UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Botucatu

FCA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
UNESP | BOTUCATU

IVANAYRA DA SILVA MENDES

EFEITOS DO PREPARO PROFUNDO DO SOLO E DA CALAGEM SOBRE A EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM CANA-DE-AÇÚCAR

Botucatu

2021

IVANAYRA DA SILVA MENDES

EFEITOS DO PREPARO PROFUNDO DO SOLO E DA CALAGEM SOBRE A EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM CANA-DE-AÇÚCAR

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia/Agricultura.

Orientador: Dr. Juliano Carlos Calonego

Coorientador(a): Dra. Patrícia Pereira Dias

Botucatu

2021

M538e

Mendes, Ivanayra da Silva
Efeitos do preparo profundo do solo e da calagem sobre a emissão de gases de efeito estufa em cana-de-açúcar / Ivanayra da Silva Mendes. -- Botucatu, 2021
116 f.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu
Orientador: Juliano Carlos Calonego
Coorientadora: Patrícia Pereira Dias

1. Gases de efeito estufa. 2. Manejo do solo. 3. Calagem. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Botucatu

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: EFEITOS DO PREPARO PROFUNDO DO SOLO E DA CALAGEM SOBRE A EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM CANA-DE-AÇÚCAR

AUTORA: IVANAYRA DA SILVA MENDES
ORIENTADOR: JULIANO CARLOS CALONEGO
COORIENTADORA: PATRICIA PEREIRA DIAS

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em AGRONOMIA (AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. JULIANO CARLOS CALONEGO (Participaçao Virtual)
Produção Vegetal / Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu - UNESP

Prof. Dr. JOÃO PAULO GONSIORKIEWICZ RIGON (Participaçao Virtual)
Pós-Doutorando - Produção Vegetal / Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu

Prof. Dr. CARLOS HENRIQUE DOS SANTOS (Participaçao Virtual)
Agronomia / Universidade do Oeste Paulista

Botucatu, 25 de fevereiro de 2021

Aos meus amados pais Edivan de Lima Mendes e Aldenira Gomes da Silva, por serem os pilares da minha vida. E às minhas irmãs Sanayra e Mayara, por todo apoio e incentivo.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Ao meu amabilíssimo Deus por sua infinita misericórdia e graças derramadas durante todo o percurso da pós-graduação. "*Aqueles que esperam no SENHOR renovam suas forças. Voam alto como águias; correm e não se fatigam, caminham e não se cansam (Isaías 40:31)"*

À minha Mãezinha do céu, que possui minha total devoção, sendo aquela que me guia e molda ao seu bem querer para melhor servir ao seu filho Jesus, minha fiel intercessora e administradora dos meus méritos, minha Virgem Maria.

Aos meus queridos pais Edivan de Lima Mendes e Aldenira Gomes da Silva que são meus maiores modelos de caráter e superação. E junto deles minhas irmãs Sanayra e Mayara Mendes. Amo-vos.

À Faculdade de Ciências Agronômicas (UNESP/FCA) de Botucatu-SP pela oportunidade concedida para realização do mestrado.

Ao meu orientador Prof. Dr. Juliano Carlos Calonego pelo apoio, paciência, humildade, sempre um grande exemplo de dedicação e profissionalismo.

À minha coorientadora Dra. Patrícia Pereira Dias, pela grande colaboração na pesquisa e por toda relação de amizade e companheirismo cultivado ao longo desses anos.

A toda equipe do projeto Temático que não mediram esforços para conclusão desta pesquisa, principalmente aos amigos: Ana Stella, Marcela, Half, Celismar e os meus estagiários Nelson e Murilo, pelo imenso apoio nos trabalhos em campo.

A todos os funcionários e docentes do Departamento de Produção e Melhoramento Vegetal da FCA.

Aos meus queridos amigos conquistados na pós-graduação, pelo companheirismo e força que tornaram essa jornada ainda mais gratificante: Ana Paula, Gabriela, Gyslane, Half, Anderson Romão, Malba, Celismar, Keyse, Michelane, Bruna, Odila, Lucas (Fartura) e Marcela. Gratidão por todos os momentos compartilhados.

Aos amigos da minha cidade natal que também torceram e me acompanharam de longe: Raquel, Ramile, Mayara, Matheus, Flaviane, Dayson e ao meu orientador da graduação Dr. Jardel Santos.

Ao Grupo Zilor pela disponibilidade e parceria na condução de todo o experimento, principalmente ao Sr. Jair e toda equipe de trabalhadores pela ajuda e suporte na área de Lençóis Paulista.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo apoio financeiro concedido para a condução da pesquisa (Processo nº2014/20593-9).

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudos concedida para realização do mestrado.

A todos que ajudaram direta ou indiretamente para a conclusão deste trabalho, meu sincero....

MUITO OBRIGADA!

“Nada proporciona melhor capacidade de superação e resistência aos problemas e dificuldades em geral do que a consciência de ter uma missão a cumprir na vida.”
Viktor Frankl

“A educação é simplesmente a alma de uma sociedade a passar de uma geração para outra.”
G. K. Chesterton

“É sempre assim o curso dos fatos que movem as rodas do mundo: as mãos pequenas os realizam porque precisam, enquanto os olhos dos grandes estão voltados para outros lugares.”
J.R.R. Tolkien

RESUMO

As práticas convencionais do sistema de produção da cana-de-açúcar e o uso de processos altamente mecanizados elevam a compactação do solo, acarretando diversos prejuízos no desenvolvimento da cultura e refletindo em baixa produtividade. Também afetam os principais processos biogeoquímicos que regulam o destino do carbono e do nitrogênio, aumentando as emissões de gases de efeito estufa (GEE), que podem estar associados ao aquecimento global. O preparo profundo do solo em faixas com controle de tráfego, principalmente quando acompanhado de doses adequadas de calcário, pode ser uma alternativa na redução dos fluxos dos principais GEE (CO_2, CH_4 e N_2O) emitidos pela agricultura. Contudo, pouco se sabe sobre como essa técnica pode alterar os fluxos destes gases no sistema solo-atmosfera a longo prazo, bem como seus efeitos residuais na compactação do solo. Foram avaliados em solo de textura média, utilizando-se o delineamento experimental em blocos casualizados, com quatro repetições, os seguintes tratamentos: Preparo Convencional (PC) sem e com calcário em área total e Preparo Profundo em faixas (PP) sem e com calcário na linha de plantio no segundo ano da cultura. Os dados foram submetidos à análise de variância ($p \leq 0,05$) e comparados pelo teste LSD ($p \leq 0,05$). Observou-se maiores fluxos acumulados de CO_2 em PP com e de N_2O nos manejos sem calcário, enquanto que para o CH_4 não se obteve diferenças, o qual atuou como fonte deste gás, porém com valores próximos a zero. O manejo PC com apresentou a maior emissão relativa de C equivalente (ERC) e alta produtividade, enquanto PP com obteve menor ERC, alta produtividade e maior estoque de carbono no solo em relação aos manejos convencionais. As maiores médias de resistência à penetração do solo (RP) nas zonas de cultivos foram observadas nos manejos PP, com valores restritivos para PP sem a partir das camadas 0,1-0,2 m e PP com a 0,3-0,4 m. Em transepto, observou-se que a compactação foi mais atenuada em PC com, onde o mesmo não foi verificado para PP com. O preparo profundo mostrou uma tendência mais rápida e robusta para a compactação ao longo do perfil a partir do segundo ano de cultivo da cana-de-açúcar. A utilização do manejo preparo profundo em faixas aliada a prática da calagem localizada se mostrou promissor para mitigação das emissões relativas de GEE, no armazenamento de C no solo e na produtividade de colmos em área de cana-de-açúcar de primeiro corte. É válido que mais pesquisas precisam ser realizadas para uma avaliação completa nos anos seguintes, principalmente com relação à compactação do solo, por se tratar de uma cultura com ciclo longo, podendo atingir entre 5 a 7 anos, em que diferentes atividades para o manejo da cultura que afetam as propriedades físicas do solo e os fluxos de GEE são realizadas todos os anos.

Palavras-chave: Preparo do solo. Calcário. Emissões de gases. Dióxido de carbono. Metano. Óxido nitroso.

ABSTRACT

The conventional practices of the sugarcane production system and the use of highly mechanized processes increase soil compaction, causing several losses in the development of the crop and reflecting on low productivity. They also affect the main biogeochemical processes that regulate the fate of carbon and nitrogen, increasing emissions of greenhouse gases (GHG), which may be associated with global warming. The deep preparation of the soil in bands with traffic control, especially when accompanied by adequate doses of limestone, can be an alternative in reducing the flows of the main GHGs (CO_2, CH_4 and N_2O) emitted by agriculture. However, little is known about how this technique can alter the flow of these gases in the soil-atmosphere system in the long term, as well as their residual effects on soil compaction. The following treatments were evaluated in medium textured soil, using a randomized block design, with four replications, with the following treatments: Conventional Preparation (PC) without and with lime in total area and Deep Preparation in bands (PP) without and with lime in the planting line in the second year of the crop. The data were submitted to analysis of variance ($p \leq 0.05$) and compared by the LSD test ($p \leq 0.05$). Higher accumulated flows of CO_2 in PP with and of N_2O were observed in the management without limestone, while for CH_4 there were no differences, which acted as a source of this gas, however with values close to zero. The PC com management showed the highest relative C emission (ERC) and high productivity, while PP com had the lowest ERC, high productivity and greater carbon stock in the soil compared to conventional managements. The highest averages of resistance to soil penetration (RP) in the cultivation zones were observed in the PP managements, with restrictive values for PP without from layers 0.1-0.2 m and PP with 0.3-0.4 m. In transept, it was observed that the compaction was more attenuated in PC with, where the same was not verified for PP with. The deep preparation showed a faster and more robust tendency for compaction along the profile from the second year of sugarcane cultivation. The use of deep preparation management in bands combined with the practice of localized liming proved to be promising for mitigating the relative emissions of GHG, in the storage of C in the soil and in the productivity of stalks in the area of first-cut sugarcane. It is valid that more research needs to be carried out for a complete assessment in the following years, mainly in relation to soil compaction, as it is a crop with a long cycle, reaching between 5 and 7 years, in which different activities for the management of crops that affect the physical properties of the soil and the GHG flows are carried out every year.

Keywords: Soil preparation. Limestone. Gas emissions. Carbon dioxide. Methane. Nitrous oxide.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1 – Localização da área experimental pertencente à Usina Barra Grande (Grupo Zilor) no município de Lençóis Paulistas - SP, Brasil 45

Figura 2 – Temperaturas média, máxima, mínima e precipitação durante o segundo ano de cultivo da cana-de-açúcar, correspondente ao período entre julho de 2018 a junho de 2019, Lençóis Paulistas, SP 46

Figura 3 – Calcário em área total e operação de subsolagem no sistema de Preparo Convencional (A); Operação de canteirização pelo equipamento Penta no sistema Preparo Profundo (B), Lençóis Paulista, SP, 2017.....48

Figura 4 – Equipamento Penta Hidro 3, efetua cinco funções em uma única operação 48

Figura 5 – Espaçamento duplo alternado em cana-de-açúcar.....49

Figura 6 – Calcário em superfície aplicados nas zonas de canteiros do sistema Preparo Profundo (A); Aplicação de calcário nas profundidades 0,4 a 0,8 m pelo implemento Penta (B), Lençóis Paulistas, SP, 2017 50

Figura 7 – Câmaras de policloreto de vinila (PVC) com tampas para vedação, Lençóis Paulista, SP, 2018.....51

Figura 8 - Posicionamento das câmaras nas parcelas para avaliação das emissões de gases de efeito estufa, na linha com cana-de-açúcar e no centro da zona de tráfego, Lençóis Paulistas, 2018 52

Figura 9 – Coleta das amostras de Gases de Efeito Estufa, Lençóis Paulista, SP, 2018 53

Figura 10 – Medição da temperatura do ar (A); temperatura do solo (B); e umidade do solo (C), Lençóis Paulistas, SP, 2018 54

Figura 11 – Coleta de amostras do solo (A); amostras acondicionadas (B), secagem (C); moinho de bolas (D); pesagem (E); equipamento CHNS (F) 56

Figura 12 – Fluxo de CO_2 (g m^{-2} dia^{-1}) na zona de canteiro e zona de tráfego em função do Preparo do solo Convencional (PC) e Preparo Profundo (PP), com e sem aplicação de calcário após primeiro corte da cana-de-açúcar 58

Figura 13 – Dados médios de temperatura e umidade do solo em cada coleta de gases de efeito estufa, Lençóis Paulista, SP, 2019..... 60

Figura 14 – Dados médios mensais de precipitação e temperatura do ar durante período experimental, Lençóis Paulistas, SP, 2019..... 60

Figura 15 – Fluxo de N_2O (mg m^{-2} dia^{-1}) na zona de canteiro e zona de tráfego em função do Preparo do solo Convencional (PC) e Preparo Profundo (PP), com e sem aplicação de calcário após primeiro corte da cana-de-açúcar 62

Figura 16 – Fluxo de CH_4 (mg m^{-2} dia^{-1}) na zona de canteiro e zona de tráfego em função do Preparo do solo Convencional (PC) e Preparo Profundo (PP), com e sem aplicação de calcário após primeiro corte da cana-de-açúcar 63

Figura 17 – Emissão relativa de carbono (ERC) no segundo ano de cultivo da cana-de-açúcar, em função do Preparo Convencional (PC) e Preparo Profundo (PP), com e sem aplicação de calcário em um Latossolo Vermelho de textura média..... 68

CAPÍTULO 2

Figura 1 – Localização dos pontos de coleta para análise de resistência à penetração do solo (RP) pelo método de Stolf em um Latossolo Vermelho de textura média. Pontos numerados de 1 a 7 e distanciados a 0,15 m 91

Figura 2 – Avaliação de resistência do solo à penetração (A); Tubos para medição de umidade a 1,0 m de profundidade (B); Medição da umidade do solo com sonda modelo Diviner 2000® (C) 92

Figura 3 – Resistência à penetração do solo (RP) nas camadas de 0,0 a 0,7 m de profundidade, nas distâncias 0,15, 0,30, 0,45, 0,60, 0,75 e 0,90 m ao final do segundo ano de cultivo da cana-de-açúcar em um Latossolo Vermelho de textura média

submetido ao Preparo convencional (PC) (A) e Preparo profundo (PP) (B), com e sem aplicação de calcário 97

Figura 4 – Dados médios de umidade do solo (%) nas camadas 0,1 m, 0,2 m, 0,3 m, 0,4 m, 0,5 m, 0,6 m, 0,7 m de profundidade no segundo ano de cultivo da cana-de-açúcar em um Latossolo Vermelho de textura média submetido ao Preparo convencional (PC) e Preparo profundo (PP), com e sem aplicação de calcário 98

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

Tabela 1 – Características químicas do solo em Latossolo Vermelho (LV) de textura média antes da implantação do experimento, Lençóis Paulistas, SP 46

Tabela 2 – Características físicas e granulométricas do solo em Latossolo Vermelho (LV) de textura média antes da implantação do experimento, Lençóis Paulistas, SP 47

Tabela 3 – Característica do calcário aplicado em Latossolo Vermelho (LV) de textura média, Lençóis Paulistas, SP, 2017 50

Tabela 4 – Emissão acumulada de C-CO2, C-CH4 N-N2O em função do Preparo do solo Convencional (PC) e Preparo Profundo (PP), com e sem aplicação de calcário no segundo ano de cultivo da cana-de-açúcar.....65

Tabela 5 – Estoque de carbono (Mg ha-1) no solo nas profundidades de 0,0-0,2, 0,2-0,4, 0,4-0,6, 0,6-0,8 e 0,8-1,0 m no segundo ano de cultivo da cana-de-açúcar em um Latossolo Vermelho de textura média submetido ao Preparo Convencional (PC) e Preparo Profundo (PP), com e sem aplicação de calcário 69

Tabela 6 – Estoque de nitrogênio (Mg ha-1) no solo nas profundidades de 0,0-0,2 m, 0,2-0,4 m, 0,4-0,6 m, 0,6-0,8 m e 0,8-1,0 m no segundo ano de cultivo da cana-de-açúcar em um Latossolo Vermelho de textura média submetido ao Preparo Convencional (PC) e Preparo Profundo, com e sem aplicação de calcário 72

Tabela 7 - Produtividade em toneladas de colmos por hectares (TCH) no segundo ano de cultivo da cana-de-açúcar em um Latossolo Vermelho de textura média submetido ao Preparo Convencional (PC) e Preparo Profundo (PP), com e sem aplicação de calcário.....73

CAPÍTULO 2

Tabela 1 – Resistência à penetração do solo (MPa) em zonas de canteiro e tráfego, nas profundidades de 0,0-0,2 m, 0,2-0,4 m, 0,4-0,6 m, 0,6-0,8 m e 0,8-1,0 m no

segundo ano de cultivo da cana-de-açúcar em um Latossolo Vermelho de textura média submetido ao Preparo Convencional (PC) e Preparo Profundo (PP), com e sem aplicação de calcário 93

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL 23

REVISÃO DE LITERATURA 26

Emissões de Gases de efeito estufa e agricultura 26

Fontes de Dióxido de Carbono (CO_2) no setor agrícola 28

Fontes de Óxido Nitroso (N_2O) no setor agrícola 29

Fontes de Metano (CH_4) no setor agrícola 32

Preparo do solo em cana-de-açúcar 33

Preparo profundo em faixas 36

Calagem 38

CAPÍTULO 1 - EMISSÕES RESIDUAIS DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM FUNÇÃO DO PREPARO PROFUNDO DO SOLO E DA CALAGEM EM CANA-DE-AÇÚCAR 41

1.1 INTRODUÇÃO 43

1.2 MATERIAL E MÉTODOS 45

1.2.1 Local do experimento e caracterização da área 45

1.2.2 Instalação e condução do experimento 46

1.2.3 Tratamentos e delineamento experimental 47

1.2.4 Calagem 49

1.2.5 Plantio da cana-de-açúcar 50

1.2.6 Avaliações 51

1.2.6.1 Coleta de Gases de Efeito Estufa (GEE) 51

1.2.6.2 Estoque de Carbono (C) e Nitrogênio (N) no solo 55

1.2.6.3 Emissão Relativa de Carbono Equivalente (ERC) 56

1.2.6.4 Produtividade 57

1.2.6.5 Análise estatística 57

1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO 57

1.3.1 Fluxos de CO_2 57

1.3.2 Fluxos de N_2O 61

1.3.3 Fluxos de CH_4 63

1.3.4 Emissões acumuladas (CO_2, CH_4 e N_2O) 65

1.3.5 Estoque de carbono (C) e nitrogênio (N) no solo 69

1.3.6 Produtividade de colmos 73

1.4 CONCLUSÃO 74
REFERÊNCIAS 74
CAPÍTULO 2 - EFEITO RESIDUAL DO PREPARO PROFUNDO DO SOLO E DA CALAGEM SOBRE A RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DO SOLO EM CANA-DE-AÇÚCAR 84
2.1 INTRODUÇÃO 86
2.2 MATERIAL E MÉTODOS 88
2.2.1 Local do experimento e caracterização da área 88
2.2.2 Instalação e condução do experimento 88
2.2.3 Tratamentos e delineamento experimental 88
2.2.4 Calagem 89
2.2.5 Plantio da cana-de-açúcar 90
2.2.6 Avaliação 90
2.2.6.1 Resistência à penetração do solo (RP) 90
2.2.6.2 Análise estatística 92
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO 92
2.3.1 Resistência à penetração do solo (RP) 92
2.4 CONCLUSÃO 100
REFERÊNCIAS 100
CONSIDERAÇÕES FINAIS 105
REFERÊNCIAS 107

INTRODUÇÃO GERAL

O aquecimento global e o aumento das concentrações de gases do efeito estufa (GEE) são considerados um dos maiores problemas ambientais da atualidade. Isto se deve ao fato de que as emissões de GEE podem contribuir com as alterações no balanço de entrada e saída de energia da radiação solar necessária ao sistema terra-atmosfera, modificando e aumentando a temperatura média do planeta, com consequentes mudanças climáticas globais (IPCC, 2007).

Dentre as ações antropogênicas associadas ao aumento de GEE na atmosfera destacam-se a agricultura e a pecuária, responsáveis pela emissão de grandes quantidades de gases causadores do efeito estufa (SEEG, 2017). Os principais gases emitidos por estas atividades segundo o IPCC (2018) são: o dióxido de carbono (CO_2) que depende do grau de perturbação dos solos, óxido nitroso (N_2O) relacionado com a aplicação de fertilizante nitrogenado e o metano (CH_4) emitido principalmente pela fermentação entérica do gado, cultivo de arroz inundado, manejo de dejetos, entre outros, possuindo fluxos no agroecossistema dependendo do manejo e das práticas agrícolas adotadas.

De acordo com dados do segundo levantamento da Conab (2020), o Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, com estimativa de produção de 642 milhões de toneladas na safra 2020/21, colhidas em uma área de 8,4 milhões de hectares, atribuindo uma produtividade média de 76 Mg ha^{-1}. No estado de São Paulo, maior produtor nacional, seguido por Goiás e Minas Gerais, prevê-se uma produtividade média de colmos de aproximadamente 79 Mg ha^{-1}. Tal desempenho está relacionado a grande importância social e econômica da cultura na região, a qual possui um vasto programa de produção de álcool que vem sendo desenvolvido no país desde 1974 (LIMA, 2016).

No Brasil, o etanol proveniente da cana-de-açúcar possui bastante relevância ambiental, isto se deve ao fato do produto ser obtido a partir de matéria-prima renovável, sendo as principais vantagens a diminuição de custos e a redução das emissões de GEE pela substituição de combustíveis fósseis por uma fonte mais limpa, o que torna seu uso altamente sustentável.

No entanto, para que a substituição de um combustível fóssil pelo biocombustível possa ser eficiente, é preciso levar em consideração as emissões de GEE associadas

à combustão e ao processo produtivo como um todo, o que inclui também as emissões ao longo do sistema de produção da matéria-prima (SIGNOR, 2010).

