R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2022.
- RAHMAN, M. A. et al. Carbon mineralization in subtropical alluvial arable soils amended with sugarcane bagasse and rice husk biochars. **Pedosphere**, v. 32, n. 3, p. 475–486, 2022.
- RAZAFIMBELO, T. et al. Effect of sugarcane residue management (mulching versus burning) on organic matter in a clayey Oxisol from southern Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 115, n. 1–4, p. 285–289, 2006.
- REICHERT, J. M. et al. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**, v. 102, n. 2, p. 242–254, 2009.
- RENCER, A. C. *Methods of multivariate analysis*. J. Wiley, 2002.
- RESENDE, M. et al. **Pedologia base para distinção de ambientes**. 6. ed. Lavras: Editora UFLA, 2014.
- REYNOLDS, W. D. et al. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. **Geoderma**, v. 152, n. 3–4, p. 252–263, 2009.
- ROCHA JUNIOR, P. R. da et al. Soil carbon stock in silvopastoral system, pasture and sugarcane culture. **Idesia (Arica)**, v. 32, n. 1, p. 35–42, 2014.
- ROSSET, J. S. et al. Influence of sugarcane management on the carbon management index and soil aggregation. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 8, n. 4, p. e6744, 2021.
- ROSSET, J. S.; SCHIAVO, J. A.; ATANÁZIO, R. A. R. Atributos químicos, estoque de carbono orgânico total e das frações humificadas da matéria orgânica do solo em diferentes sistemas de manejo de cana-de-açúcar. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 35, n. 5, p. 2351, 2014.
- SAIANI, C. C. S.; PEROSA, B. B. Saúde Respiratória e Mecanização da Colheita da Cana-de-Açúcar nos Municípios Paulistas: a importância do Protocolo Agroambiental. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 54, n. 1, p. 29–50, 2016.
- SANT'ANNA, S. A. C. et al. Evaluation of Soil Quality Indicators in Sugarcane Management in Sandy Loam Soil. **Pedosphere**, v. 19, n. 3, p. 312–322, 2009.
- SANTOS, V. B. et al. Soil microbial biomass and organic matter fractions during transition from conventional to organic farming systems. **Geoderma**, v. 170, p. 227–231, 2012.
- SATTOLO, T. M. S. et al. Soil carbon and nitrogen dynamics as affected by land use change and successive nitrogen fertilization of sugarcane. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 247, p. 63–74, 2017.

SCHIEBELBEIN, B. E. **Estabilidade de agregados e estocagem de carbono no solo em áreas de expansão do cultivo de cana-de-açúcar**. Dissertação—Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2022.

SIGNOR, D. **Estoques de carbono e nitrogênio e emissões de gases do efeito estufa em áreas de cana-de-açúcar na região de Piracicaba**. Dissertação—Piracicaba: Universidade de São Paulo, 2010.

SIGNOR, D. et al. Atributos químicos e qualidade da matéria orgânica do solo em sistemas de colheita de cana-de-açúcar com e sem queima. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1438–1448, 2016.

SILVA, A. et al. Impact of sugarcane cultivation on soil carbon fractions, consistence limits and aggregate stability of a Yellow Latosol in Northeast Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 94, n. 2, p. 420–424, 2007.

SILVA, C. A.; MACHADO, P. L. O. de A. **Sequestro e emissão de carbono em ecossistemas agrícolas: estratégias para o aumento dos estoques de matéria orgânica em solos tropicais**. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2000.

SILVA, E. E. da; AZEVEDO, P. H. S. de; DE-POLLI, H. **Determinação da respiração basal (RBS) e quociente metabólico do solo (qCO_2)**. Seropédica, RJ: EMBRAPA, 2007.

SILVA-OLAYA, A. M. et al. Carbon dioxide emissions under different soil tillage systems in mechanically harvested sugarcane. **Environmental Research Letters**, v. 8, n. 1, 2013.

SISTI, C. P. J. et al. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 76, n. 1, p. 39–58, 2004.

SKJEMSTAD, J. O.; SWIFT, R. S.; MCGOWAN, J. A. Comparison of the particulate organic carbon and permanganate oxidation methods for estimating labile soil organic carbon. **Soil Research**, v. 44, n. 3, p. 255, 2006.

SOANE, B. D. The role of organic matter in soil compactibility: A review of some practical aspects. **Soil and Tillage Research**, v. 16, n. 1–2, p. 179–201, 1990.

SOARES, V. A. S. F. et al. Irrigated sugarcane crops improve the quality of soil organic carbon over time. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 43, n. 1, p. 283–296, 2022.

SOUZA, E. D. de et al. Frações do carbono orgânico, biomassa e atividade microbiana em um Latossolo Vermelho sob cerrado submetido a diferentes sistemas de manejos e usos do solo. **Acta Sci. Agron.**, v. 28, n. 3, p. 323–329, 2006.

SOUZA, G. S. de et al. Effects of traffic control on the soil physical quality and the cultivation of sugarcane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 1, p. 135–146, 2014.