Atualmente, sabe-se que as operações agrícolas que promovem o revolvimento da terra realizam a quebra dos agregados, eleva a oxigenação e expõe a matéria orgânica fisicamente protegida no solo permitindo a ação dos microrganismo no processo de decomposição, o qual é aumentado com a intensidade de mobilização resultando em consequentes perdas de carbono para a atmosfera, contribuindo com a emissão de GEE (IAMAGUTI et al., 2015), com a perda de matéria orgânica e com a redução do estoque de carbono do solo (SIGNOR et al., 2014). Neste sentido, tem-se dado bastante atenção ao manejo do solo na cultura da cana-de-açúcar que, em sua maioria, ainda segue técnicas convencionais, as quais exercem maiores perturbações em comparação a outros sistemas (PANOSSO, 2011).

Com o tráfego intensivo de máquinas nas áreas de cultivo, tem-se observado baixos rendimentos da cultura que, com as restrições impostas às queimadas para a colheita e consequente mecanização total do sistema de manejo, resultaram em efeitos negativos aos atributos do solo (LIMA, 2016), como o aumento da compactação e consequente danos físicos, químicos e biológicos, afetando diretamente a produtividade (SOUZA et al., 2005).

Assim, há a necessidade de se adotar técnicas que envolvam tanto a diminuição de processos que degradam o solo e limitam o potencial produtivo da cana-de-açúcar, quanto a mitigação das emissões de GEE provenientes dessas operações.

Dentre as alternativas disponíveis de manejo mecanizado para a cultura tem-se o preparo profundo em faixas, o qual realiza o tráfego controlado associado à técnica de canteirização. De acordo com Rosseto et al. (2011), todo o preparo e consequente mobilização do solo é efetuada de forma localizada e combinada, ocorrendo somente nos sulcos de plantio, onde o implemento realiza simultaneamente a subsolagem profunda, a aplicação e incorporação de corretivos e fertilizantes, enleira a palha e quebra os torrões. A pressão de contato dos rodados é reduzida, deixando as zonas de tráfego da área sem sofrerem mobilização no solo.

Pouco se sabe sobre os efeitos do preparo profundo em faixas em cana-de-açúcar na qualidade do solo (GARCIA, 2018; GUIMARÃES, 2019) e possíveis benefícios da sua implementação na redução das emissões de gases do efeito estufa a curto e longo prazo. Também cabe ressaltar que não somente operações de intenso revolvimento

do solo é fator limitante para a cultura, mas aquelas relacionadas ao pH que estão diretamente ligadas ao desenvolvimento radicular e estabelecimento das plantas.

A prática de correção da acidez do solo, comumente conhecida como calagem, tem por principais finalidades corrigir a acidez proveniente do H^+, precipitar o Al^{3+} e fornecer Ca^{2+} e Mg^{2+} para as plantas, podendo agir tanto como corretivo como fertilizante (ZANDONA et al., 2015). Pela cultura ser semi-perene e com ciclo de cinco a sete anos, as raízes da cana desenvolve-se em maior profundidade, e assim, passa a ter uma estreita relação com o pH e demais componentes de fertilidade do solo (STAUT, 2006). A incorporação de calcário em profundidade pode promover condições químicas favoráveis ao desenvolvimento das raízes e consequentemente aumentar a produtividade da cana-de-açúcar.

No entanto, as recomendações atuais para aplicação de calcário em cana-de-açúcar são desenvolvidas para sistema de preparo do solo convencional, o que implica na não adequação de doses pré-estabelecidas para novos sistemas de manejo, como o preparo profundo em faixas.

Diante da necessidade de se buscar novas práticas de manejo da cultura que minimizem os efeitos da mecanização e aliem conservação e sustentabilidade do ambiente agrícola ao longo do tempo, a presente pesquisa teve por objetivo avaliar o efeito residual do preparo profundo do solo e da calagem no segundo ano de cultivo da cana-de-açúcar sobre:

a) as emissões de gases de efeito estufa (CO_2, N_2O e CH_4) após primeiro corte;
b) a emissão relativa de carbono equivalente por unidade de massa de colmos produzida;
c) o estoque de carbono e nitrogênio do solo;
d) a resistência à penetração do solo e;
e) a produtividade de colmos.

REVISÃO DE LITERATURA

Emissões de Gases de efeito estufa e agricultura

Segundo Escobar (2008), o efeito estufa é um mecanismo natural de aquecimento da atmosfera, o qual está relacionado com a manutenção da temperatura média do planeta em níveis adequados para sobrevivência dos seres vivos. O fenômeno ocorre quando uma parte da radiação solar refletida pela superfície terrestre é absorvida por determinados gases chamados “gases de efeito estufa”, que estão contidos na atmosfera. Consequentemente, a radiação infravermelha refletida pela terra fica retida nas camadas mais baixas da atmosfera o que resulta no aquecimento do planeta.

Embora a existência de GEE na troposfera seja vital para manutenção de vida no planeta, desde meados do século XVIII que a emissão destes gases pela atividade antrópica tem aumentado suas concentrações na atmosfera (GRUTZMACHER, 2016). Isto vem sendo relacionado ao aumento progressivo da temperatura média atmosférica ao longo dos anos, uma vez que o montante de radiação infravermelha irradiada por estes gases de volta a superfície tem aumentado, intensificando o fluxo radiativo térmico (PIERREHUMBERT, 2011). De acordo com Grutzmacher (2016), essa intensificação do intercâmbio de energia térmica entre a atmosfera e a superfície terrestre em resposta ao aumento observado na concentração de GEE, recebe o nome de efeito estufa antrópico, e a rápida e incomum elevação da temperatura média da superfície do planeta em resposta ao aumento da concentração destes gases é denominada aquecimento global.

Devido à poluição e aos impactos que esses gases podem ocasionar no ambiente, o balanço de GEE vem recebendo bastante atenção pela comunidade científica e também pela sociedade, destacando-se o aumento global do dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O) (ESCOBAR, 2008), sendo a agricultura responsável por quantidades significativas nas emissões destes GEE (IPCC, 2007).

Conforme o World Resources Institute (2016), os países que mais emitem GEE são a China e os Estados Unidos representando 26% e 13%, respectivamente. O setor energético é a maior fonte de emissões antrópicas de gases de efeito estufa, responsável por 73% das emissões mundiais, sendo incluso no setor as emissões correspondentes a transporte, eletricidade e geração de calor, edifícios, fabricação e construção, emissões fugitivas e outras queimas de combustível.

De acordo com o SEEG (2017), o Brasil se encontra na sétima posição com 3,4% das emissões e como um país essencialmente agrícola, a agropecuária é responsável por cerca de 30% das liberações. Dentre os subsetores da agropecuária a fermentação entérica do rebanho de ruminantes (predominantemente bovinos de corte) é a causa da maior fatia de emissões de GEE do setor. Em segundo lugar estão as emissões resultantes das atividades em solos agrícolas (que inclui os fertilizantes sintéticos, o adubo de origem animal, os dejetos animais depositados em pastagem, os cultivos de solos orgânicos e os restos de culturas agrícolas). Na sequência vêm as emissões do manejo de dejetos de animais, as provenientes do cultivo de arroz irrigado e da queima de resíduos agrícolas, como a cana-de-açúcar.

Já a nível mundial, o IPCC (2018) estima que 23% do total de emissões antrópicas de gases de efeito estufa nos períodos entre 2007 a 2016 derivaram da agricultura, silvicultura e outros usos da terra. Essas atividades foram responsáveis por cerca de 13% do dióxido de carbono (CO_2), 44% do metano (CH_4) e 82% das emissões de óxido nitroso (N_2O) decorrentes de atividades humanas em todo o mundo durante esse intervalo de tempo. Se as emissões associadas às atividades de pré e pós-produção no sistema alimentar global forem incluídas a estas emissões, estima-se que há um aumento de até 37% do total das emissões antropogênicas líquidas de GEE.

Segundo Assad e Pinto (2008), o aumento da temperatura nas próximas décadas pode favorecer a produtividade e a expansão da cana-de-açúcar nas áreas de cultivo, contrariando a capacidade de diversas outras culturas da flora brasileira. Neste cenário, o país se beneficiaria visto que detém a posição de maior produtor mundial da cultura (CONAB, 2020). Entretanto, a agricultura, de modo geral, além de contribuir com as emissões de GEE e, assim, com as mudanças climáticas, também é vítima de seus impactos (BORDONAL et al., 2012). Alguns fatores que podem comprometer a produtividade da cana-de-açúcar devem ser considerados como a distribuição irregular de chuvas durante alguns períodos do ano, o aumento dos danos econômicos causados por pragas e doenças, além de adaptações ao sistema de colheita mecanizada crua (FIGUEIREDO, 2012).

Assim como outras culturas agrícolas, a cana-de-açúcar também possui a sua parcela de emissão que estão associadas principalmente ao uso de defensivos agrícolas, calcário, fertilizantes, diesel e a etapa da queima da palha que antecede a

colheita, todas essas atividades como fontes diretas ou indiretas de GEE para a atmosfera (SOUZA, 2016).

Para diminuir as emissões de GEE e seus impactos sobre o ambiente, o Brasil se comprometeu com os desafios do Acordo de Paris, elaborado na 21ª Conferência das Partes (COP21) no âmbito da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC). No acordo, o país se comprometeu em reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 37% abaixo dos níveis de 2005 até 2025 (1,3 $GtCO_2$ eq), com uma contribuição indicativa subsequente de reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 43% abaixo dos níveis de 2005 até 2030 (1,2 $GtCO_2$ eq) (MMA, 2018). Ações no setor agrícola, que visem explorar de forma racional as áreas de cultivo para o aumento da produtividade, que reduzam as emissões de GEE e tenham baixo impacto ambiental, são fundamentais para o Brasil cumprir os acordos internacionais e atingir as metas de mitigação das emissões destes gases (MCTI, 2017).

Dióxido de Carbono (CO_2) no setor agrícola

O carbono está distribuído no globo terrestre em cinco compartimentos: atmosférico, oceânico, pedológico, biótico e geológico (ZOTELLI, 2012). A atmosfera armazena aproximadamente 730 Pg de C (1Pg = 10^9t), os oceanos 40.000 Pg e a vegetação entre 470 a 655 Pg de C, sendo o solo o maior componente armazenador podendo estocar de 1.500 a 1.600 Pg de C na camada de 0 a 100 cm (SIGNOR, 2010). De acordo com Cerri et al. (2006), a camada 0-30 cm de profundidade, isoladamente, possui um estoque de aproximadamente 800 Pg de C, correspondendo quase que a mesma totalidade contida na atmosfera.

O solo desempenha um papel crucial no balanço global de carbono, regulando os processos biogeoquímicos dinâmicos e a troca de GEE (FAO, 2020). No entanto, estima-se que liberamos quantidades consideráveis de CO_2 na atmosfera causadas por mudanças no uso da terra e práticas agrícolas insustentáveis, traduzidas em depleção histórica do Carbono Orgânico do Solo (COS) de em média 135 Gt de C desde o século XIX (LAL, 2018).

O tipo de sistema de preparo do solo, principalmente os convencionais mais empregados em cana-de-açúcar, pode afetar as emissões de GEE por alterarem as condições que favorecem os processos relacionados à produção destes gases no solo, onde a magnitude da perda de CO_2 dos solos está diretamente relacionada à

frequência e à intensidade do grau de perturbação causadas pelos implementos de preparo (IAMAGUTI et al., 2015; GARCIA, 2018). Segundo Schwartz, Baumhardt e Evett. (2010), com o rompimento dos agregados do solo, parte do C anteriormente protegido em seu interior é exposta à ação microbiana, tornando-o mais suscetível à mineralização. Após as operações de preparo, aumenta-se a aeração do solo e, consequentemente, ocorre maior acessibilidade ao oxigênio pela microbiota, principal responsável pela decomposição da matéria orgânica que a utiliza como fonte de energia para seu desenvolvimento, liberando CO_2 (MOITINHO et al., 2013).

Outra prática agrícola ligada aos fluxos de GEE é a calagem, que é uma importante fonte de emissão de CO_2 do solo através da utilização do calcário, seja calcítico ($CaCO_3$) ou dolomítico CaMg $(CO_3)_2$. O carbonato dissolve-se e libera bicarbonato ($2HCO_3^-$), que evolui em CO_2 e água (H_2O) (IPCC, 2006). Segundo (FUENTES et al., 2006), mesmo que a maior parte das emissões de CO_2 sejam por reações de hidrólise do carbonato de cálcio no solo, ela também pode ocorrer pela ação dos microrganismos que é intensificada após a prática da calagem associada a melhoria das condições químicas do solo, ocorrendo um significativo aumento na emissão medido pela quantidade adicional de CO_2 emitido após a prática.

Assim, o preparo do solo e o manejo da cultura afetam as taxas metabólicas dos microrganismos nos processos de decomposição dos resíduos vegetais e da matéria orgânica do solo (MOS), que também podem sofrer influência da temperatura e umidade do solo (LA SCALA JR; BOLONHEZI; PEREIRA, 2006; SCHWARTZ; BAUMHARDT; EVETT, 2010; IAMAGUTI et al., 2015). Essas são as variáveis que melhor explicam as mudanças nos fluxos de CO_2 ao longo do tempo (WANG; FENG; OIKAWA, 2009; SILVA-OLAYA et al., 2013; SILVA et al., 2014a), as quais podem favorecer ou não a produção de CO_2 conforme o teor de umidade ótima que maximiza a respiração do solo (LINN; DORAN, 1984). Em contrapartida, esta é limitada pela restrição da difusão do oxigênio, o qual é necessário para a respiração aeróbica (LAL, 2009).

Óxido Nitroso (N_2O) no setor agrícola

As fontes de nitrogênio na agricultura são variadas e vão desde o uso contínuo de fertilizantes sintéticos a base de N a dejetos e urinas de animais aplicados no solo ou deixados no pasto, resíduos de culturas, fixação biológica de N pelo uso de

leguminosas e de resíduos urbanos como lodo de esgoto e compostos de lixo (MOISER et al., 1998).

Mesmo que existam diferentes fontes de N no meio agrícola, as maiores emissões antrópicas de N_2O se dão pela fabricação e uso de fertilizantes nitrogenados sintéticos (SNYDER et al., 2009), sendo os solos agrícolas uma das mais importantes fontes de emissão deste gás para a atmosfera (SOARES, 2016).

Em uma área de cana-de-açúcar colhida sem queima, a grande fonte de emissão deste GEE estaria vinculada à quantidade de fertilizante mineral adicionada ao solo e à decomposição da palhada (SIGNOR, 2010). Carmo et al. (2013) avaliando as emissões de N_2O e CO_2 em cana-planta não irrigada e adubada de forma convencional, observaram significativo aumento nos fluxos logo após a aplicação de fertilizantes orgânicos (vinhaça e torta de filtro) combinados com fertilizante mineral, obtendo um pico nas emissões após 30 dias.

Ao estudar a uréia e nitrato de amônio nas emissões de N_2O, Signor (2010) constatou que o aumento da dose de 60 para 80 kg $há^{-1}$ de nitrato de amônio não afetou as emissões de N_2O, entretanto, nas doses de 80 a 120 kg $há^{-1}$ houve aumento de 59% nas emissões deste gás. Os maiores fluxos foram observados nos tratamentos com uréia, onde se obteve aumentos crescentes nas emissões em função da dose de N aplicado. A uréia, o fertilizante nitrogenado mais utilizado, está sujeita a grandes perdas de N, principalmente por meio da volatilização da amônia (NH_3) quando aplicada na superfície do solo. Sob as condições quentes no Brasil, isso pode chegar a 60% do N aplicado (Pan et al. 2016). Segundo Degaspari et al. (2020), devido a isto, outras fontes de fertilizante nitrogenados podem ser preferíveis para a cana-de-açúcar, especialmente quando aplicada em ciclos de soca, em que uma camada espessa de resíduos de plantas (10-20 Mg ha^{-1} de massa seca) permanece na superfície do solo, dificultando para incorporar a uréia e, assim, evitar a perda de volatilização da NH_3.

A quantidade de N emitida como N_2O devido à fertilização pode variar consideravelmente de acordo com o clima, solo e condições de manejo. O valor padrão para inventários nacionais é de 1% do N aplicado, variando de 0,3 a 3% (IPCC, 2014).

Outros trabalhos verificaram significativos aumentos nos fluxos de N_2O com adição de palhada sobre o solo (PISSIONI, 2011; DEGASPARI et al., 2013; LOPES et al., 2017). De acordo com Pissioni (2011), existe a possibilidade do efeito

significativo das quantidades de palha para a emissão de N_2O estar ligado ao fato de que quanto maior a quantidade de palha adicionada ao sistema se estaria adicionando (além de uma maior quantidade de substrato), também uma quantidade maior de microrganismos.

Além disso, os maiores fluxos de N_2O em canaviais onde não há queima e se realiza a manutenção da palhada em superfície é decorrente da cobertura com palha conservar a umidade do solo por mais tempo e, também, por beneficiar a atividade microbiana do solo, resultando em maior decomposição da matéria orgânica (CARMO et al., 2013; VARGAS et al., 2014).

Nestes casos, o N_2O é formado, principalmente, a partir da atividade microbiana do solo nos processos chamados nitrificação e desnitrificação.

De acordo com Oliveira (2014), isto ocorre pela conversão do amônio (NH_4^+) em nitrato (NO_3^-) acontecendo em duas etapas a partir de bactérias quimiotróficas: 1) o NH_4^+ é oxidado por bactérias do gênero *Nitrosomonas*, *Nitrospira* e *Nitrosococus* a NO_2^- pelo processo de nitrificação; 2) o NO_2^- obtido passa pela nitratação onde é oxidado por *Nitrobacter* sp., *Nitrospira* sp. e *Nitrococcus* sp a NO_3^-. Já a desnitrificação é a redução anaeróbica do NO_3^- em dinitrogênio (N_2) mediado por um grande número de espécies de bactérias anaeróbicas facultativas (CANTARELLA, 2007). As reações estão apresentadas a seguir:

Nitrificação:

$2NH_4^+ + 3O_2 \rightarrow 2\ NO_2^- + 2\ H_2O + 4H^+$

$NO_2^- + O_2 \rightarrow 2\ NO_3^-$ (libera NH_3, NO, N_2O)

Desnitrificação:

$2NO_3^-$ + matéria orgânica $\rightarrow N_2\uparrow + CO_2 + H_2O$ (liberando NO e N_2O).

O manejo do solo e das culturas podem influenciar diretamente os processos supracitados em sistemas agrícolas, pois os diferentes tipos de cultivos proporcionam ao solo diferentes condições físicas, as quais afetam a compactação, densidade, porosidade, disponibilidade de oxigênio e carbono, estando as propriedades físicas ligadas à produção de N_2O no solo (LIMA, 2013).

Em trabalho com cana-de-açúcar, Moro et al. (2011) avaliaram a emissão de N_2O em áreas submetidas ao preparo convencional, escarificação, plantio direto e plantio direto compactado, onde observaram maiores fluxos no sistema plantio direto compactado, seguido do solo escarificado e preparo convencional, ambos semelhantes estatisticamente. As maiores emissões no plantio direto compactado

foram atribuídas à maior ocorrência de microporos, podendo ocorrer nessa situação um aumento dos sítios anaeróbicos favorecendo a ocorrência da desnitrificação. A redução das emissões de N_2O no sistema plantio direto foram 72 e 56% comparado ao plantio direto compactado e aos demais preparos, respectivamente.

Liu et al. (2006), em estudos conduzidos em clima tropical e temperado, também verificaram essa tendencia de maiores emissões de N_2O em solos sob plantio direto em comparação ao sistema convencional, o qual foi associado à maior compactação do solo não revolvido que teve reflexo negativo na difusão de O_2.

O pH do solo também é um fator que pode influenciar os fluxos deste gás. Solos ácidos possuem a capacidade de limitar as reações de desnitrificação em direção a produção de N_2, o que ocasiona o consequente acúmulo de N_2O (SANCHEZ-MARTIN et al., 2008). Isto ocorre devido a inibição da enzima Óxido nitroso redutase pelo baixo pH do solo e na presença de O_2 (SIGNOR; CERRI, 2013). De acordo com Bremner (1997), a produção de N_2O por desnitrificação é favorecida por altas concentrações de NO_3^- e baixo pH em solos incubados, pois uma pequena quantidade desse gás seria reduzida à N_2 (CHAPUIS-LARDY et al., 2007). Desta forma, a contínua acidificação de solos agrícolas por meio do uso excessivo de fertilizantes nitrogenados pode aumentar os fluxos de N_2O, enquanto que o ajuste cuidadoso do pH do solo pela calagem reduziria as emissões (THOMSON et al., 2012),

Metano (CH_4) no setor agrícola

As emissões de CH_4 podem ser ocasionadas pela queima de biomassa, cultivos em áreas alagadas, aterros, fermentação entérica de ruminantes e uso de combustíveis fósseis (FORSTER et al., 2007). Já os solos agrícolas apresentam função diferenciada no fluxo de CH_4, podendo se comportar tanto como fonte ou dreno de acordo com a população de bactérias presente que realiza suas atividades a partir das condições ambientais (CERRI et al., 2010a).

O solo irá emitir ou consumir este gás conforme o sistema agrícola em uso e as práticas de manejo adotadas (MOSIER; WASSMANN; VERCHOT, 2004), onde o processo de produção do gás se dá pelo resultado da oxidação da matéria orgânica por determinados microrganismos (LE MER; ROGER, 2001) que, em condições anaeróbicas passa a ser produzido por meio de bactérias metanogênicas durante o processo chamado metanogênese (DIAS, 2013). De acordo com Mcinerney e Bryant (1981) isto pode ocorrer de duas formas: 1) pela metanogênese acenotrófica,

considerada a principal forma de produção de CH_4, onde há a conversão de carbono na forma de acetato em CH_4, e 2) a metanogênese hidrogenotrófica, em que o CO_2 age como aceptor de elétrons e é reduzido a CH_4.

Já o processo contrário (consumo do metano) é realizado por bactérias metanotróficas em condições aeróbicas, as quais possuem a capacidade de oxidar o CH_4 a CO_2 durante a execução da metanotrofia, utilizando-o como única fonte de carbono e energia (CERRI et al., 2010b).

Desta forma, solos aerados tendem a absorver CH_4, enquanto solos submetidos a ocorrências de chuva ou até mesmo irrigação podem gerar microsítios de anaerobiose, o que resulta em emissão deste gás (ESCOBAR, 2008). Os fluxos e influxos de CH4 também são dependentes de condições físicas do solo, sendo regulada pela taxa de difusão de O_2 (USSIRI; LAL; JARECKI, 2009). Solos compactados com consequentes aumento de densidade, macroporosidade e redução da difusão de O_2 tendem a eventos de metanogênese, refletindo em maiores emissões do referido gás (HUTSCK, 2001). De acordo com Chalco Vera e Acreche (2018), os fluxos de CH_4 são pouco ligados às variáveis climáticas, e muito mais associados às propriedades físicas do solo.

A aplicação de fertilizantes nitrogenados também afeta a dinâmica do CH_4 no solo. Devido a maior concentração de NH_4^+ disponível após a adubação nitrogenada, ocorre uma competição entre este íon e o CH_4 presente no solo pela enzima monoxigenase, (HÜSTCH; WEBSTER; POWLSON, 1993; BOECKX; VAN CLEEMPUT; VILLARALVO, 1997), assim, maior disponibilidade de nitrogênio pode estimular as bactérias metanotróficas a oxidar NH_4^+, inibindo a oxidação do CH_4.

Outros fatores como disponibilidade de O_2, umidade, potencial de redução (Eh), conteúdo de matéria orgânica, etc, afetam ou a formação do metano (metanogênese) ou sua oxidação (metanotrofia). O balanço entre esses dois processos é o que determina se um ambiente absorve ou emite metano (LE MER; ROGER, 2001).

Preparo do solo em cana-de-açúcar

A finalidade do preparo do solo é a desagregação das camadas compactadas, criando condições adequadas ao desenvolvimento radicular, reduzindo a resistência mecânica ao crescimento das raízes, melhorando a aeração e infiltração de água no solo (FORTIN; ROCHETTE; PATTEY, 1996).

Na cultura da cana-de-açúcar, esse manejo primário influencia significativamente a produção ao longo dos cortes consecutivos, quando as operações de preparo não são realizadas com tecnologia adequada para cada tipo de solo (FREITAS, 1987). Para a implantação do canavial, ele representa uma etapa crucial na longevidade da cultura, considerando que o solo só será revolvido novamente após o quinto ou sexto corte, conforme a variedade (ARCOVERDE, 2018).

A cultura da cana-de-açúcar tem como principal manejo do solo o preparo convencional, que consiste de operações sucessivas como aração, gradagem, subsolagem e sulcação profunda (NOVACANA, 2013; ARCOVERDE, 2018; AMORIM, 2019) e com a adoção da colheita mecanizada o sistema tornou-se altamente mecanizado. De maneira geral, a cultura tem apresentado baixas produtividades em virtude da contínua utilização de métodos convencionais de manejo (MORGADO; VIEIRA, 1999) que resultam em problemas de degradação do solo, sendo o principal a compactação (SILVA; CASTRO, 2015; MARASCA et al., 2015). Atualmente, a colheita mecanizada tem influído ainda mais nesse aspecto (GUIMARÃES, 2019).

Segundo Santos Junior et al. (2015), o advento da colheita mecanizada contribui com a aplicação de pressões elevadas no solo por meio do tráfego de colhedoras e transbordos com massa total de até 30 toneladas repetidos durante vários ciclos da cultura, sendo o potencial de compactação aumentado ainda mais quando esse tráfego, durante a colheita, é realizado em condições de solo úmido, aumentando a compactação e, consequentemente, ocasionando danos não só aos atributos físicos do solo como também nos químicos e biológicos.

Além disso, os implementos de preparo em sistema convencional modificam a estrutura do solo, com transformação da camada arável em superfície pulverizada e a subsuperficial compactada (ARCOVERDE et al., 2019). Dentre os implementos utilizados nas operações tem-se o uso contínuo da grade que pode ocasionar uma barreira de compactação abaixo dos 20 cm (ALBUQUERQUE FILHO et al., 2016). Também, de acordo com Ludwig et al. (2001), as práticas de manejo intensivo, aliada as condições ambientais e às características do solo (umidade, temperatura, pH) alteram os principais processos biogeoquímicos que regulam o destino do C e do N, aumentando as emissões de GEE (CO_2, N_2O e CH_4).

Segundo Santiago e Rossetto (2016), uma agricultura sustentável depende do uso de práticas conservacionistas que possam minimizar os efeitos da degradação do solo e reduzir suas perdas. Como um recurso natural, o solo deve ser bem manejado, pois

o uso inadequado das práticas agrícolas torna a atividade economicamente inviável, além dos danos ao meio ambiente. Assim, a prevenção da compactação, como o tráfego controlado, as operações mecanizadas realizadas com o solo seco, a permanência da palhada na superfície, a rotação de culturas na época da reforma e o uso de matéria orgânica em geral, são práticas muito recomendadas, que se tornam possível devido a inserção da colheita mecanizada da cana crua (DERPSCH et al., 2011).

Para o cultivo da cana-de-açúcar, existem três opções para o preparo do solo além do sistema convencional: sistema de plantio direto, preparo reduzido e o preparo do solo localizado (técnica inserida no cultivo mínimo) (AMORIM, 2019).

O Sistema Plantio Direto (SPD) agrega diversas práticas conservacionistas supracitadas, porém é ainda pouco utilizado em cana-de-açúcar. Nesta técnica de manejo o palhiço e restos são deixados na superfície do solo, há o uso da rotação de culturas e não existe preparo do solo além da mobilização no sulco de plantio, onde são depositadas as mudas e fertilizantes. As plantas infestantes são controladas por herbicidas, evitando assim cultivos mecânicos que provocam a compactação (NOVACANA, 2013).

Santiago e Rossetto (2016) explanam que para a cana-de-açúcar as práticas do SPD são de difícil aplicação, por ser uma cultura semi-perene, cujo preparo do solo ocorre só a cada cinco anos ou mais e que ano após ano há intensa mecanização (colheita, adubação, aplicação de herbicidas). Com isso, normalmente, o solo se encontra compactado. Em contrapartida, Amorim (2019) discorre que a descompactação do solo neste sistema com cana, não necessariamente, precisa ser realizada somente por implementos. Existe a opção de ser executada por algumas plantas, como é o caso da crotalária, que pode exercer a função de nematicidas de forma natural e do nabo forrageiro.

Carvalho et al. (2011), avaliando o SPD em cana-de-açúcar, observaram valores satisfatórios de densidade e porosidade total do solo em camadas mais profundas. Apesar da produtividade não se apresentar significativa, constataram custos menores de implantação em relação a outros sistemas.

O Preparo Reduzido ou Cultivo Mínimo, como o próprio nome diz, consiste no revolvimento mínimo do solo e na manutenção de resíduos vegetais. Devido a menor mobilização que ocasiona, consegue reduzir a erosão e a degradação (NOVACANA, 2013). Esse sistema combina a diminuição do número de operações, o uso de

implementos menos agressivos e a utilização de técnicas preventivas. De acordo com Duarte Junior e Coelho (2008), o uso deste sistema tem sido cada vez maior por promover diversos benefícios como melhorias da estrutura, porosidade, retenção e infiltração da água, atividade biológica, conteúdo de carbono orgânico e nitrogênio total do solo, capacidade de troca de cátions e conteúdo de nutrientes.

Tavares, Lima e Zonta (2010) ao avaliar o efeito de técnicas de preparo convencional e cultivo mínimo na renovação do canavial, observaram aumento inicial do diâmetro do colmo e maior produtividade de folhas na colheita no cultivo mínimo. Apesar do perfilhamento ter sido maior no sistema convencional, todos os dados biométricos se igualaram ao final do ciclo da cana planta.

Arcoverde et al. (2019), estudando o crescimento iniciais de oito cultivares de cana-de-açúcar em cultivo mínimo e plantio direto, verificaram melhor estabelecimento inicial quando cultivadas em preparo reduzido do solo, exceto na cultivar RB985476, que teve melhor perfilhamento em plantio direto. Na fase inicial de crescimento de colmos, ocorreram maiores índice de clorofila foliar nas cultivares submetidas ao preparo reduzido, além de maior altura de plantas.

André (2009) obteve os melhores resultados no preparo reduzido para macroporosidade, microporosidade, porosidade total e resistência à penetração. Entretanto, o preparo convencional apresentou maiores valores com relação a produtividade.

Apesar de todos os benefícios provenientes da utilização de práticas de manejo conservacionistas, ainda há a necessidade de se obter informações sobre suas influencias a curto e a longo prazo no ambiente em que são adotadas (KAMIMURA et al., 2009; ARCOVERDE, 2018), sendo importante que se busque melhorar os métodos de manejo do solo para que se obtenham aumentos de produtividade e minimização da sua degradação.

Preparo profundo do solo em faixas

No contexto da agricultura mecanizada, o controle de tráfego surge como uma alternativa para o cultivo de cana-de-açúcar, pois minimiza os efeitos adversos da mecanização agrícola, separa as zonas de tráfego daquelas em que há crescimento das plantas e concentra a passagem de pneus em linhas delimitadas (ROQUE et al., 2010). Neste sentido a utilização da técnica de canteirização em canaviais é uma opção para o controle de tráfego na cultura, com ou sem uso do piloto automático.

Neste caso, o preparo do solo é realizado em canteiros e o cultivo em faixas (LIMA, 2016).

De acordo com Rossetto et al. (2011) e Marasca (2014), ele consiste em subsolar, aplicar e incorporar adubos e corretivos, enleirar a palha e quebrar torrões, sendo cinco operações realizadas simultaneamente somente na área onde serão confeccionados os sulcos de plantio da cana-de-açúcar, mantendo o restante da área sem mobilização do solo, local onde ocorrerá o tráfego de máquinas. Neste sistema de preparo do solo, tem-se utilizado equipamentos compostos por uma haste subsoladora de 0,80 m de comprimento (denominado Penta) e por uma enxada rotativa, que trabalha a 0,40 m de profundidade e faz o preparo do solo e a incorporação de palha e de qualquer produto. Adicionalmente, é possível a incorporação de produtos em filetes nas profundidades de 0,40 e 0,80 m, por meio de orifício na parte posterior da haste sulcadora.

No estudo de Marasca (2014), foram verificados valores de Índice de Cone do Solo (ICS) menores no Preparo Profundo Canteirizado sem tráfego (PPC sem tráfego) para todas as camadas em comparação ao Preparo Profundo Canteirizado com tráfego (PPC com tráfego) e ao Preparo Convencional (PC). Entretanto, um ciclo (ou corte) não foi suficiente para imprimir diferença em produtividade de cana-de-açúcar pelos tratamentos analisados (Preparo Profundo Canteirizado e Preparo Convencional).

Ao avaliar diferentes tipos de preparo do solo em cana-de-açúcar, Tomaz (2013) obteve tamanhos de raízes estatisticamente maiores no preparo profundo ao longo do perfil, assim como área e volume de raízes. A Resistência à penetração do solo foi inferior nas camadas 20-40 e 40-60 cm em relação preparo convencional simples e mínimo simples. Além de menores custos operacionais.

Garcia (2018) comparando o modelo convencional com o conservacionista, verificou valores inferiores de Resistência do solo à penetração na área de canteiro em comparação com o preparo convencional. Também observou que a compactação em solo arenoso é menos crítica, principalmente em zonas de canteiro no preparo profundo, sendo o grau de compactação do solo argiloso 4 vezes maior que o arenoso nesse preparo.

Segundo Iamaguti et al. (2015), a conversão do sistema de preparo convencional para a subsolagem localizada reduz, de forma significativa, as emissões de CO_2 do solo diminuindo a contribuição da agricultura para o aumento dos gases de efeito

estufa na atmosfera. Pois no preparo convencional o solo exposto e desagregado favorece maiores perdas de CO_2 associadas a elevações da temperatura e a umidade reduzida do solo. Porém, quando adotadas práticas de manejo conservacionista em que o preparo do solo é realizado apenas na linha de plantio da cana-de-açúcar, a umidade é preservada.

No entanto, Garcia (2018) explana que, por ser um manejo inovador, há questionamentos se esta técnica poderia causar impactos negativos sobre o ecossistema de produção de cana-de-açúcar, devido ao estímulo à mineralização da matéria orgânica, à redução do estoque de C do solo e ao aumento das emissões de gases de efeito estufa a longo prazo, afetando o balanço do C no sistema solo-planta-atmosfera, podendo ser estes alguns dos resultados do revolvimento excessivo e profundo do solo, notadamente nas áreas de cana planta.

Calagem

Um fator de grande relevância que também deve ser levado em consideração é a acidez do solo. Segundo Schroeder (1984), a acidificação do solo pode ocorrer tanto por meio natural, resultado da lixiviação de cátions básicos solúveis (Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+}) que não são repostos, seguida pela sua substituição por cátions ácidos (H^{+} e Al^{3+}) no complexo de troca catiônica, como também por cultivos e uso de fertilizantes de caráter ácido. No geral, estes solos são caracterizados por baixos teores de nutrientes e baixos valores de pH, altas concentrações de Al e ou/ Mn tóxicos às culturas, baixa saturação de bases e predominância de argila 1:1 com presenças variáveis de óxidos de ferro e de alumínio, os quais são dependentes do pH.

Para que se tornem mais produtivos, existem algumas alterações químicas que os solos podem ser submetidos a fim de aumentar as capacidades produtivas no plantio. A mais comum é a calagem, considerada como uma das práticas que mais contribui para a eficiência dos adubos e produtividade/rentabilidade agropecuária (PAULA et al., 2012). Esta é a primeira prática a ser adotada na implantação e na manutenção da cultura da cana-de-açúcar e consiste na aplicação e incorporação de calcário agrícola ao solo.

A utilização da calagem é altamente econômica para a cultura da cana, pois aumenta a eficiência de aproveitamento dos nutrientes e tem, como consequência, o uso racional de fertilizantes, melhorando a relação benefício/custo por meio do incremento da produtividade e assegurando o retorno econômico dos recursos

investidos (NATALE et al., 2009). Com a aplicação de calcário bem realizada, pode-se elevar a longevidade do canavial em pelo menos mais um ano de corte (SANTIAGO; ROSSETTO, 2016), apesar que, para os mesmos autores, a cana-de-açúcar está entre as culturas mais tolerantes à acidez do solo.

Embora isto seja um fato, vários trabalhos tem demonstrado incrementos na produtividade da cultura. Silva et al. (2014b) verificou que a adição de doses crescentes de calcário proporcionou resposta positiva e linear sobre a produtividade de colmos da cana-de-açúcar. Outros estudos também apresentaram aumento de produtividade com o aumento da dose de corretivos na cultura (PRADO et al., 2003; BRASSIOLI; PRADO; FERNANDES, 2009). Por outro lado, são resultados contrastantes aqueles encontrados por Hermann (2005) e Leite et al. (2008), que não observaram efeito significativo de doses de corretivos sobre a produtividade da cana.

Segundo Rossetto et al. (2004), essas respostas da calagem sobre a produtividade da cultura pode ser obtida em duas situações: solo com baixa fertilidade e acidez elevada, com incrementos entre 8 e 13 t ha^{-1} em solos com característica de pH menor que 4,4; teores de Ca próximos a 6 $mmol_c$ dm^{-3} e de Mg a 1 $mmol_c$ dm^{-3}. O mesmo foi verificado por Silva et al. (2014b) onde os ganhos obtidos no trabalho, provavelmente, estão associados à melhoria das condições limitantes apresentadas pelo solo, como forte acidez (pH = 4,5) e elevado teor de Al trocável (Al = 18 $mmol_c$ dm^{-3}).

Os calcários usados nesta prática possuem baixa solubilidade, necessitando de adequado contato com as partículas do solo para reagir, sendo a sua incorporação às camadas mais profundas do solo de fundamental importância para a reação mais efetiva (PRADO, 2003).

A maioria dos trabalhos que avaliaram sistemas de preparo do solo em cana-de-açúcar (DIAS, 2001; BARBIERI; ALLEONI; DONZELLI, 1997; CAMILOTTI et al., 2005; DOMINGUES, 2012) não levam em conta as restrições químicas em subsuperfície. De acordo com Demattê (2005), uma das principais limitações dos solos na região tropical úmida é a baixa fertilidade em profundidade, refletindo em um menor volume explorado pelo sistema radicular e em baixas produtividades, sendo a ação corretiva do calcário restrita somente às camadas superficiais.

A incorporação mecanizada em profundidade é uma prática que pode estender o efeito da calagem (MEDA et al., 2002), pois possui a finalidade de ocasionar melhores condições químicas nas camadas mais profundas, o que reflete em um sistema

radicular mais desenvolvido aumentando, assim, a produtividade (MORELLI et al., 1987). Ainda segundo os mesmos autores, o sistema radicular bem desenvolvido poderia evitar o arranquio da touceira durante a colheita mecanizada.

Embora muitos estudos tenham sido realizados sobre a correção de acidez na cana-de-açúcar, não há consenso sobre esse assunto. Cabe ressaltar que as recomendações de calcário para a cultura foram desenvolvidas em sistema de preparo convencional e colheita com cana-de-açúcar queimada. Atualmente, a colheita da planta crua, já é uma realidade, e nesse novo cenário, com novos sistemas de preparo e colheita, praticamente não existem pesquisas com corretivos de acidez. Além disso, Raij (2008) ao analisar diversos resultados de estudos com calcário em cana-de-açúcar concluiu que as recomendações oficiais para a calagem, propostas por Spironello et al. (1996) e consideradas como as “recomendações oficiais para o Estado de São Paulo”, estão subestimadas para o sistema atual de cultivo dessa planta energética.

Com a introdução de novas tecnologias e sistemas de preparo do solo como, por exemplo, o preparo profundo em faixas que separa zonas de plantas e zonas de tráfego e realiza a aplicação de insumos em profundidade, há a necessidade de se verificar a viabilidade da aplicação do calcário apenas na faixa de preparo do solo, bem como, a profundidade e a dosagem de calcário a ser aplicada nesse novo sistema, e como esta pode afetar as emissões de gases de efeito estufa, pois, como já supracitado, é uma pratica que afeta diretamente os fluxos de GEE.

CAPÍTULO 1

EMISSÕES RESIDUAIS DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM FUNÇÃO DO PREPARO PROFUNDO DO SOLO E DA CALAGEM EM CANA-DE-AÇÚCAR

RESUMO: As práticas agrícolas, como o preparo do solo e a calagem, constituem-se ações antrópicas que aumentam os fluxos de gases de efeito estufa (GEE) (CO_2, N_2O, CH_4) no sistema solo-planta-atmosfera. O preparo convencional é o sistema mais utilizado em cana-de-açúcar e é caracterizado pela grande mobilização do solo aliado ao intensivo uso da mecanização agrícola que tem resultado no aumento das emissões destes gases, com consequentes perdas de carbono estocado no solo para atmosfera, além dos reflexos negativos na produtividade e longevidade do canavial. Alternativas de manejos que visem o menor revolvimento do solo e doses adequadas de calcário podem reduzir os impactos das operações agrícolas sobre os fluxos de GEE, aumentar os estoques de C no solo e a produtividade ao longo do tempo. Para tanto, o presente estudo teve por objetivo avaliar o efeito residual dos sistemas de preparo convencional (PC) sem e com aplicação de calcário em área total e preparo profundo em faixas (PP) sem e com aplicação de calcário na linha de cultivo, sobre as emissões de GEE no segundo ano de cultivo da cana-de-açúcar. O experimento foi realizado em solo de textura média, utilizando-se o delineamento experimental em blocos casualizados, com quatro repetições, sendo os dados submetidos à análise de variância ($p \leq 0,05$) e comparados pelo teste LSD ($p \leq 0,05$). Observou-se maior emissão acumulada de CO_2 no manejo PP com, e de N_2O nos manejos sem a aplicação de calcário, enquanto para o CH_4 não houve diferenças significativas, o qual atuou como fonte deste gás, porém com valores próximos a zero. O manejo PC com apresentou a maior emissão relativa de C equivalente (ERC) e alta produtividade, enquanto o PP com, obteve menor ERC, alta produtividade e maior estoque de carbono no solo em relação ao PC, demonstrando-se promissor em reduzir emissões relativas de GEE no segundo ano de produção da cana-de-açúcar.

Palavras-chave: Dióxido de carbono. Metano. Óxido nitroso. Preparo do solo. Calcário.

ABSTRACT: Agricultural practices, such as soil preparation and liming, are anthropic actions that increase the flow of greenhouse gases (GHG) (CO_2, N_2O, CH_4) in the soil-plant-atmosphere system. Conventional preparation is the most used system in sugarcane and is characterized by the great mobilization of the soil combined with the intensive use of agricultural mechanization, which has resulted in increased emissions of these gases, with consequent losses of carbon stored in the soil for the atmosphere, in addition to the negative effects on sugarcane productivity and longevity. Management alternatives that aim at less soil turnover and adequate limestone doses can reduce the impacts of agricultural operations on GHG flows, increase C stocks in the soil and increase productivity over time. To this end, the present study aimed to evaluate the residual effect of conventional tillage systems (PC) without and with application of lime in total area and deep preparation in bands (PP) without and with application of lime in the cultivation line, on GHG emissions in the second year of sugarcane cultivation. The experiment was carried out on medium textured soil, using a randomized block design with four replications, and the data were subjected to analysis of variance ($p \leq 0.05$) and compared by the LSD test ($p \leq 0.05$). There was a greater accumulated CO_2 emission in the PP management with, and N_2O in the management without the application of lime, while for CH_4 there were no significant differences, which acted as a source of this gas, however with values close to zero. The PC management showed the highest relative C emission (ERC) and high productivity. For the PP with, there was less ERC, high productivity and greater carbon stock in the soil compared to the PC, proving to be promising in reducing relative GHG emissions in the second year of sugarcane production.