SOUZA, G. S. de et al. Controlled traffic and soil physical quality of an Oxisol under sugarcane cultivation. **Scientia Agricola**, v. 72, n. 3, p. 270–277, 2015.

SOUZA, Z. M. de et al. Sistemas de colheita e manejo da palhada de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, n. 3, p. 271–278, 2005.

SPARLING, G. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter. **Soil Research**, v. 30, n. 2, p. 195, 1992.

STOTZKY, G. Microbial respiration. In: BLACK, C.A., ed. Methods of soil analysis. **Amer. Soc. Agron., Madison**, p. 1550–1572, 1965.

TAVARES, R. L. M. et al. Prediction of soil CO₂ flux in sugarcane management systems using the Random Forest approach. **Scientia Agricola**, v. 75, n. 4, p. 281–287, 2018.

TIWARI, S. et al. Land use change: A key ecological disturbance declines soil microbial biomass in dry tropical uplands. **Journal of Environmental Management**, v. 242, p. 1–10, 2019.

VASCONCELOS, R. F. B. de et al. Qualidade física de Latossolo Amarelo de tabuleiros costeiros em diferentes sistemas de manejo da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 4, p. 381–386, 2014.

VITTI, A. C. et al. Mineralização da palhada e crescimento de raízes de cana-de-açúcar relacionados com a adubação nitrogenada de plantio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2757–2762, 2008.

WEILER, D. A. et al. Carbon balance in sugarcane areas under different tillage systems. **BioEnergy Research**, v. 12, n. 4, p. 778–788, 2019.

WENDLING, B. et al. Mudanças no carbono e nitrogênio em diferentes compartimentos da matéria orgânica sob sistema agrossilvipastoril. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 4, p. 641–653, 2011.

WHITE, P. M.; WEBBER, C. L. Green-cane harvested sugarcane crop residue decomposition as a function of temperature, soil moisture, and particle size. **Sugar Tech**, v. 20, n. 5, p. 497–508, 2018.

XU, X. et al. Temperature sensitivity increases with soil organic carbon recalcitrance along an elevational gradient in the Wuyi Mountains, China. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 42, n. 10, p. 1811–1815, 2010.

ZANI, C. F. et al. Vinasse application and cessation of burning in sugarcane management can have positive impact on soil carbon stocks. **PeerJ**, v. 6, n. 8, p. e5398, 2018.

ZOTARELLI, L. et al. Impact of tillage and crop rotation on light fraction and intra-aggregate soil organic matter in two Oxisols. **Soil and Tillage Research**, v. 95, n. 1–2, p. 196–206, 2007.

APÊNDICE

Apêndice A - Teor de C nas frações da MOS (MOP - matéria orgânica particulada, MOAM - matéria orgânica associada aos minerais) nos locais e nos tratamentos de cana com colheita mecanizada, cana com queima e vegetação nativa, nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-50 cm.

Locais	Pindoba				Santa Isabel				São João			
Camada (cm)	CM12	CM17	CQ	VN	CM3	CM9	CQ	VN	CM4	CM8	CQ	VN
MOP (g C. kg⁻¹ solo)												
0-10	1,34 *bA	2,20 abA	1,96 abA	4,59 aA	1,29 bA	2,08 bA	2,18 abA	7,72 aA	1,19 bA	0,96 bA	1,58 bA	5,79 aA
10-20	0,78 aAB	1,46 aAB	1,19 aA	1,20 aB	0,39 cB	0,76 bcB	1,50 abA	4,29 aAB	0,76 abAB	0,39 bB	0,72 abAB	1,39 aB
20-30	0,49 aBC	0,79 aBC	0,93 aAB	0,86 aB	0,44 bB	0,52 bB	1,36 aA	2,45 aAB	0,64 abAB	0,38 abB	0,33 bB	0,90 aBC
30-50	0,34 aC	0,48 aC	0,49 aB	0,61 aB	0,43 bB	0,63 bB	1,96 aA	1,66 aB	0,40 aB	0,09 bC	0,42 aB	0,45 aC
MOAM (g C. kg⁻¹ solo)												
0-10	10,82 bA	13,48 abA	11,51 abA	18,52 aA	8,63 cA	14,39 abA	11,44 bcA	20,79 aA	10,81 aA	11,54 aA	11,08 aA	16,55 aA
10-20	7,72 bB	10,54 aA	9,55 abAB	10,82 aB	7,87 bAB	11,47 bA	11,52 bA	18,92 aAB	9,90 abA	9,04 bAB	7,94 bAB	15,58 aAB
20-30	6,64 aB	7,14 aB	8,24 aAB	8,45 aB	5,39 cBC	6,64 bcB	9,61 abAB	14,25 aBC	8,07 aAB	7,67 aB	8,10 aAB	10,37 aBC
30-50	6,19 aB	6,68 aB	7,58 aB	6,34 aC	3,21 cC	6,10 bB	7,01 abB	10,68 aC	6,83 aB	7,70 aB	7,09 aB	8,26 aC

*Médias seguidas de mesma letra minúscula nas linhas e mesma letra maiúscula nas colunas, não se diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade (p<0,05).

Fonte: Autor (2023).