Keywords: Carbon dioxide. Methane. Nitrous oxide. Soil preparation. Limestone

1.1 INTRODUÇÃO

As emissões de gases de efeito estufa (GEE) e seus impactos ao ambiente vem sendo motivo de interesse mundial no que tange as mudanças climáticas do planeta, atribuídas as crescentes concentrações de GEE na atmosfera, como: o dióxido de carbono (CO_2), o óxido nitroso (N_2O) e o metano (CH_4), que possuem fluxos intensificados pelas ações antrópicas desde a revolução industrial.

Embora as maiores emissões mundiais de GEE sejam provenientes do setor energético (WORLD RESOURCES INSTITUTE, 2016), estas também estão associadas aos processos antrópicos do setor agropecuário que, a nível nacional, atingem cerca de 30% das emissões totais (SEEG, 2017). Dentre as atividades que mais emitem GEE nesse setor, pode-se citar o manejo do solo, que ao ser submetido à elevada mobilização por contínuas práticas convencionais, aumentam os fluxos destes gases para a atmosfera (IAMAGUTI et al., 2015).

Como parte das funções naturais e serviços ecossistêmicos fornecidos pelos solos, um solo saudável (em equilíbrio químico, físico e biológico) armazena mais carbono do que aquele armazenado na atmosfera e na vegetação, combinados (CIAIS et al., 2013). No meio agrícola, a quantidade de C está fortemente correlacionada com a intensidade da ruptura e volume de solo perturbado pelos implementos de preparo (LA SCALA JR; BOLONHEZI; PEREIRA, 2006). De acordo com Lorenz e Lal (2018), solos cultivados do mundo perderam entre 25 a 75% de seu estoque original de carbono, que foi liberado na atmosfera na forma de CO_2, principalmente devido ao manejo insustentável provenientes de práticas que resultam na degradação da terra e amplificam as mudanças climáticas e seus impactos.

A degradação do solo reduz a capacidade deste em manter e armazenar carbono, contribuindo para ameaças globais, como o aquecimento global, com um custo estimado de trilhões de dólares a cada ano (DAVIES, 2017). O sistema de produção da cana-de-açúcar, com manejo tipicamente convencional e cultivo altamente mecanizado que afetam as propriedades do solo acelerando a oxidação do carbono orgânico com consequentes liberações em altas quantidades de GEE (LA SCALA JR; BOLONHEZI; PEREIRA, 2006), vem sofrendo esses efeitos ao longo do tempo, respondendo com produtividades abaixo de seu potencial produtivo, o qual pode atingir cerca de 200 Mg ha^{-1} (ALBUQUERQUE; SILVA, 2008).

O manejo apropriado do solo pode resultar em significativa redução na emissão de GEE, onde sistemas de plantio em que há o mínimo revolvimento e os resíduos culturais são retidos sobre o solo aumentam o estoque de C nas camadas mais superficiais (MOITININHO et al., 2013). Dessa forma, a restauração do armazenamento de carbono no solo em sistemas agrícolas pode, além de remover o CO_2 da atmosfera, melhorar a produção sustentável da agricultura, uma vez que o sequestro de carbono também está relacionado com as funções e propriedades dos solos que levam ao aumento da produtividade (DELGADO et al., 2011).

Outros fatores como a aplicação de calcário no solo também podem aumentar as emissões de GEE para a atmosfera, visto que ao se elevar o pH, consequentemente há melhorias nas propriedades químicas do solo, as quais propiciam condições favoráveis à intensificação da ação microbiona edáfica e a rápida decomposição da matéria orgânica (MIJANGOS et al., 2010; ARANTES et al., 2011). As reações químicas do calcário no solo, da mesma forma, contribuem para os fluxos de GEE, onde o carbonato ao ser dissolvido resulta na liberação de CO_2 e água (FUENTES et al., 2006), propiciando também emissões residuais ao longo do tempo (MARCELO; CORÁ; LA SCALA JR, 2012).

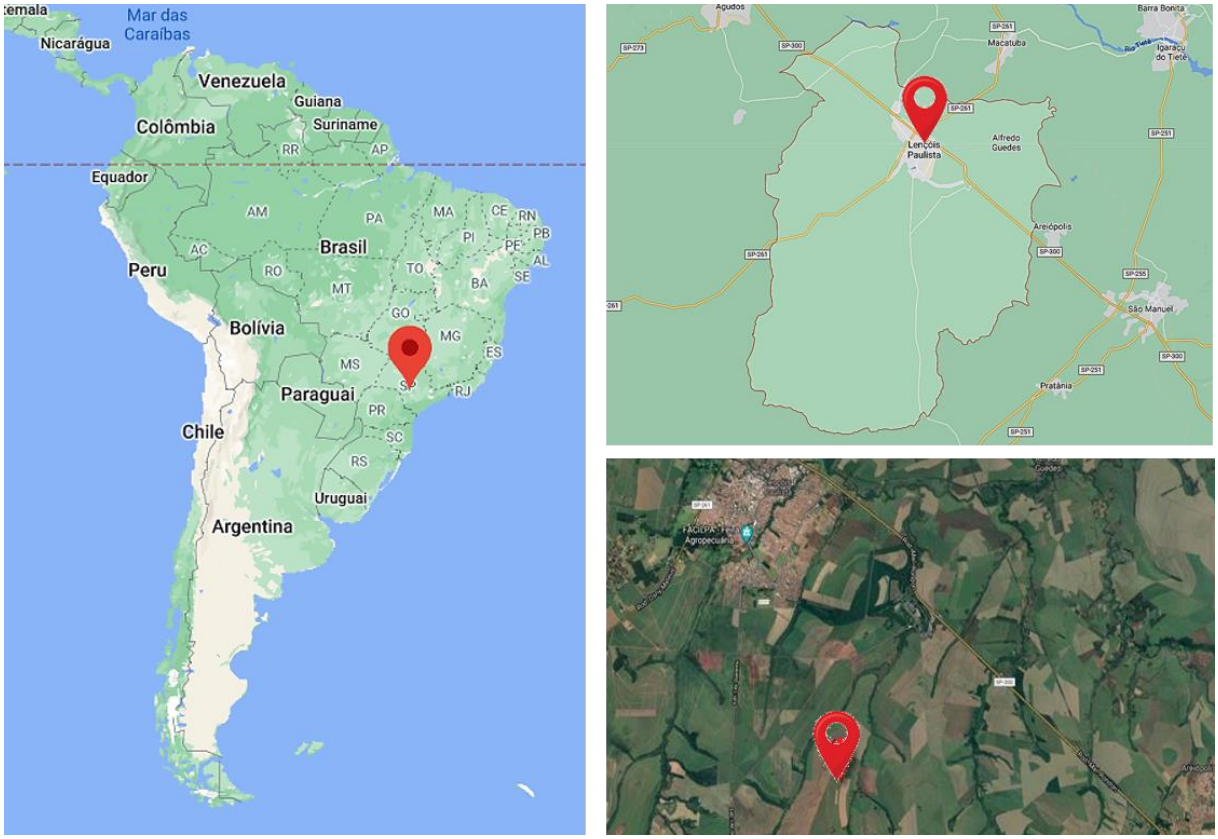
Embora práticas agrícolas como o preparo do solo e a calagem possam aumentar as emissões de GEE, estas podem ter seus impactos minimizados com o correto manejo do solo em cana a partir da adoção de práticas conservacionistas como o preparo profundo em faixas, tanto a curto como a longo prazo, com emissões relativas menores, maiores estoques de carbono no solo, considerando a possibilidade de maior produtividade de colmos por hectare. Assim, o presente estudo teve por objetivo, avaliar o efeito residual dos sistemas de preparo convencional e preparo profundo em faixas, com e sem a aplicação de calcário, sobre as emissões de gases de efeito estufa no segundo ano de cultivo da cana-de-açúcar.

1.2 MATERIAL E MÉTODOS

1.2.1 Local do experimento e caracterização da área

O experimento foi implantado em março de 2017 em área de reforma de canavial pertencente à Usina Barra Grande, grupo Zilor, situada no município de Lençóis Paulista – SP, com localização geográfica a 22°40’22.4’’ latitude sul e 48°46’30.6” longitude oeste, altitude média de 651 m (Figura 1). O solo foi classificado como Latossolo Vermelho (EMBRAPA, 2013) de textura média.

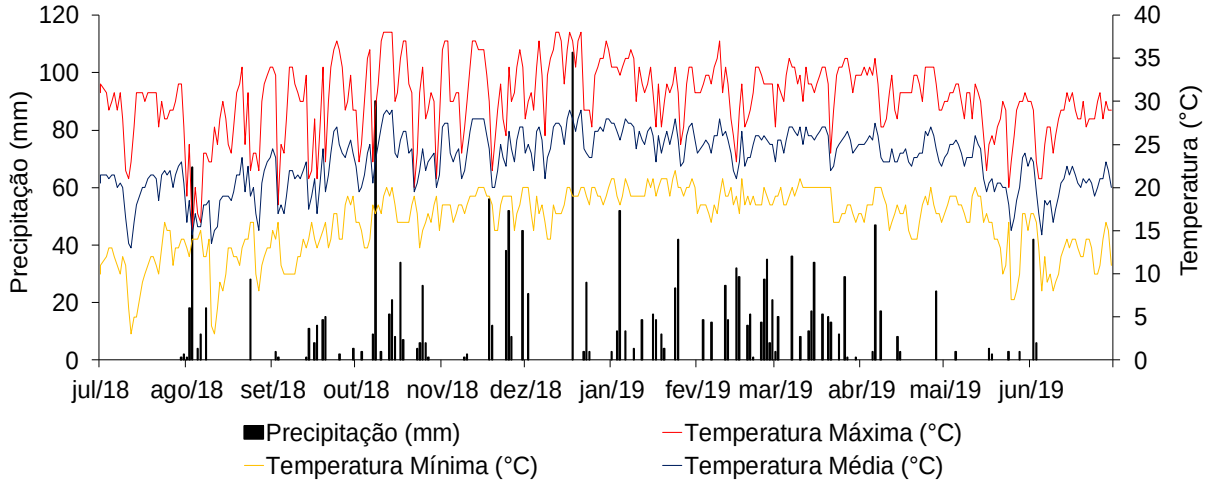
Figura 1 – Localização da área experimental pertencente à Usina Barra Grande (Grupo Zilor) no município de Lençóis Paulistas - SP, Brasil



Fonte: google maps

De acordo com a classificação climática de Köppen, o clima da região se caracteriza como tropical tipo Cwa, com temperatura média anual de 20,5°C, mínima de 4°C e máxima de 38°C. A precipitação concentra-se entre os meses de setembro a março, com total anual de 1258 mm. A representação dos dados termopluviométricos no período de realização do experimento estão apresentados na figura 2.

Figura 2 – Temperaturas média, máxima, mínima e precipitação durante o segundo ano de cultivo da cana-de-açúcar, correspondente ao período entre julho de 2018 a junho de 2019, Lençóis Paulistas, SP



1.2.2 Instalação e condução do experimento

Para a determinação das características químicas (RAIJ et al., 2001), físicas e granulométricas do solo (EMBRAPA, 1997), foram coletadas na área experimental 12 amostras representativas nas profundidades de 0,0-0,2; 0,2-0,4; 0,4-0,6; 0,6-0,8 e 0,8-1,0 m. Os resultados estão apresentados na tabela 1 e 2, respectivamente.

Tabela 1 – Características químicas do solo em Latossolo Vermelho (LV) de textura média antes da implantação do experimento, Lençóis Paulistas, SP

Atributos químicos									
Camadas (m)	pH $CaCl_2$	MO g dm^{-3}	Ca	Mg	K	Al3+	H+Al	CTC	SB
			$mmol_c$ dm^{-3}						
0,0-0,2	5,0	12	18	6	3	2	29	56	27
0,2-0,4	4,8	13	16	4	2	3	32	55	22
0,4-0,6	4,6	13	9	3	2	4	28	42	14
0,6-0,8	4,4	8	6	2	1	8	30	40	9
0,8-1,0	4,3	9	5	2	1	9	31	39	8
Camadas (m)	P	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn	m	V
	mg dm^{-3}							%	
0,0-0,2	7	10	0,3	0,7	27,2	2,8	0,8	8	47
0,2-0,4	6	15	0,3	0,7	24,6	1,6	0,6	12	42
0,4-0,6	3	21	0,3	0,6	15,2	0,7	0,4	22	34
0,6-0,8	3	32	0,3	0,6	11,3	0,4	0,3	43	25
0,8-1,0	3	53	0,3	0,5	10,4	0,4	0,3	52	21

Tabela 2 – Características físicas e granulométricas do solo em Latossolo Vermelho (LV) de textura média antes da implantação do experimento, Lençóis Paulistas, SP

Granulometria e atributos físicos							
Camadas (m)	Areia	Argila	Silte	DMG	DMP	Agreg>2mm	IEA
	---------- g kg^{-1} ----------			------ mm ------		------ % ------	
0,0-0,2	833	136	31	0,89	1,90	30,9	81,9
0,2-0,4	812	147	41	0,47	0,96	11,4	77,0
0,4-0,6	789	179	32	0,55	1,10	13,8	77,8
0,6-0,8	783	179	38	0,48	0,98	11,4	73,6
0,8-1,0	767	201	32	0,50	1,02	11,7	76,8
Camadas (m)	Pt	Macro	Micro	Ds			
	---------- m^3m^{-3} ----------			g cm^{-3}			
0,0-0,2	0,32	0,09	0,23	1,85			
0,2-0,4	0,32	0,08	0,24	1,84			
0,4-0,6	0,38	0,11	0,27	1,8			
0,6-0,8	0,39	0,17	0,22	1,65			

DMG = Diâmetro médio geométrico; DMP = Diâmetro médio ponderado; Agreg > 2mm = agregados > 2mm; IEA = Índice de estabilidade de agregados; Pt = porosidade total; Macro = macroporosidade; Micro= microporosidade; Ds = densidade do solo.

1.2.3 Tratamentos e delineamento experimental

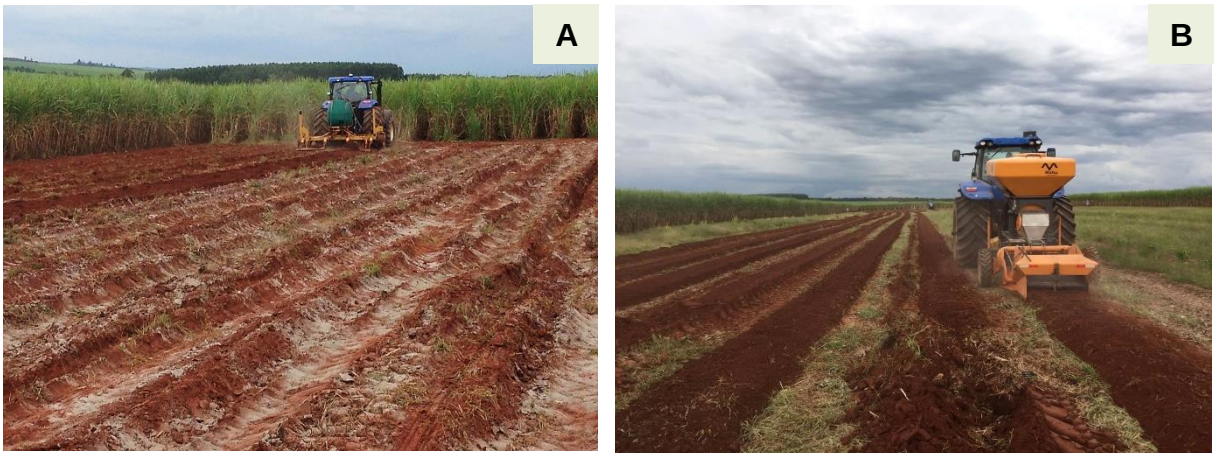
O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, com quatro repetições e quatro tratamentos: Preparo convencional (PC) padrão/controle sem aplicação de calcário e PC com o dobro da dose recomendada (5,2 Mg ha^{-1}); Preparo Profundo em Faixas com Haste Subsoladora e Enxada Rotativa (PP) sem aplicação de calcário e PP com o dobro da dose recomendada (5,2 Mg ha^{-1}).

As operações realizadas no sistema PC constaram de uma gradagem aradora de arrasto com 28 discos recortados, com espaçamento entre discos de 0,28 m e profundidade de trabalho a 0,25 m, seguida da aplicação de calcário em área total. Posteriormente, realizou-se a subsolagem utilizando equipamento com quatro hastes espaçadas a 1,5 m, com profundidade de trabalho a 0,4 m (Figura 3A) e, por último, mais uma gradagem.

No PP, utilizou-se o equipamento denominado Penta (Figura 4), o qual possui uma haste subsoladora que trabalha a 0,8 m de profundidade em conjunto com uma enxada rotativa que opera a 0,4 m. O preparo profundo do solo e a aplicação de calcário ocorreu somente nas faixas de cultivo (zonas com plantas) mantendo as zonas de tráfego sem revolvimento. Isto devido ao controle de tráfego realizado via

GPS, que separa as duas zonas e mantém a máquina em linha permanente a partir do sistema de piloto assistido (piloto automático) (Figura 3B). Nesse preparo foram aplicadas ¾ da dose recomendada do calcário na superfície do solo seguida de incorporação, e ¼ da dose restante nos filetes localizados na parte posterior da haste subsoladora, com saídas à 0,4 e 0,8 m de profundidade.

Figura 3 – Calcário em área total e operação de subsolagem no sistema de Preparo Convencional (A); Operação de canteirização pelo equipamento Penta no sistema Preparo Profundo (B), Lençóis Paulista, SP, 2017



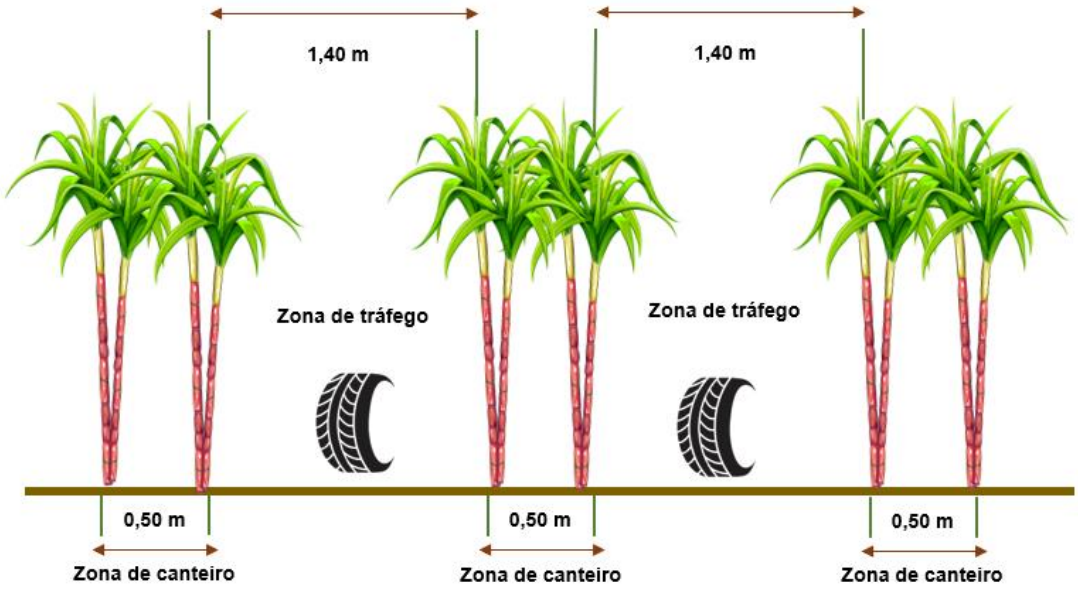
Fotos: Erilene Romeiro Alves (2017)

Figura 4 – Equipamento Penta Hidro 3, efetua cinco funções em uma única operação

Fonte: Mafes Agromecânica

As unidades experimentais (faixas) foram constituídas por 10 linhas de 20 m de comprimento com espaçamento duplo alternado de 1,4 × 0,5 m entre linhas (Figura 5).

Figura 5 – Espaçamento duplo alternado em cana-de-açúcar



Fonte: autor

1.2.4 Calagem

A partir da análise do solo efetuada antes da instalação do experimento (Tabela 1), foram calculadas as doses de calcário de acordo com as recomendações propostas por Spironello et al. (1996), equação 1:

$$\mathrm{NC} = \mathrm{CTC} \times (\mathrm{V2} - \mathrm{V1})/10 \times \mathrm{PRNT} \quad (1)$$

Onde:

NC = Necessidade de calagem (t ha^{-1});
V2 = Saturação por bases a atingir (60% para a cana-de-açúcar);
V1 = Saturação por bases atual
CTC = capacidade de troca de cátions ($mmol_c$ dm^{-3});
PRNT = poder relativo de neutralização total do calcário a ser utilizado.

Amostras de calcário foram coletadas e enviadas ao laboratório para determinação dos níveis de CaO, MgO, Reatividade, Poder de Neutralização e PRNT expostos na tabela 3. A quantidade de calcário aplicada foi obtida considerando o somatório das quantidades recomendadas para as camadas 0,0-0,2 e 0,2-0,4 m e aplicando-se o dobro da dose obtida para elevar a saturação por bases a 60%, de acordo com Spironello et al. (1996).

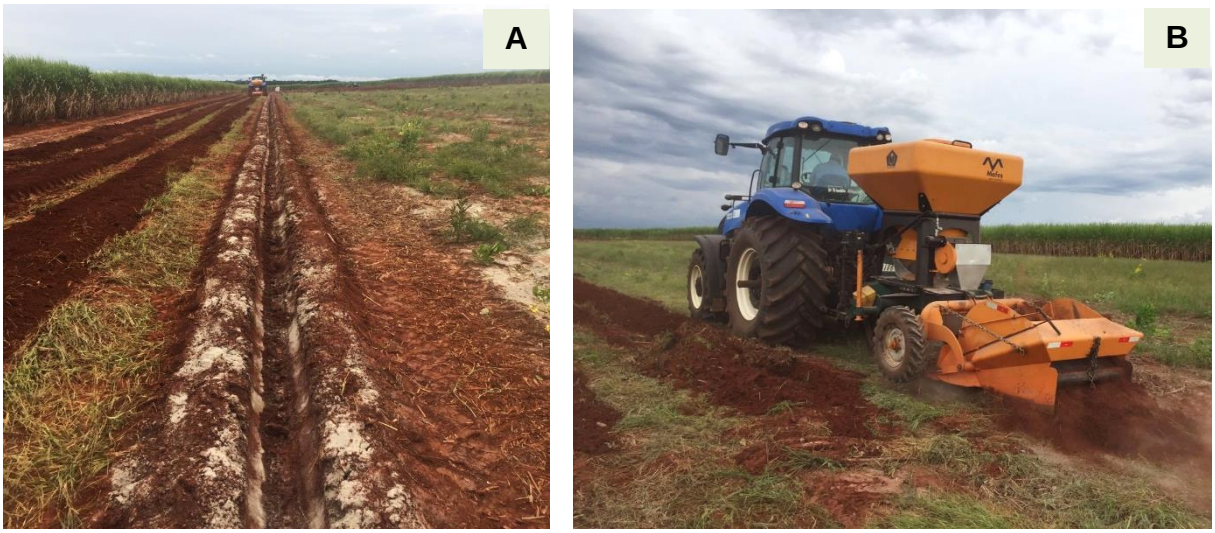
No sistema PC, foram aplicadas doses de 5,2 Mg ha^{-1} em área total, enquanto que no PP aplicou-se 3,9 Mg ha^{-1} em superfície apenas nas linhas de plantio (zona de canteiro) (Figura 6A) com posterior incorporação a 0,4 m, e o restante da dose de 1,3 Mg ha^{-1} posto em profundidade nas camadas entre 0,4 e 0,8 m (Figura 6B).

Tabela 3 – Característica do calcário aplicado em Latossolo Vermelho (LV) de textura média, Lençóis Paulistas, SP, 2017

Solo	CaO	MgO	Reatividade	PN*	PRNT**
			%		
Latossolo Vermelho (LV)	24	15	88	79	70

PN* = Poder de Neutralização ou Equivalente em $CaCO_3$. **PRNT = Poder Relativo de Neutralização Total

Figura 6 – Calcário em superfície aplicados nas zonas de canteiros do sistema Preparo Profundo (A); Aplicação de calcário nas profundidades 0,4 a 0,8 m pelo implemento Penta (B), Lençóis Paulistas, SP, 2017



Fotos: Erilene Romeiro Alves (2017)

1.2.5 Plantio da cana-de-açúcar e tratos culturais

Após o período de reação do calcário (3 meses), foi realizado o plantio mecanizado da cana-de-açúcar no dia 17/03/2017, utilizando 18 gemas viáveis m^{-1} na profundidade de 0,3-0,4 m da variedade RB966928. Para a adubação nos sulcos de plantio foram aplicados 800 kg ha^{-1} do formulado 04-20-15 (NPK). Os toletes foram tratados com 330 mL ha^{-1} do inseticida Singular (Fipronil), 5,0 L ha^{-1} do inseticida nematicida Pottente (Benfuracarbe) e 500 mL do fungicida Comet (Piraclostrobina), além de 100 L ha^{-1} de microgeo.

Após a colheita mecanizada da cana planta foram realizados os seguintes tratos culturais: na primeira soqueira, aos 15 dias após a colheita (agosto de 2018), foi realizada a aplicação em cobertura de 600 kg ha^{-1} do fertilizante formulado 22-00-30, 1,5 kg ha^{-1} do herbicida Dinamic (Amicarbazona), 1,0 kg ha^{-1} do herbicida Dontor (Picloram + 2,4-D) e 3,0 L ha^{-1} do herbicida Gamit 360 CS (Clomazona).

1.2.6 Avaliações

1.2.6.1 Coleta de Gases de Efeito Estufa (GEE)

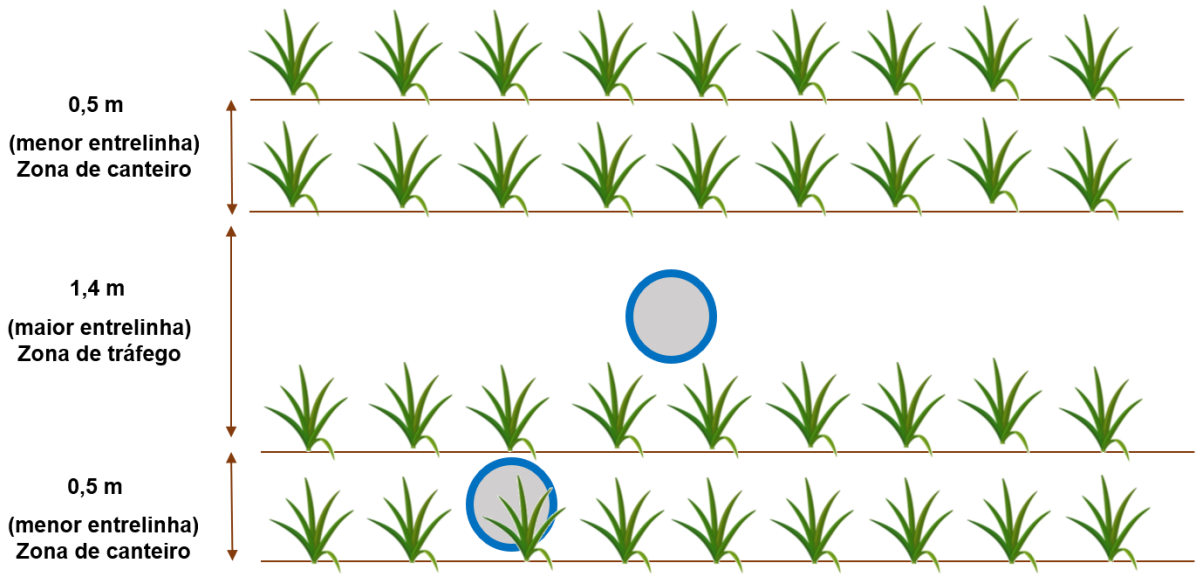
Para o presente trabalho, foram realizadas coletas de GEE (CO_2, CH_4 e N_2O) a partir do segundo ano de cultivo da cana-de-açúcar (após primeiro corte), compreendendo os períodos entre 06/07/2018 a 18/06/2019.

Foram utilizadas câmaras de acordo com a metodologia descrita por Varner et al. (2002), constituídas por uma base cilíndrica confeccionadas a partir de policloreto de vinila (PVC) com área de 0,0707 m^2, dimensões de 0,2 m de altura x 0,3 m de diâmetro e tampas de 0,1 m de altura para vedação (Figura 7). A fim de manter a temperatura e pressão interna das câmaras igual à do ambiente externo, foram colocadas válvulas produzidas manualmente na parte superior das tampas, por onde também se executou as coletas dos gases.

Figura 7 – Câmaras de policloreto de vinila (PVC) com tampas para vedação, Lençóis Paulista, SP, 2018

A profundidade de penetração da base no solo foi de aproximadamente 2-3 cm, e sua fixação na superfície se deu através de movimentos rotacionais, visando minimizar alterações no material orgânico e assegurar boa vedação. As câmaras foram distribuídas nas parcelas posicionando uma no centro da linha com cana-de-açúcar e outra no centro da zona de tráfego (Figura 8). Estas ficaram fixadas durante todo o experimento, de modo a permitir a amostragem de gases no mesmo local.

Figura 8 - Posicionamento das câmaras nas parcelas para avaliação das emissões de gases de efeito estufa, na linha com cana-de-açúcar e no centro da zona de tráfego, Lençóis Paulistas, 2018



Fonte: autor

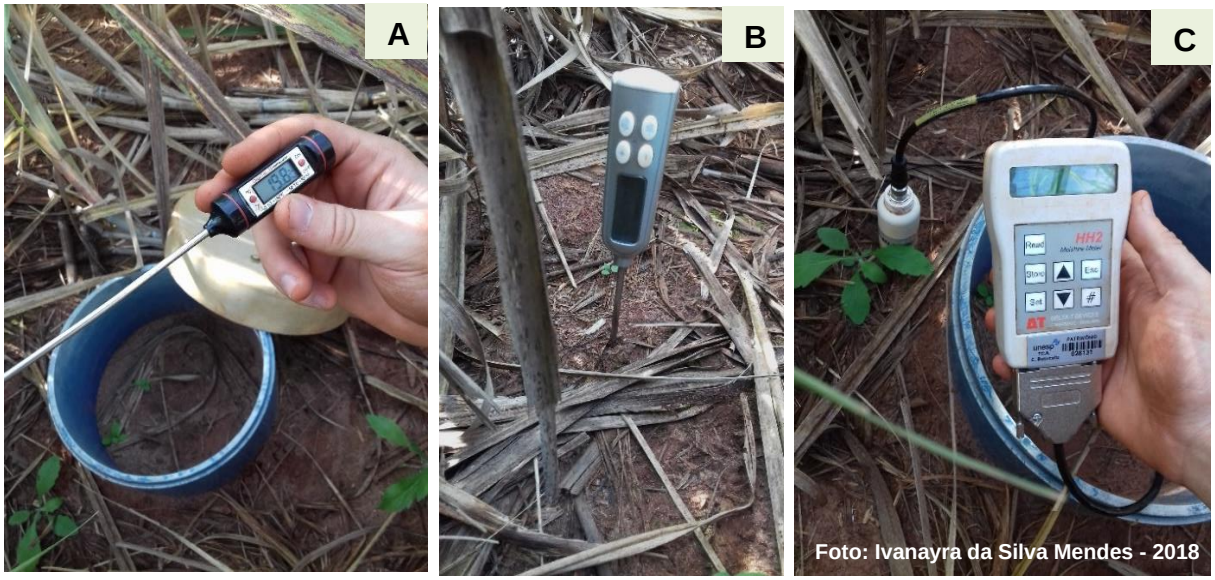
As coletas de GEE ocorreram nos 2°, 6°, 13°, 20°, 41°, 57° (primeira coleta após adubação de cobertura), 70°, 84°, 98°, 109° (primeira coleta após replantio nas falhas), 112°, 123°, 126°, 129°, 140°, 156°, 166°, 193°, 196°, 201°, 204°, 224°, 229°, 232°, 258°, 273°, 279°, 293°, 307°, 321°, 338° e 349° dias após o primeiro corte da cana-de-açúcar. Foram acrescidos maior número de coletas durante os meses em que se esperava uma maior atividade da microbiota do solo, como logo após a colheita da cana planta, adubação de cobertura e meses quentes/chuvosos (outubro, novembro, dezembro, janeiro e fevereiro). Com relação aos meses mais secos (abril, maio, junho, julho, agosto e setembro) as coletas passaram a ser efetuadas sempre a cada quinze dias.

As amostras foram coletadas utilizando seringa de polipropileno de 60 mL acopladas com agulha de 0,7 x 30 mm e torneira de 3 vias, sendo o gás obtido das câmaras injetado em frascos de vidro de 30 mL, previamente submetido à vácuo, vedados com lacres de alumínio e tampas de borracha. Em cada câmara (na linha com plantas e na zona de tráfego), foram coletadas três amostras: a primeira no minuto inicial após o fechamento das câmaras, a segunda e a terceira após 20 e 40 minutos, respectivamente (Figura 9).

Figura 9 – Coleta das amostras de Gases de Efeito Estufa, Lençóis Paulista, SP, 2018

A altura de cada câmara foi mensurada em três pontos da base do solo até sua superfície, antes do início da coleta, para fins de determinação do volume aproximado de cada câmara. Também foram determinadas as temperaturas do ar (Figura 10A) e do solo utilizando-se termômetro digital (Figura 10B), e a umidade superficial do solo (Figura 10C) em pontos próximos das câmaras.

Figura 10 – Medição da temperatura do ar (A); temperatura do solo (B); e umidade do solo (C), Lençóis Paulistas, SP, 2018



As amostras coletadas foram encaminhadas para análise no Laboratório de Relações Solo-Planta da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" – Faculdade de Ciências Agronômicas, campus Botucatu-SP. A determinação das concentrações dos GEE foi realizada em cromatógrafo gasoso Shimadzu GC-2014, equipado com uma coluna empacotada, um detector de captura de elétrons (ECD) para análise de N_2O e um detector de ionização de chama (FID) para determinação de CO_2 e CH_4. O fluxo de cada GEE foi determinado de acordo com a equação 2.

$$\text{Fluxo} = \frac{\text{GEE}}{\Delta t} \times \frac{V}{A} \times m \times \frac{P}{T \times R} \qquad (2)$$

Onde:

Fluxo = expresso (µg GEE m^{-2} h^{-1});

$\Delta GEE/\Delta t$ = variação da concentração de cada GEE no interior da câmara no tempo da coleta (µmol mol^{-1} h^{-1});

V = volume da câmara (m^3);

A = área da câmara (m^2);

m = peso molecular do gás (44,01; 16,042 e 44,0128 g mol^{-1} para CO_2, CH_4 e N_2O, respectivamente);

P = pressão atmosférica (atm);

T = temperatura do solo em Kelvin (K);

R = constante dos gases ideais (0,082 atmL mol^{-1} K^{-1}).

Foram calculadas e obtidas as emissões diárias de C-CO_2, C-CH_4 e N-N_2O por coleta pela média dos fluxos de cada tratamento e a emissão total (acumulada) dos GEE no ciclo anual da cultura foi determinada por integração de curvas para cada tratamento utilizando o programa Origin 7.0, e estas convertidas em kg ha^{-1} de C equivalente.

1.2.6.2 Estoque de Carbono (C) e Nitrogênio (N) no solo

As avaliações de estoque de C e N no solo foram realizadas logo após a colheita da cana-de-açúcar (após segundo corte, dia 03 de julho de 2019). Foram coletadas amostras das camadas 0,0-0,2, 0,2-0,4, 0,4- 0,6, 0,6-0,8 e 0,8-1,0 m de profundidade, em cada parcela, com o auxílio de trado tipo sonda (Figura 11A) no centro da maior e da menor entrelinha (zonas de canteiro e tráfego). Para cada profundidade, coletaram-se quatro subamostras, as quais foram acondicionadas em sacos plásticos devidamente identificados e levadas ao laboratório, onde foram secadas ao ar, passadas em peneira com malha de 2 mm, moídas em moinho de bolas, pesadas e, em seguida, submetidas à determinação dos teores de C-orgânico total por meio do analisador elementar automático (Modelo TruSpec™ CHNS, da LECO®) (SWIFT,1996) (Figura 11).

O estoque de C no solo foi obtido de acordo com a equação 3:

$$\text{Estoque} = \text{d} \times \mu \times \text{e} \qquad (3)$$

Onde:

Estoque = estoque de C no solo (Mg ha^{-1});

d = densidade aparente do solo na camada estudada (g cm^{-3});

μ = teor de C no solo (%);

e = espessura da camada estudada (cm).

Os dados de estoque de C foram corrigidos conforme metodologia de Ellert e Bettany (1995).

Figura 11 – Coleta de amostras do solo (A); amostras acondicionadas (B), secagem (C); moinho de bolas (D); pesagem (E); equipamento CHNS (F)

1.2.6.3 Emissão Relativa de Carbono Equivalente (ERC)

As emissões acumuladas de CH_4 e N_2O foram convertidas em equivalente carbono (Ceq) e somadas com a emissão acumulada de CO_2. Para tanto, levou-se em consideração o potencial relativo de aquecimento global de 28 e 265 vezes para os gases CH_4 e N_2O, respectivamente, sendo o CO_2 considerado como gás referência (IPCC, 2014). Os cálculos para a conversão das emissões de C-CH_4 e de N-N_2O em C-equivalente (Ceq) estão expressos nas equações 4 e 5 (PAVEI, 2005).

- 1 kg CH_4 = 10,18 kg de CO_2
- 1 kg N_2O = 113,57 kg de CO_2

$$\text{C-eq}(CH_4) = CH_4 \text{ x } (16/12) \text{ x } 28 \text{ x } (12/44) \quad (4)$$

$$\text{C-eq}(N_2O) = N_2O \text{ x } (44/28) \text{ x } 265 \text{ x } (12/44) \quad (5)$$

A partir dos dados de Ceq e também da produtividade de colmos foi obtida a ERC, utilizando-se a equação 6, sendo os resultados expressos em kg Ceq Mg de colmos produzido:

$$\text{ERC} = \frac{\text{produtividade de colmos}}{\text{C equivalente}} \quad (6)$$

1.2.6.4 Produtividade

A produtividade de colmos (Mg ha^{-1}) foi avaliada ao final dos 12 meses do segundo ano de cultivo da cana-de-açúcar, o qual ocorreu por colheita mecanizada e pesagem a partir de transbordo equipado com célula de carga.

1.2.6.5 Análise estatística

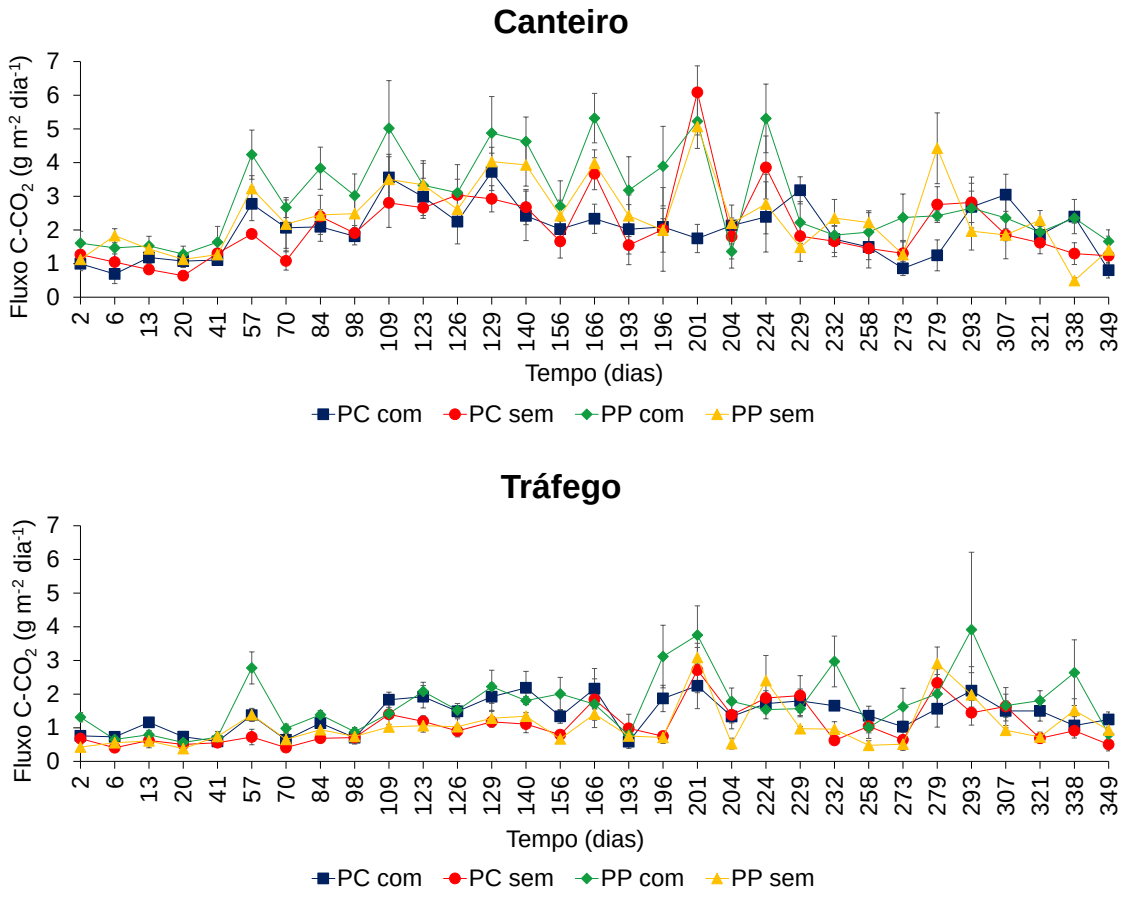
Todos os dados foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste LSD à 5% de probabilidade, com o auxílio do programa estatístico Sisvar 4,2 (FERREIRA, 2011).

1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

1.3.1 Fluxos de CO_2

Os resultados para os fluxos diários de CO_2 nas zonas de cultivo e tráfego, conforme cada tratamento, estão apresentados na Figura 12. Comparando-se as emissões nas zonas de canteiro e tráfego, observou-se que os fluxos de CO_2 foram consideravelmente maiores nas entrelinhas de cultivo, variando entre 0,7 a 6,1 g m^{-2} dia^{-1}. Farhate (2015) ao avaliar diferentes manejos do solo, verificou emissões entre 8 a 43,3% superiores na linha da cultura em relação à entrelinha de tráfego. Tal fato pode estar associado ao metabolismo radicular das plantas, onde as maiores emissões de CO_2 estão ligadas, principalmente, a respiração das raízes podendo chegar a 60% em solos agrícolas (ZHI-MIN et al., 2013).

Figura 12 – Fluxo de CO_2 (g m^{-2} dia^{-1}) na zona de canteiro e zona de tráfego em função do Preparo do solo Convencional (PC) e Preparo Profundo (PP), com e sem aplicação de calcário após primeiro corte da cana-de-açúcar



Segundo Otto et al. (2009), são encontradas maior volume de raízes nas camadas mais próximas à superfície do solo e do centro das plantas de cana-de-açúcar. Geralmente encontra-se pequena quantidade de raízes metabolicamente ativas entre as linhas de tráfego da cultura.

As emissões de todos os tratamentos praticamente se igualaram nas coletas iniciais, com aumento dos fluxos observado a partir dos 50 dias após o primeiro corte da cana-de-açúcar nas zonas de cultivo, quando foi realizada a adubação de cobertura na cultura. Apesar de ser uma prática recorrente e de grande necessidade, a fertilização dos solos, com consequente disponibilidade dos nutrientes via mineralização, ocasiona um ambiente propício à atividade microbiana, o que pode resultar em aumento nas emissões de CO_2 (BRADY; WELL, 2008; SIGNOR, 2010).

A maior emissão foi verificada aos 200 dias para a maioria dos tratamentos, correspondendo ao final da primeira fase de crescimento lento da cana-de-açúcar e

ao mês de janeiro, período caracterizado por clima quente e úmido, o que favorece maiores emissões, chegando a atingir um pico de 6,1 g m^{-2} dia^{-1}.

Condições favoráveis de variáveis climáticas como umidade e temperatura também podem influenciar diretamente nas taxas metabólicas dos microrganismos do solo, ocasionando variações diárias nos fluxos deste gás (PANOSSO et al., 2009; TEIXEIRA; LOPES; LA SCALA JR, 2010; SILVA-OLAYA et al., 2013). Vários trabalhos observaram correlação positiva entre umidade e temperatura do solo com os fluxos de CO_2 (LA SCALA JR; BOLONHEZI; PEREIRA, 2006; TEIXEIRA et al., 2011; MOITINHO, 2013).

As elevações nos fluxos ocorreram, principalmente, quando o solo apresentava conteúdo de umidade variando entre 5,3% a 17,5%, logo após os 41 dias, coincidindo também com o início do aumento das precipitações (mês de agosto), as quais se mostraram bem uniformes nos períodos quentes e chuvosos (Figuras 13 e 14). Como a cana-de-açúcar não é irrigada, a precipitação possui influência direta em seu desenvolvimento e na dinâmica do CO_2, onde a limitação da água influencia a respiração do solo via microrganismos e a produtividade vegetal via respiração radicular (REICHSTEIN et al., 2003).

Também foram observados maiores fluxos quando houve aumento na temperatura do solo (médias entre 21 e 27°C) (Figura 13), valores estes que estão dentro dos encontrados por La Scala Jr, Bolonhezi e Pereira (2006), Panosso et al. (2009) e Silva-Olaya et al. (2013). Com exceção aos 166 dias, em que ocorreu aumento mesmo em baixo teor de umidade (2,6%), entretanto, em temperatura do solo muito elevada (31°C). Solos tropicais possuem a tendência de alcançar altas temperaturas, onde a umidade do solo se torna um grande fator limitante para a respiração (MOHANTYA; PANDA, 2011). Rigon et al. (2017), em experimento sob plantio direto na produção de soja em região tropical, observou condições ideais de temperatura do solo para os fluxos de CO_2, entre 30 e 35°C, contudo, verificou emissões baixas devido à baixa umidade do solo nas datas de coleta que prejudicou a atividade microbiana, gerando um pulso nos fluxos deste gás após o umedecimento do solo aos 30°C. Segundo Tavares et al. (2015), a temperatura considerada favorável para que a ação da microbiota edáfica ocorra gira em torno de 30°C.

Figura 13 – Dados médios de temperatura e umidade do solo em cada coleta de gases de efeito estufa, Lençóis Paulista, SP, 2019

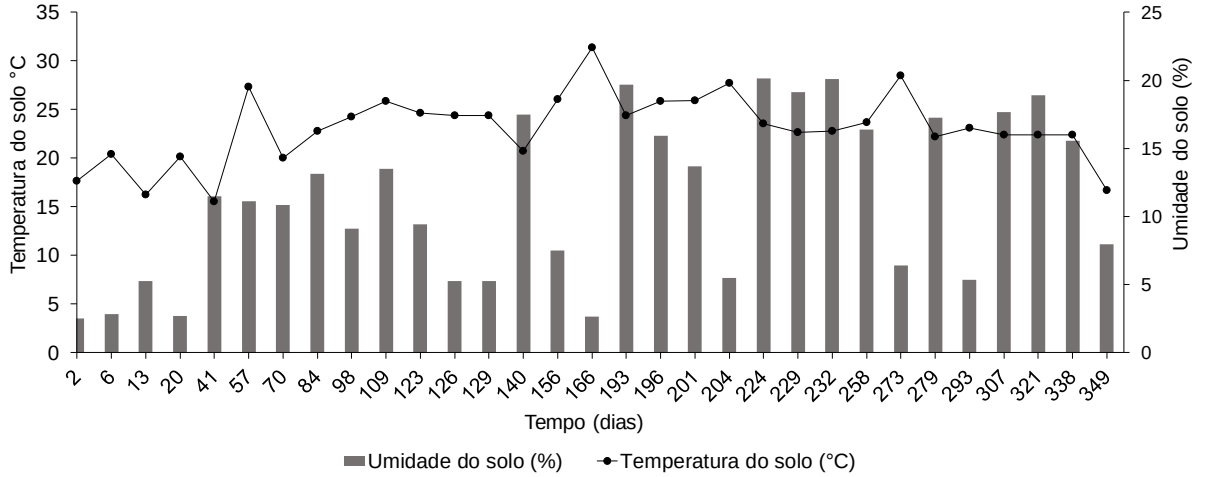
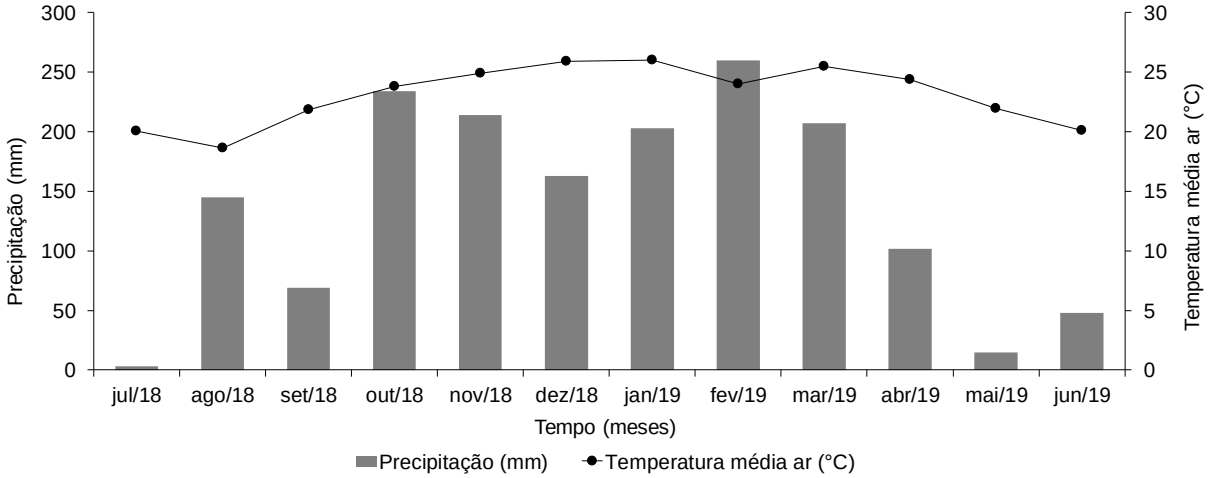


Figura 14 – Dados médios mensais de precipitação e temperatura do ar durante período experimental, Lençóis Paulistas, SP, 2019



Os maiores fluxos foram verificados principalmente no tratamento PP com por um longo período (Figura 12), o que pode estar relacionado também com a mobilização profunda e pela ação da enxada rotativa que possui uma ação de desestruturação e pulverização maior no solo, aliada a aplicação de calcário, ambos realizado de forma localizada na zona de cultivo. Em curto prazo, o revolvimento do solo via preparo configura-se um fator determinante para a variação dos fluxos de CO_2 (MORELL et al., 2010), pois a atividade microbiana do solo tende a ser intensificada devido à elevação da oxigenação e da temperatura do solo, e ao carbono protegido no interior dos agregados que se torna exposto, facilitando sua ação (SCHWARTZ; BAUMHARDT; EVETT et al., 2010). Entretanto, este efeito a longo prazo, como verificado no segundo ano de cultivo da cana-de-açúcar neste trabalho,

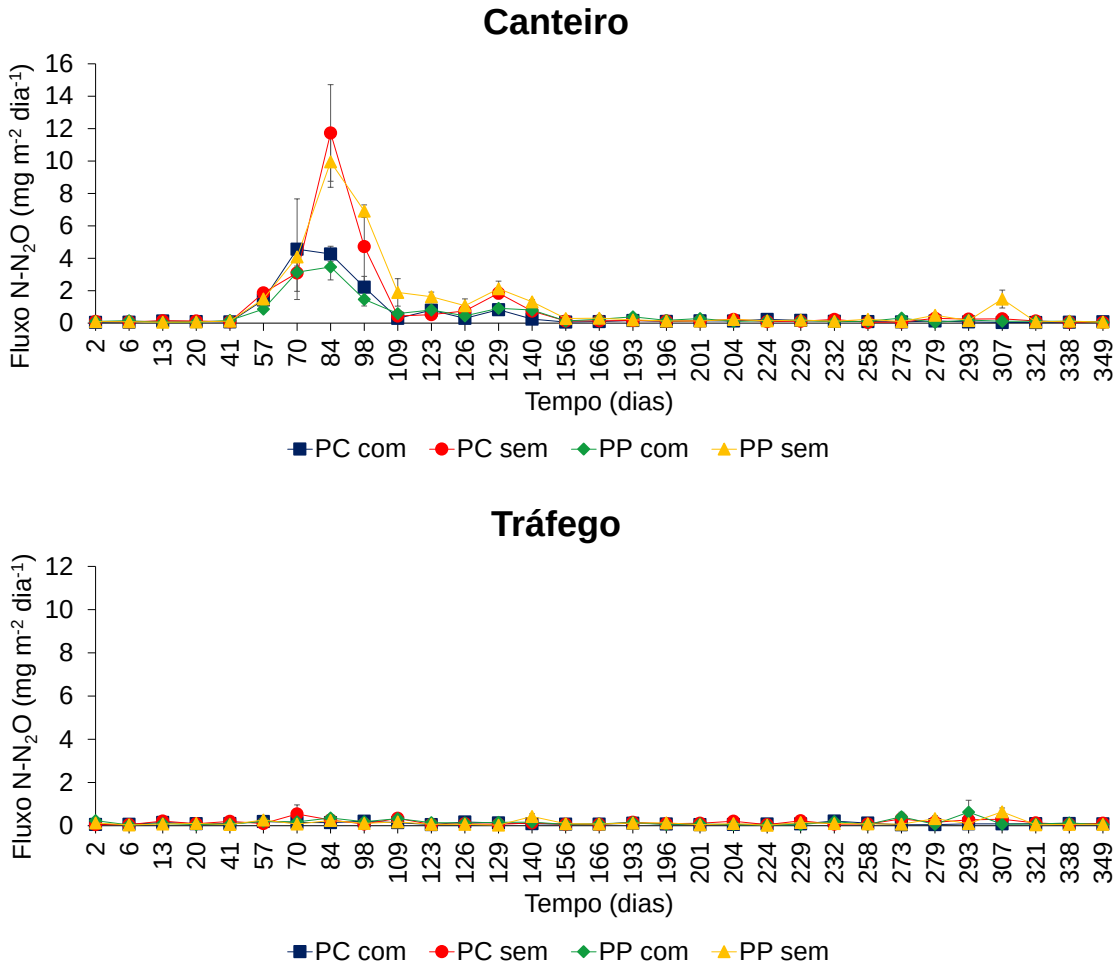
aparentemente pode estar mais associado às mudanças nas propriedades do solo ao longo do tempo, especialmente alterações em sua estrutura (KASPER et al., 2009).

Além disso, mudança nos fluxos de CO_2 podem ser claramente observadas quando o calcário agrícola é aplicado ao solo (FIGUEIREDO, 2012). Isto se dá principalmente pela hidrólise do carbonato de cálcio ($CaCO_3$) e, em seguida, pela melhoria das condições químicas do solo após a calagem, que também intensifica a atividade microbiana (CHAN; HEENAN, 1998; ADACHI et al., 2009). Ao avaliar a influência em longo prazo da calagem sobre a respiração do solo, Marcelo, Corá e La Scala Jr (2012), verificaram que a taxa de emissão de CO_2 do solo aumentou linearmente com o aumento das doses de calcário, mesmo dois anos após a calagem. Segundo os autores, quando a dose recomendada de calcário para aumentar a saturação por bases a 60% foi aplicada, a respiração do solo foi 24,1% maior comparado ao solo não corrigido dois anos depois, e 47,4% maior quando o dobro da dose foi aplicado.

1.3.2 Fluxos de N_2O

O aumento nos fluxos de N_2O foi observado posteriormente à aplicação da adubação de cobertura, aproximadamente 50 dias após o primeiro corte da cana-de-açúcar nas zonas de cultivo (Figura 15). Isto ocorreu devido a disponibilidade de N via adubação aliada ao aumento das precipitações e, assim, do conteúdo de água do solo no intervalo de 50 a 100 dias (agosto, setembro e outubro, figura 14), que proporcionaram condições ideais de umidade e temperatura do solo para a produção de N_2O. O pico foi observado aos 84 dias na zona de cultivo, com valores de 13,2% e 23°C de umidade e temperatura do solo, respectivamente (Figura 13).

Figura 15 – Fluxo de N_2O (mg m^{-2} dia^{-1}) na zona de canteiro e zona de tráfego em função do Preparo do solo Convencional (PC) e Preparo Profundo (PP), com e sem aplicação de calcário após primeiro corte da cana-de-açúcar



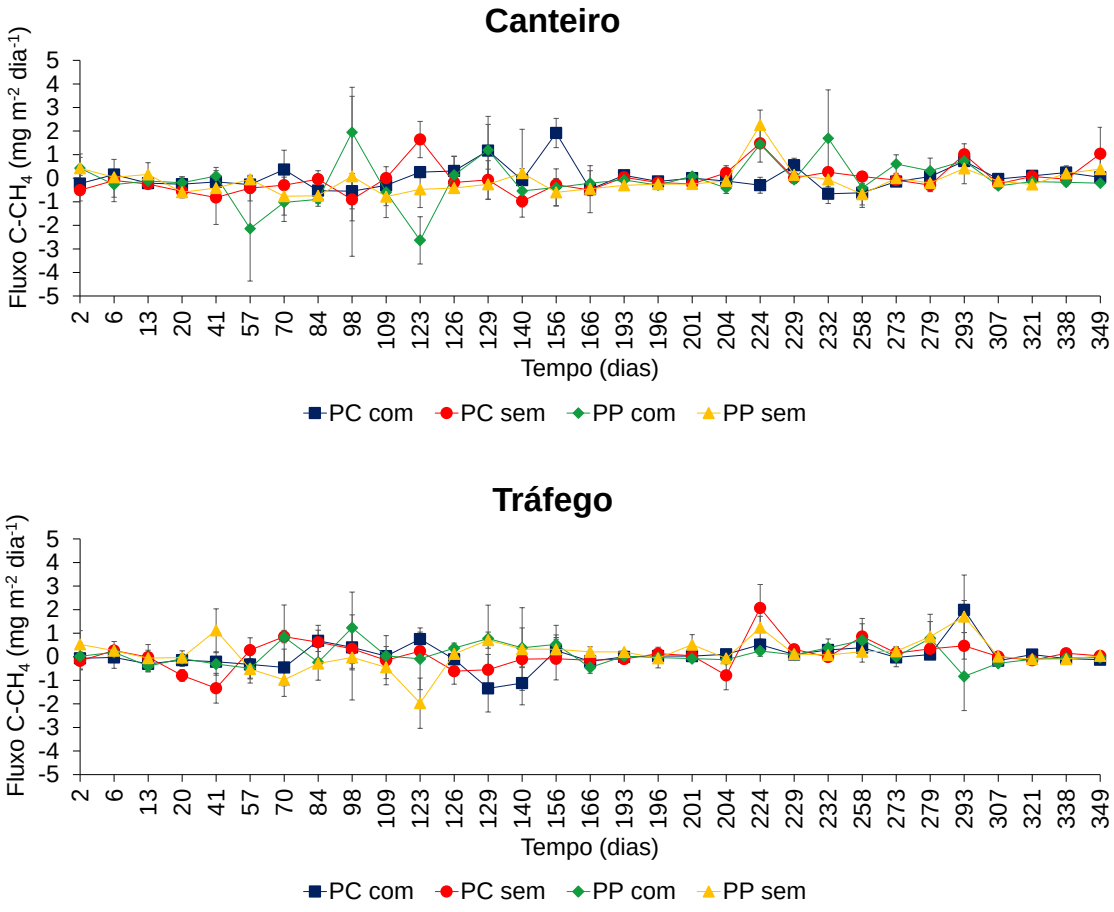
Segundo Hangs, Schoenau e Lafond (2013), a fertilização do solo é o principal fator que condiciona a emissão deste gás nos solos, uma vez que quanto maior a quantidade de fertilizante nitrogenado aplicado mais intensificado será o processo de nitrificação (MOSIER, 2001; SIGNOR, 2010) que torna disponível o NO_3^- no solo podendo levar a desnitrificação em condições ambientais favoráveis à população de bactérias (CHARPUIS-LARDY et al., 2007). Períodos chuvosos também possuem estreita relação com a produção de N_2O nos solos. De acordo com Corrêa et al. (2016) ocorre uma elevação no Espaço Poroso Preenchido por Água devido as precipitações, criando-se sítios de anaerobiose e um ambiente propício às bactérias anaeróbicas, resultando em desnitrificação. Outros trabalhos também observaram estreita relação dos eventos de precipitação com os maiores fluxos de N_2O (GOMES et al., 2009; MA et al., 2010; SIGNOR, 2010).

De modo geral, as emissões nas demais coletas se mantiveram baixas, principalmente nas zonas de tráfego, onde se observa menores fluxos durante todo período experimental. Alguns estudos demonstram que as maiores emissões de N_2O no solo estão bem mais concentradas logo após a adubação nitrogenada nos períodos com maiores precipitações, tendendo a posterior declínio (JANTALIA et al., 2008; MARTINS, et al., 2015), além de que a soqueira requer quantidade maior de nitrogênio do que a cana planta, o que reduz possíveis perdas de N mineral (OLIVEIRA, 2014; AINI et al., 2015).

1.3.3 Fluxos de CH_4

Os fluxos de CH_4 no solo apresentaram valores tanto negativos quanto positivos em todos os tratamentos analisados, evidenciando a capacidade do solo em áreas de cana-de-açúcar de atuar tanto como fonte (via metanogênese - produção), quanto como um sumidouro (via metanotrofia - oxidação) deste gás (Figura 16).

Figura 16 – Fluxo de CH_4 (mg m^{-2} dia^{-1}) na zona de canteiro e zona de tráfego em função do Preparo do solo Convencional (PC) e Preparo Profundo (PP), com e sem aplicação de calcário após primeiro corte da cana-de-açúcar



Ao longo do período experimental, a oxidação do CH_4 foi mais observada na zona de cultivo, porém em quantidades muito baixas, sendo os maiores drenos obtidos aos 57 e 123 dias, com valores de -2,1 e -2,6 mg m^{-2} dia^{-1}, respectivamente. Na zona de tráfego as emissões apresentaram-se baixas, entretanto estas permaneceram mais constantes em relação a zona de cultivo no decorrer do período de avaliação em todos os tratamentos. Isto pode estar associado ao grau de compactação do solo claramente maior em zonas de tráfegos ocasionada pela passagem de maquinários agrícolas durante o cultivo da cana-de-açúcar. Segundo Hütsh (2001), a compactação prejudica o dreno de CH_4, visto que possui efeito negativo na difusão de O_2 pela alta densidade e baixa macroporosidade, pois em solos agrícolas a formação deste gás se dá por bactérias metanogênicas em condições restritas de O_2, através da redução de compostos orgânicos a CH_4 (BREVILIERI; DIECKOW, 2015), se relacionando, desta forma, aos atributos físicos do solo.

Outros fatores podem influenciar a dinâmica do CH_4 como solos aerados que apresentam capacidade de oxidação deste gás (GOMES, 2006; ESCOBAR, 2008); a umidade e a temperatura do solo por exercerem controle na difusão e disponibilidade de O_2, portanto, quanto maiores essas variáveis menores a taxa de oxidação e maior a emissão de CH_4 (LOPES, 2017); o aumento da quantidade de resíduos de palha em superfície que, assim como o conteúdo de água no solo, pode criar sítios de anaerobiose via respiração e liberação de CO_2 proveniente da maior atividade microbiana do solo e disponibilidade de substrato (SIGNOR; PISSIONI; CERRI, 2014), além da adubação nitrogenada que pode atuar como inibidora da oxidação do CH_4 ao competir com o NH_4^+ pela enzima monoxigenase (BOECKX; VAN CLEEMPUT; VILLARALVO, 1997; MOJEREMANE; REES; MENCUCCINI, 2011).

Contudo, os resultados neste trabalho não apontam correlação com alguns dos fatores supracitados, demonstrando que a dinâmica do CH_4 nos solos é complexa e pouco elucidada. A oxidação do CH_4 não foi inibida pela adubação nitrogenada entre os 50 a 100 dias, onde foi observada maior atividade microbiana pelo aumento dos fluxos de CO_2 e N_2O após a adubação (Figuras 12 e 15, respectivamente). Nesse intervalo de tempo ocorreram mais eventos de metanotrofia nas zonas de canteiro, embora com valores de drenos muito baixos (Figura 16). O mesmo foi observado por Nogueira et al. (2015) e Lopes (2017), onde a oxidação deste gás não foram comprometidas pela adubação, contrariando os resultados obtidos por Liu e Greaver

(2009). Segundo Moro (2012), a metanotrofia em função do nitrogênio em solos ainda não é clara, principalmente em áreas com cana-de-açúcar.

Ademais, os fluxos e influxos de CH_4 também não sofreram influência da umidade do solo, ocorrendo tanto dreno quanto emissão em condições de alta e baixa umidade. No entanto, as maiores emissões foram verificadas em temperaturas entre 23 e 25°C (Figura 13).

1.3.4 Emissões acumuladas (CO_2, CH_4 e N_2O)

Os resultados dos fluxos acumulados de CO_2, N_2O e CH_4 estão apresentados na tabela 4. Considerando a área total, ou seja, zonas de canteiro e tráfego, foram observadas diferenças entre o manejo PP com em relação aos demais manejos, apresentando a maior emissão acumulada de CO_2 (7136,44 kg ha^{-1} ano^{-1}). O valor do fluxo total do PP com foi 54,1%, 30,4% e 42,1% maior do que os verificados nos tratamentos PC sem, PC com e PP sem, respectivamente.

Tabela 4 – Emissão acumulada de C-CO_2, C-CH_4 N-N_2O em função do Preparo do solo Convencional (PC) e Preparo Profundo (PP), com e sem aplicação de calcário no segundo ano de cultivo da cana-de-açúcar

Tratamentos	Emissão anual (kg ha^{-1} ano^{-1})		
	C-CO_2	C-CH_4	N-N_2O
PC com	5470 a	0,17	0,87 a
PC sem	4630 a	0,14	1,41 bc
PP com	7136 b	0,14	0,93 ab
PP sem	5019 a	0,23	1,57 c
Pr>Fc	0,0002	0,9988	0,0207
DMS	876,9	1,4	0,49
CV (%)	10,2	519,5	26,78

*Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem entre si pelo teste LSD (p≤0,05).

A mobilização profunda deu acesso a ação dos microrganismos do solo aumentando o estímulo à mineralização do carbono estocado no presente estudo. Como supracitado, ao aliar esse estímulo do preparo profundo mais a pulverização da enxada rotativa com a prática da calagem em profundidade, a ação foi potencializada resultando na elevação das emissões de CO_2 no segundo ano de produção da cana-de-açúcar, o que evidencia o efeito do preparo e também da calagem ao longo do tempo, visto que a emissão deste foi 42,1% maior em relação ao mesmo preparo sem aplicação de calcário (PP sem).

La Scala Jr et al. (2001) ao avaliar as emissões de CO_2 em diferentes preparos do solo com enxada rotativa, grade de disco pesada + grade de disco, arado de disco + grade, escarificador e testemunha sem preparo, verificaram emissões mais elevadas com escarificador em relação ao demais preparos do solo que ocasionam maior revolvimento. O mesmo foi observado por Reicosky e Lindstrom (1993), os quais associaram os resultados à profundidade da perturbação do solo, além da superfície descoberta no período entre o preparo e o estabelecimento da cultura que pode resultar em incrementos significativos nas emissões de CO_2 após a mobilização do solo. Teixeira (2007), verificando a influência da profundidade do escarificador no preparo do solo sobre as emissões de CO_2, observou que quanto maior a profundidade de trabalho maior a emissão. Também a aplicação do calcário em profundidade gera melhorias químicas, físicas e biológicas, além da sua ação floculante que ajuda a reter e infiltrar água no solo, essencial para a atividade microbiológica (GONÇALVES, 2020).

Não foram verificadas diferenças entre os fluxos de CH_4 nos diferentes tratamentos (Tabela 4). Observou-se um elevado coeficiente de variação nos fluxos acumulados deste gás. Segundo Dasselaar et al. (1998), as emissões de GEE são uma série de processos biológicos e físicos, cada um influenciado por vários fatores ambientais e de manejo que exibem variabilidade espacial. Em estudo, verificou valores de CV% muito alto, variando entre 206 a 1424% para o CH_4. Vasconcelos (2016), ao avaliar emissões de CH_4 em cana-de-açúcar em função da palhada e da adubação nitrogenada, também obteve valores extremamente elevados, entre 258 a 1797%, o que era esperado, uma vez que a produção, emissão, bem como os influxos de gases ocorrem em sua maioria pela atividade de grupos altamente heterogêneos que compõem a microbiota do solo, além da dinâmica complexa deste gás no solo que se comporta como fonte e dreno. Assim, fatores edáficos (tipos de solos, teor de matéria orgânica, nutrientes, entre outros), climáticos (precipitação, radiação solar, temperatura, etc), modificam a população microbiana e consequentemente a dinâmica dos gases no solo. Outros autores também relatam esses altos valores de CV% (INÁCIO, 2010; PITOMBO et al., 2015; SIGNOR; PISSIONI; CERRI, 2014).

De modo geral, no segundo ano de cultivo da cana-de-açúcar, o solo se comportou como fonte deste GEE que, embora se tenha obtido valores positivos (fonte), os fluxos foram muito baixos, variando entre 0,14 a 0,23 kg ha^{-1} ano^{-1}, médias estas muito próximas a zero. Em solos não perturbados geralmente são observados drenos de

CH_4, enquanto que ao serem submetidos a conversão para o manejo agrícola passam a atuar como fonte, principalmente devido a aplicação de nitrogênio (MOJEREMANE, REES; MENCUCCINI, 2011; BESEN et al., 2018). No entanto, alguns trabalhos relatam que solos cultivados com cana-de-açúcar tendem a ação de bactérias metanotróficas atuando como sumidouros (dreno) de CH_4 (OLIVEIRA, 2014; BARBOSA, 2014; GONÇALVES, 2020), contrariando os resultados obtidos neste trabalho.

Para que o CH_4 seja emitido via solo não é necessário que o ambiente seja totalmente anaeróbio como nos cultivos de arroz, mas a presença de pequenos sítios anaeróbios, como espaços livres entre os agregados, pode provoca-las (GLATZEL; STAHR, 2001), sendo assim altamente dependente das condições físicas do solo (USSIRI; LAL; JARECKI, 2009; CHALCO VERA; ACRECHE, 2018).

Isto claramente implica no fato de que áreas de cana planta ocorram mais eventos de metranotrofia e se comporte como dreno deste gás (GONÇALVES, 2020), uma vez que no primeiro ano, antes do estabelecimento da cultura, há as operações de preparo do solo o qual eleva a sua macroporosidade favorecendo a difusão do O_2 e, também, as bactérias metanotróficas. Ao longo do tempo, essa macroporosidade e consequente aeração do solo pode ser reduzida, tanto pela acomodação das partículas do solo quanto pelo tráfego de máquinas, afetando diretamente os fluxos de CH_4 no solo.

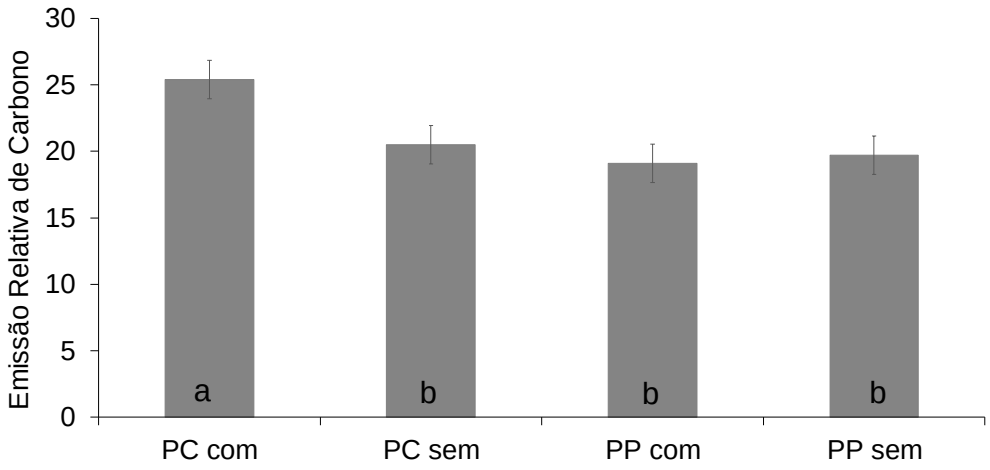
Em relação a emissão acumulada de N_2O (Tabela 4), não houve diferença entre os tratamentos com aplicação de calcário (PC com e PP com), os quais apresentaram as menores médias de emissões no segundo ano da cana-de-açúcar (0,87 e 0,93 kg ha^{-1} ano^{-1}, respectivamente). As maiores emissões de N_2O foram verificadas nos manejos sem a prática da calagem (Tabela 4), onde o PP sem apresentou a maior média, com emissão acumulada de 11,3%, 80,4% e 68,8% superior em relação ao PC sem, PC com e PP com, respectivamente.

Segundo Signor e Cerri (2013), além da fertilização do solo via adubação, o pH do solo é outro fator importante que influencia as emissões deste gás, visto que a enzima óxido nitroso redutase é inibida em condições de baixo pH e na presença de O_2. No geral, se a desnitrificação é a principal fonte de N_2O, maiores valores de pH que podem ser ocasionados pela prática da calagem possuem a capacidade de diminuir as emissões deste GEE. Em contrapartida, se a nitrificação é o principal processo de produção do N_2O, então a elevação do pH do solo pode estimular a produção do

referido gás. Embora esses tratamentos tenham obtido menor média de emissão acumulada, o manejo PP com não se diferiu estatisticamente do preparo convencional sem aplicação de calcário (PC sem) neste trabalho.

Na figura 17 estão apresentados os resultados de emissão relativa de carbono (ERC) para cada tratamento estudado.

Figura 17 – Emissão relativa de carbono (ERC) no segundo ano de cultivo da cana-de-açúcar, em função do Preparo Convencional (PC) e Preparo Profundo (PP), com e sem aplicação de calcário em um Latossolo Vermelho de textura média



*Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste LSD (p≤0,05).

Foram verificadas diferenças significativas entre os manejos, onde o preparo convencional com aplicação de calcário foi responsável pela maior emissão relativa de C, atribuindo uma média de 25,4 kg Ceq / Mg de colmos produzidos, apesar de ter apresentado menor emissão acumulada (Tabela 4). Este tratamento também apresentou a maior produtividade de colmos (ver tabela 7), não se diferenciando do preparo profundo com aplicação de calcário que, embora tenha alcançado maior emissão acumulada, produziu mais emitindo menos carbono que o manejo PC com, sendo a ERC aproximadamente 23,9% maior que PP com.

Gonçalves (2020) ao avaliar a ERC em cana planta submetida ao preparo profundo e convencional, com e sem aplicação de calcário, também observou menor emissão relativa no preparo profundo com a prática da calagem, a qual associou à maior produtividade obtida, favorecida pelo preparo e aplicação de calcário em profundidade e de forma localizada. Efeito este que pode perdurar ao longo do tempo, como verificado no presente estudo.

1.3.5 Estoque de carbono (C) e nitrogênio (N) no solo

Os resultados para estoque de C no solo nos diferentes manejos estão apresentados na tabela 5. Houve diferenças entre os tratamentos analisados, evidenciando a influência dos manejos no armazenamento de C no perfil do solo.

Tabela 5 – Estoque de carbono (Mg ha^{-1}) no solo nas profundidades de 0,0-0,2, 0,2-0,4, 0,4-0,6, 0,6-0,8 e 0,8-1,0 m no segundo ano de cultivo da cana-de-açúcar em um Latossolo Vermelho de textura média submetido ao Preparo Convencional (PC) e Preparo Profundo (PP), com e sem aplicação de calcário

Tratamentos	Estoque de C no solo (Mg ha^{-1})					
	0,0-0,2	0,2-0,4	0,4-0,6	0,6-0,8	0,8-1,0	Total
PC com	18,55 b	14,49 b	11,59 b	9,48 b	8,13 b	62,24 b
PC sem	15,81 c	14,35 b	11,49 b	9,49 b	8,35 b	59,49 b
PP com	20,32 a	15,22 ab	13,48 a	11,17 a	9,41 a	69,6 a
PP sem	21,44 a	16,18 a	13,88 a	11,70 a	9,56 a	72,76 a
Pr>Fc	0,0002	0,0511	0,0027	0,0002	0,0114	0,0004
DMS	1,74	1,51	1,22	0,81	0,89	4,75
CV (%)	5,72	6,31	6,09	4,86	6,34	4,50

*Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem entre si pelo teste LSD (p≤0,05).

Os valores obtidos variaram entre 59 a 73 Mg ha^{-1}, onde os tratamentos com preparo profundo (PP sem e PP com) não diferiram estatisticamente e apresentaram os maiores estoques de C no solo (72,8 e 69,6 Mg ha^{-1}). Já o preparo convencional com aplicação de calcário reduziu em 10,6 e 14,5% o C estocado em relação aos tratamentos PP com e PP sem, enquanto o mesmo preparo sem a prática da calagem limitou em 14,5 e 18,2% comparando-se aos mesmos tratamentos, respectivamente. É importante ressaltar que o preparo profundo estocou mais C mesmo com as maiores perdas acumuladas de CO_2, como observado no PP com, que apresentou a maior emissão anual (Tabela 4), ao contrário dos preparos convencionais que, apesar de obterem emissões acumuladas menores no presente estudo, estocou menos C no solo em relação ao PP. Isto representa cerca de 7 a 13 Mg ha^{-1} de C que deixa de ser armazenado no solo em função do manejo convencional adotado.

O preparo convencional caracteriza-se, principalmente, por ocasionar a inversão das camadas aráveis do solo por meio de implementos como arados e grades, proporcionando quebras das partículas e aumentando a macroporosidade (MARTORANO et al., 2009). No entanto, observa-se que a intensificação da mecanização agrícola nesse sistema, muito utilizada em cultivos de cana-de-açúcar,

tem provocado modificações não somente físicas, mas químicas no solo, favorecendo processos de degradação e reduzindo a sua qualidade (ASSIS; LANÇAS, 2010; OLIVEIRA et al., 2011), como os decréscimos expressivos verificados nos estoques de C do solo nos manejos convencionais em comparação com manejos conservacionistas (LEITE et al., 2010; HICKMANN; COSTA, 2012; TEIXEIRA et al., 2018; GONÇALVES, 2020). Alguns trabalhos relatam que este fato está diretamente relacionado à incorporação dos resíduos ao solo na camada arável, proporcionada pelo preparo, que aumenta a aeração, rompe os agregados, aumenta a temperatura nas camadas mobilizadas e expõe a matéria orgânica a ação dos microrganismos (COSTA et al., 2008; PINHEIRO; PEREIRA; ANJOS, 2003).

O preparo profundo em faixas, por sua vez, é realizado de forma localizada em linhas delimitadas e, diferente do preparo em área total, mantém parte do terreno sem mobilização do solo o que reduz o seu potencial de desestruturação, aumentando o acúmulo de matéria orgânica do solo (MOS) e mantendo o C protegido em seu interior (SOUZA et al., 2017; GONÇALVES, 2020). Outro fator que pode estar associado é o desenvolvimento do sistema radicular neste preparo. Garcia (2018) ao avaliar o preparo profundo com emprego da enxada rotativa, observou maior comprimento e massa radicular, com melhor distribuição ao longo do perfil em comparação com o sistema convencional. Gonçalves (2020), em estudo utilizando o mesmo preparo, também obteve um maior desenvolvimento e exploração das raízes no preparo profundo e com aplicação de calcário, principalmente nas camadas superficiais (0,0 a 0,40 m), decorrente da ação da enxada rotativa que atua no destorroamento, o que permite uma maior expansão radicular. De acordo com Kätterer et al. (2011), o coeficiente de humificação de carbono das raízes é aproximadamente 2 vezes maior que os resíduos provenientes da parte aérea. Isto pode levar a estabilização física ao arranjo das partículas do solo e à consequente proteção contra a ação de microrganismos, oxigênio e enzimas (SIX et al., 2004). Segundo Bayer et al. (2011) a lignina e outros compostos recalcitrantes presentes na raiz estão atrelados à produção de substâncias húmicas, sendo esta uma das causas que mais contribuem na adição de C ao solo pelas raízes em relação à parte área.

Além disso, a neutralização de elementos tóxicos como Al^{3+} trocável, a maior disponibilidade de nutrientes e o aumento de bases trocáveis resultantes da prática da calagem conseguem favorecer o crescimento e desenvolvimento da cultura (CASTRO; CRUSCIOL, 2013), podendo resultar em retornos crescentes de matéria

orgânica ao solo na forma de resíduos e raízes, incrementando o estoque de C em relação a áreas sem correção (PARADELO; VIRTO; CHENU, 2015; INAGAKI et al., 2016). De acordo com Inagaki et al. (2017), a longo prazo, mesmo que a ação microbiana do solo seja aumentada entre 1 a 1,5 anos após aplicação de calcário, isto não leva ao esgotamento do carbono orgânico do solo (COS) quando a prática é empregada em sistemas conservacionistas.

Com relação a cada camada amostrada, o preparo profundo acumulou os maiores estoques de C em todas as profundidades, com destaque para a camada superficial de 0,0-0,2 m que apresentou o maior conteúdo de C estocado, aproximadamente 5 Mg ha^{-1} a mais que os tratamentos convencionais (Tabela 5). Os resultados obtidos em todos tratamentos apontam que tanto as camadas subsuperficiais quanto as mais profundas (0,4-1,0 m) demonstraram uma tendência de redução no armazenamento de C ao longo do perfil, onde os menores estoques chegaram a atingir entre 8 a 9 Mg ha^{-1} nas camadas de 0,8-1,0 m de profundidade.

As diferenças do estoque de C verificadas ao longo do perfil, independente do manejo, com acúmulos maiores em superfície, está associado com a adição de material orgânico deixado sobre o solo após a colheita da cana-de-açúcar e ao aporte de C pelas raízes, que em geral são mais abundantes nesta camada. Vários trabalhos corroboram o presente estudo, onde se verificou maiores acúmulos de C restrito a camadas superficiais do solo (LOVATO et al., 2004; ARGENTON et al., 2005; FARIAS, 2008; PINHEIRO et al., 2010; FREITAS et al., 2018; GONÇALVES, 2020).

Quanto aos estoques de N no solo não foram observadas diferenças entre os tratamentos analisados (Tabela 6). No entanto, verificando-se os valores médios totais, observou-se menor média de acúmulo de N no preparo convencional com aplicação de calcário, com 8,68 Mg ha^{-1}, obtendo uma redução nos estoques de N de, aproximadamente, 1,5 a 4 Mg ha^{-1} em relação aos demais tratamentos.

Tabela 6 – Estoque de nitrogênio (Mg ha^{-1}) no solo nas profundidades de 0,0-0,2, 0,2-0,4, 0,4-0,6, 0,6-0,8 e 0,8-1,0 m no segundo ano de cultivo da cana-de-açúcar em um Latossolo Vermelho de textura média submetido ao Preparo Convencional (PC) e Preparo Profundo (PP), com e sem aplicação de calcário

Tratamentos	Estoque de N no solo (Mg ha^{-1})					
	0,0-0,2	0,2-0,4	0,4-0,6	0,6-0,8	0,8-1,0	Total
PC com	2,21	1,95	1,70	1,48	1,31	8,68
PC sem	3,15	2,92	2,62	2,25	2,33	13,30
PP com	2,78	2,14	1,88	1,81	1,55	10,18
PP sem	2,98	2,63	2,13	1,87	1,63	11,28
Pr>Fc	0,5144	0,4316	0,4660	0,5463	0,2771	0,4526

Como constatado nos estoques de C, a camada superficial de 0,0-0,2 m também apresentou os maiores valores médios de acúmulo de N em relação às demais camadas, com valores oscilando entre 2,21 a 3,15 Mg ha^{-1}, sem diferença entre os tratamentos. Estes resultados de estoques de N foram semelhantes aos encontrados por Lucena (2019), que obteve valores de estoque de 2,88 Mg ha^{-1} na camada superficial de um Latossolo Vermelho-Amarelo e superior aos encontrados por Almeida et al. (2016) que obteve até 1 Mg ha^{-1} de N estocado na mesma camada em uma área de 5 anos de cultivo da cana-de-açúcar.

Houve uma tendência em decréscimo nos estoques de N ao longo do perfil ao avaliar cada tratamento isoladamente, evidenciando que as camadas superficiais, de mesmo modo que os estoques de C, são responsáveis por acumular maiores quantidades de N. Isto pode ocorrer em virtude das aplicações sucessivas de resíduos agroindustriais por longos períodos de tempo (LUCENA, 2019). Os fatores que estão mais envolvidos com esta característica são a textura, o manejo do solo e a aplicação de fertilizantes minerais, tanto inorgânicos quanto orgânicos (vinhaça e torta de filtro) (GALDOS et al., 2009). Além disso, a matéria orgânica proveniente dos resíduos da colheita sem queima também é importante na determinação dos estoques de C e N no solo, onde a grande parte dos resíduos depositados permanecem em sua superfície, promovendo incrementos do conteúdo de MOS, dependendo do manejo, os quais sofrem bastante influência deste componente (GALDOS et al., 2009; SIGNOR, 2010; ALMEIDA et al., 2016; LUCENA, 2019) e, desta forma, eleva os estoques de N na camada superficial do solo.

1.3.6 Produtividade de colmos

Os resultados para produtividade de colmos estão apresentados na tabela 7. Não houve diferenças entre os manejos com aplicação de calcário, os quais alcançaram os maiores valores de TCH com produtividades de aproximadamente 33,9% e 40,8% maiores que os tratamentos PP e PC sem a prática da calagem, respectivamente, e superiores à média nacional de 76 Mg ha^{-1} (CONAB, 2019).

Tabela 7 - Produtividade em toneladas de colmos por hectares (TCH) no segundo ano de cultivo da cana-de-açúcar em um Latossolo Vermelho de textura média submetido ao Preparo Convencional (PC) e Preparo Profundo (PP), com e sem aplicação de calcário

Tratamentos	TCH
PC com	143,20 a
PC sem	101,73 b
PP com	140,80 a
PP sem	106,97 b
Pr>Fc	0,0001
DMS	13,60
CV (%)	6,90

*Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem entre si pelo teste LSD (p≤0,05).

Embora a cana-de-açúcar seja uma cultura altamente tolerante à acidez do solo quando comparada a outras culturas (ROSSETO et al., 2004), tem-se observado respostas promissoras da prática da calagem em seu cultivo. Alguns trabalhos relatam incrementos crescentes de produtividade de colmos em função do aumento das doses de calcário (PRADO; FERNANDES; NATALE, 2002; SILVA et al., 2014; ROSSATO et al., 2017; GONÇALVES, 2020), onde o uso do calcário e seu consequente resultado positivo, verificados em cana planta e soca, foram associados ao efeito corretivo que altera a disponibilidade de nutrientes no solo (PRADO; FERNANDES; NATALE, 2002) e pelo fornecimento de Ca e Mg (ANDRADE; ANDRADE; NOGUEIRA, 2019), visto que o Ca está relacionado com a distribuição do sistema radicular, onde atua como sinalizador no processo de gravitropismo, influenciando no crescimento das raízes (POOVAIAH; YANG; REDDY, 2002) e incrementando a produção, principalmente em solos deficientes em nutrientes (ROSSETO et al., 2004).

Guimarães (2019), ao avaliar os preparos convencional e profundo, com e sem a prática da calagem em um Latossolo Vermelho-Amarelo de textura franco-arenosa, também obteve maior TCH nos manejos com calcário, sendo os valores 14% e 21% maiores no PP e PC, respectivamente. O mesmo também foi constatado pela mesma autora em um Nitossolo Vermelho de textura argilosa, e por Alves (2020) no primeiro

ano de cultivo da cana-de-açúcar em um Latossolo Vermelho de textura média, a qual obteve uma redução na produtividade de colmos nos tratamentos sem calagem entre 9 a 21 Mg ha^{-1}. No presente estudo (tabela 7), foram observadas uma redução variando entre 33 a 41 Mg ha^{-1} que são deixadas de serem produzidas em cana soca pela não aplicação do calcário no solo, independentemente do preparo, evidenciando que esse efeito é persistente ao longo do tempo.

1.4 CONCLUSÃO

O sistema de preparo profundo em faixas com aplicação de calcário de forma localizada, aumenta as emissões acumuladas de CO_2, aumenta o estoque de carbono no solo, mantém a alta produtividade de colmos e emite menos C por Mg de colmos produzidos em relação ao manejo convencional no segundo ano de cultivo da cana-de-açúcar.

REFERÊNCIAS

ADACHI, M. et al. Spatial and temporal variation in soil respiration in a seasonally dry tropical forest, Thailand. **Journal of Tropical Ecology**, v. 25, p. 531-539, 2009.

AINI, F. K. et al. Nitrous oxide emissions along a gradient of tropical forest disturbance on mineral soils in Sumatra. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.214, p.107–117, 2015.

ALBUQUERQUE, A.C.S.; SILVA, A. S. Agricultura tropical: quatro décadas de inovação tecnológica, institucionais e políticas. Brasília: **Embrapa Informações tecnológicas**, 2008, v.1: produção e produtividade agrícola. 1336 p.

ALMEIDA, L. S. et al. Indicadores de qualidade do solo em cultivos irrigados de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 51, n. 9, p. 1539-1547, 2016.

ALVES, E. R. **Atributos físicos e produtividade de cana planta com calagem e preparo profundo canteirizado em um Latossolo**. 2020. 85f. Tese (Doutorado em Agronomia/Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP.

ANDRADE, P. P.; ANDRADE, L. A. B.; NOGUEIRA, F. D. Métodos de recomendação, doses de calcário e variedades no rendimento agrícola e qualidade de cana-de-açúcar (1° corte). **Revista Agroveterinária do Sul de Minas**, Varginha, v. 1, n. 1, 2019.

ARANTES, S. A. C. M. et al. Efeito da calagem na mineralização de 14c-glifosato em solos. **Ciência e agrotecnologia,** Lavras, v. 35, n. 2, p. 234-241, 2011.

ARGENTON, J. et al. Comportamento de atributos relacionados com a forma da estrutura de um Latossolo vermelho sob sistemas de preparo e plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, p.425-435, 2005.

ASSIS, R.; LANÇAS, K. Agregação de um Nitossolo Vermelho distroférrico sob sistemas de plantio direto, preparo convencional e mata nativa. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.30, n.1, p.58-66, 2010.

BARBOSA, E. A. A. **Sustentabilidade ambiental da produção de cana-de-açúcar irrigada com esgoto doméstico tratado via gotejamento subsuperficial.** 2014.135f. Tese (Doutorado)-Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

BAYER, C. et al. Estabilização do carbono no solo e mitigação das emissões de gases de efeito estufa na agricultura conservacionista. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, v. 7, p. 55-118, 2011.

BESEN, M. R. et al. Práticas conservacionistas do solo e emissão de gases do efeito estufa no Brasil. **Scientia Agropecuária**, v. 9, n. 3, p. 429-439, 2018.

BOECKX, P.; VAN CLEEMPUT; VILLARALVO, I. Methane oxidation in soils with different textures and land use. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.49, n.1-3, p. 91-95, 1997.

BRADY, N.C.; WELL, R.R. **The nature and properties of soil.** 14 ed. New Jersey: Prentice Hall, p. 975, 2008.

BREVILIERI, R. C.; DIECKOW, J. Mitigação de emissões de gases de efeito estufa em solos agrícolas e florestais como indicador de serviços ambientais. In: PARRON, L. M.; GARCIA, J. R.; OLIVEIRA, E. B.; BROWN, G. G.; PRADO, R. B. (Org.). **Serviços Ambientais em Sistemas Agrícolas e Florestais do Bioma Mata Atlântica,** Brasília: Embrapa, 2015. p.109-121.

CANA-DE-AÇÚCAR. **Acompanhamento da Safra Brasileira**: cana-de-açúcar, Brasília, DF, v. 6, n. 4, p. 13-15, abril. 2020. Safra 2019/20, Quarto levantamento. Disponível em: www.conab.org.br. Acesso em: 15 jan. 2021.

CASTRO, G.S.A.; CRUSCIOL, C.A.C. Effects of superficial liming and silicate application on soil fertility and crop yield under rotation. **Geoderma**, Amsterdam, v.195, p.234-242, 2013.

CHAN, K.Y.; HEENAN, D. P. Effect of lime ($CaCO_3$) application on soil structural stability of a red earth. **Australian Journal Soil Research**, v. 36, p. 73-86, 1998.

CHALCO VERA, J. C.; ACRECHE, M. M. Towards a baseline for reducing the carbono budget in sugarcane: three years of carbono dioxide and methane

emissions quantification. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 267, p. 156-164, 2018.

CHARPUIS-LARDY, L. et al. Soils, a sink for N_2O? A review. **Global Change Biology**, Oxford, v. 13, n. 1, p. 1-17, 2007.

CIAIS, P. et al. Carbon and Other Biogeochemical Cycles. *In*: PLATTNER, M. TIGNOR, S.K.; ALLEN, J.; BOSCHUNG, A.; NAUELS, Y.; XIA, V.; MIDGLEY, P.M. **Climate Change 2013: Physical Science Basis**. New York: Cambridge University Press.

CORRÊA, R. S. et al. Fluxos de óxido nitroso e suas relações com atributos físicos e químicos do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 51, n. 9, p. 1148-1155, 2016.

COSTA, F.S. et al. Estoque de carbono orgânico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 323-332, 2008.

DASSELAAR, A. V. P. V. et al. Spatial variability of methane, nitrous oxide and carbon dioxide emissions from drained grassland. **Soil Science Society America Journal,** Madison, v. 62, n. 33, p. 810-817, 1998.

DAVIES, J. The business case for soil. **Nature**, v. 543, p. 309–311, 2017.

DELGADO, J. A. et al. Conservation practices to mitigate and adapt to climate change. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 66, n. 4, p. 118-129, 2011.

ELLERT, B.H.; BETTANY, J.R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. **Canadian J. Soil Sci**., v. 75, n. 4, p. 529-538, 1995.

ESCOBAR, L. F. **Emissão de gases de efeito estufa em sistemas de manejo em solo do Planalto Médio do Rio Grande do Sul**. 2008. 104p. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

EMBRAPA. Centro nacional de pesquisa de solos**. Manual de métodos de análise de solo.** 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, 2013. 353p.

FARHATE, C. V. V. **Emissão de CO_2: efeito da rotação de culturas e preparo do solo na renovação do canavial.** 2015. 98f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.

FARIAS, C. H. A. et al. Índices de crescimento da cana-de-açúcar irrigada e de sequeiro no Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,** Campina Grande, v. 12, n. 4, p. 356-362, 2008.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n.6, p. 1039-1042, 2011.

FIGUEIREDO, E. B. **Balanço de gases de efeito estufa e emissões de CO_2 do solo nos sistemas de colheita da cana-de-açúcar manual queimada e mecanizada crua**. 2012. 96f. Tese (Doutorado em Agronomia/Produção Vegetal) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, SP.

FREITAS, L. et al. Estoque de carbono de latossolos em sistemas de manejo natural e alterado. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 28, n. 1, p. 228-239, 2018.

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

GARCIA, C. P. **Efeitos do preparo profundo do solo e da calagem na compactação do solo e na produtividade da cana-de-açúcar.** 2018. 96f. Dissertação (Mestrado em Agronomia-Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP.

GOMES, J. **Emissão de gases de efeito estufa e mitigação do potencial de aquecimento global por sistemas conservacionistas de manejo do solo**. 2006. 129 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

GOMES, J. et al. Soil nitrous oxide emissions in long-term cover crops-based under subtropical climate. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 106, n. 1, p. 36-44, 2009.

GONÇALVES, A. S. F. **Emissões de gases de efeito estufa e estoque de carbono em função da calagem e do preparo do solo na cana-de-açúcar**. 2020. 150f. Tese (Doutorado em Agronomia/Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas “Júlio de Mesquita Filho”, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP.

GUIMARÃES, T. M. **Preparo profundo e calagem em solos arenoso e argiloso na física e carbono do solo e na produtividade de cana-de-açúcar.** 2019. 107f. Tese (Doutorado em Agronomia/Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas “Júlio de Mesquita Filho”, Universidade Estadual Paulista, , Botucatu, SP

GLATZEL, S.; STAHR, K. Methane and nitrous oxide exchange in differently fertilized grassland in southern Germany. **Plant and Soil**, v. 231, p. 21-35, 2001.

HANGS, R. D.; SCHOENAU, J. J.; LAFOND, G. P. The effect on nitrogen fertilization and no-till duration on soil nitrogen supply power and post-spring thaw grenhouse-gas emissions. **Journal Plant Nutritional Soil Science**, v. 176, p. 227-237, 2013.

HICKMANN, C.; COSTA, L. M. Estoque de carbono no solo e agregados em argissolo sob diferentes manejos de longa duração. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, v. 16, n. 10, p. 1055-1061, 2012.

HÜTSCH, B. W. Methane oxidation in non-flooded soils as affected by crop productioninvited paper. **European Journal of Agronomy**, v. 14, p. 237–260, 2001.

IAMAGUTI, J. L. et al. Preparo do solo e emissão de CO_2, temperatura e umidade do solo em área canavieira. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, v. 19, n. 5, p. 497–504, 2015.

INÁCIO, C. T. **Dinâmica de gases e emissões de metano em leiras de compostagem.** 95f. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.

INAGAKI, T. M. et al. Lime and gypsum application increases biological activity, carbon pools, and agronomic productivity in highly weathered soil. **Agriculture, Ecosystems and Environment,** Amsterdam, v. 231, p. 156-165, 2016.

INAGAKI, T. M. et al. Why does carbon increase in highly weathered soil under no-till upon lime and gypsum use? **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 599, p. 523-532, 2017.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp. 2014.

JANTALIA, C. P. et al. Fluxes of nitrous oxide from soil under different crop rotations and tillage systems in the South of Brazil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 82, p. 161, 2008.
LA SCALA, N. et al. Carbon dioxide emissions after application of tillage systems for a dark red Latosol in southern Brasil. **Soil and Tillage Research**, v. 62, p.163- 166, 2001.

LOVATO, T. et al. Adições de carbono e nitrogênio e sua relação com os estoques no solo e com o rendimento do milho em sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, p.175-187, 2004.

LUCENA, E. H. L. **Estoques de carbono e nitrogênio em solos de floresta ombrófila densa e cultivados com cana-de-açúcar em Pernambuco e Alagoas**. 2019. 118f. Tese (Doutorado em Tecnologias Energéticas e Nucleares) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE.

KASPER, M. et al. Influence of soils tillage systems on aggregate stability and the distribution of C and N in different aggregate fractions. **Soil and Tillage Research**, v.105, p.192-199, 2009.

KÄTTERER, T. et al. Roots contribute more to refractory soil organic matter than aboveground crop residues, as revealed by a long-term field experiment. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 141, p. 184–192, 2011.

LA SCALA JR., N.; BOLONHEZI, D.; PEREIRA, G.T. Short-term soil CO_2 emission after conventional and reduced tillage of a no-till sugar cane area in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.91, n.1, p.244-248, 2006.

LEITE, L.F.C. et al. Atributos químicos e estoques de carbono em latossolo sob plantio direto no cerrado do Piauí. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.14, n.12, p.1273-1280, 2010.

LIU, L.; GREAVER, T. L. A review of nitrogen enrichment effects on three biogenic GHGs: the CO_2 sink may be largely offset by stimulated N_2O na CH_4 emission. **Ecology Letters**, v. 12, p. 1103-1117, 2009.

LOPES, A. S. **Emissões de gases de efeito estufa em cana-de-açúcar fertirrigada por gotejamento subsuperficial**. 2017. 78f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal do Vale do São Francisco, Campus Juazeiro, BA.

LORENZ, K.; LAL, R. **Carbon Sequestration in Agricultural Ecosystems**. 1. ed. Cham: Springer International Publishing, 2018.

MA, B. L. et al. Nitrous oxide fluxes from corn fields: on-farm assessment of the amount and timing of nitrogen fertilizer. **Global Change Biology**, Oxford, v. 16, n. 1, p. 156-170, 2010.

MACHADO E.C. et al. Índices biométricos de duas variedades de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.17, n.9, p.1323- 1329, 1982.

MARCELO, A. V.; CORÁ, J. E.; LA SCALA JR, N. Influence of liming on residual soil respiration and chemical properties in a tropical no-tillage system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, p. 45-50, 2012.

MARTINS, M. R. et al. Nitrous oxide and ammonia emissions from N fertilization of maize crop under no-till in a Cerrado soil. **Soil and Tillage Research,** v. 75, p. 151, 2015.

MARTORANO, L. G. et al. Indicadores da condição hídrica do solo com soja em plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.13, n.4, p.397-405, 2009.

MOHANTYA, R. B.; PANDA, T. Soil respiration and microbial population in a tropical deciduous forest soil of Orissa, India**. Flora**, v. 206, p. 1040-1044, 2011.

MOITINHO, M. R. **Emissão de CO_2 e sua relação com propriedades, manejo do solo e palha em áreas de cana-de-açúcar.** 2013. 57 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, SP.

MOJEREMANE, W.; REES, R. M.; MENCUCCINI, M. The effects of site preparation practices oncarbondioxidemethane andnitrous oxidefluxes froma peaty gley soil. **Forestry**, v. 19, p. 1-15, 2011.

MORELL, F. J. et al. Soil CO_2 fluxes following tillage and rainfall events in a semiarid Mediterranean agroecosystem: effects of tillage systems and nitrogen fertilization. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v.139, p.167-173, 2010.

MORO, V. J. **Emissão de gases de efeito estufa na cultura da cana-de-açúcar sob diferentes sistemas de preparo do solo e doses de nitrogênio**. 2012. 64 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

MOSIER, A. Exchange of gaseous nitrogen compounds between agricultural sustems and the atmosphere. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 228, n. 1, p. 17-27, 2001.

MIJANGOS, I. et al. Effects of liming on soil properties and plant performance of temperate mountainous grasslands. **Journal of Environmental Management**, Londres, v.91, p.2066-2074, 2010.

NOGUEIRA, A. K. S. et al. Emissões de óxido nitroso e metano do solo em áreas de recuperação de pastagens na Amazônia Matogrossense. **Química Nova**, v. 38, n. 7, p. 937-943, 2015.

OLIVEIRA, V.S. et al. Compressibilidade de um Argissolo Amarelo distrocoeso submetido a diferentes manejos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campo Grande, v.15, n.5, p. 435, 2011.

OLIVEIRA, M. E. D. de. **Estimativas de Emissões de N2O e CH4 na cultura da cana de açúcar no Estado de São Paulo. 2014. 112f.** Tese (Doutorado em Ciências) -Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP.

OTTO, R. et al. Root system distribution of sugar cane as related to nitrogen fertilization, evaluated by two methods: monolith and probes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, n.3, p.601-611, 2009.

PANOSSO, A.R. et al. Spatial and temporal variability of soil CO2 emission in a sugarcane area under green and slash-and-burn managements. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.105, n.1, p.275-282, 2009.

PARADELO, R.; VIRTO, I.; CHENU, C. Net effect of liming on soil organic carbon stocks: a review. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 202, p. 98-107, 2015.

PAVEI, M. A. **Decomposição de resíduos culturais e emissão de gases do efeito estufa em sistemas de manejo do solo em Ponta Grossa (PR).** 2005. 115f. Dissertação (Mestrado em Ecologia de Agroecossistemas) - Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2005.

PINHEIRO, E.F.M.; PEREIRA, M.G.; ANJOS, L.H.C. Aggregate distribution and soil organic matter under diferente tillage systems for vegetable crops in a Red Latosol from Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 77, p. 79-84, 2003.

PINHEIRO, E. F. M. et al. Impacto f pre-harvest burning versus trash conservation on soil carbono and nitrogen stocks on a sugarcane plantation in the Brazilian Atlantic forest region. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 333, p. 71–80, 2010.

PITOMBO, L. M. et al. Carbon sequestration and greenhouse gases emissions in soil under sewage sludge residual effects. **Scientia Agrícola**, v. 72, n. 2, p. 147-156, 2015.

POOVAIAH, B. W.; YANG, T.; REDDY, A. S. N. Calcium and Gravitropism. In: WAISEL, Y.; ESHEL, A.; KAFKAKI, U. (Eds.). **Plant roots**: the hidden half. 3 ed. New York: Marcel Dekker, p. 505-520, 2002.

PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M.; NATALE, W. Calcário e escória de siderurgia avaliados por análise foliar, acúmulo e exportação de macronutrientes em cana-de-açúcar. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 59, n. 1, p. 129-135, 2002.

RAIJ, B. VAN. et al. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais.** Campinas: Instítuto Agronômico, 2001. 284p.

REICOSKY, D.C.; LINDSTROM, M.J. Fall tillage method: effect on short-term carbon dioxide flux from soil. **Agronomy Journal**, v. 85, p. 1237-1243, 1993.

REICHSTEIN, M. et al. Modeling temporal and large-scale spatial variability of soil respiration from soil water availability, temperature and vegetation productivity indices. **Global Biogeochemical Cycles**, Jena, v.17, n.4, p.1-15, 2003.

RIGON, J. P. G. et al. Cover crop rotations in no-till system: short-term CO_2 emissions and soybean yield. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 75, n. 1, p. 18-26, 2018.

ROSSATO, O. B. et al. Soil fertility, ratoon sugarcane yield, and post-harvest residues as affected by surface application of lme and gypsum in Southeastern Brazil. **Bioscience journal**, Uberlândia, v. 33, n. 2, p. 276-287, 2017.

ROSSETO, R. et al. Calagem para cana-de-açúcar e sua interação com a adubação potássica. **Bragantia**, Campinas, v. 63, n. 1, p. 105-119, 2004.

SCHWARTZ, R. C.; BAUMHARDT, R. L.; EVETT, S. R. Tillage effects on soil water redistribution and bare soil evaporation throughout a season. **Soil and Tillage Research**, v.110, p.221-229, 2010.

SEEG - SISTEMA DE ESTIMATIVA DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA. Emissões do setor de agropecuária. 2017. Disponível em: <https://www.imaflora.org/downloads/biblioteca/55ca3a26a856a_agropecuaria_2015.pdf>. Acesso em: 14 ago. 2020.

SIGNOR, D. **Estoque de carbono e nitrogênio e emissões de gases de efeito estufa em áreas de cana-de-açúcar na região de Piracicaba**. 2010. 119 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP.

SIGNOR, D.; CERRI, C. E. P. Emissões de óxido nitroso em solos agrícolas: uma revisão. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 43, n. 3, 2013.

SIGNOR, D.; PISSIONI, L. L. M.; CERRI, C. E. P. Emissões de gases de efeito estufa pela deposição de palha de cana-de-açúcar sobre o solo. **Bragantia**, Campinas, v. 73, n. 2, p. 113-122, 2014.

SILVA, S. V. et al. Efeito de doses de calcário e cultivares na produtividade e qualidade agroindustrial da cana-de-açúcar em solo da Amazônia. **Revista AgroAmbiente On-line**, v. 8, n. 3, p. 298-305, 2014.

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

SIX, J. et al. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 79, n. 1, p. 7-31, 2004.

SOUZA, L. C. et al. Can partial cultivation of only the sugarcane row reduce carbono dioxide emissions in na oxisol na ultisol. **Agronomy Journal**, Madson, v. 109, p. 1113-1121, 2017.

SPIRONELLO, A. et al. Cana-de-açúcar. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo.** Campinas: IAC, 1996. cap. 22, p. 237- 239.

SWIFT, R.S. Organic matter characterization. *In*: SPARKS, D.L.; PAGE, A.L.; HELMKE, P.A.; LOEPPERT, R.H.; SOLTANPOUR, P.N.; TABATABAI, M.A.; JOHNSTON, C.T.; SUMMER, M.E., eds. Methods of soil analysis. Chemical methods. Madison, Soil Science Society of America/American Society of Agronomy, 1996. Part 3. p.1011-1069. (Book Series, 5).

TAVARES, R. L. M. et al. Emissão de CO_2 e microbiano do solo atividade em sistemas de manejo da cana-de-açúcar. **Jornal Africano de Agricultural Research**, v. 10, p. 975-982, 2015.

TEIXEIRA, L. G. **Emissão de CO_2 de um Latossolo vermelho após preparo mecânico**. 2007. 98f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, SP.

TEIXEIRA, L.G.; LOPES, A.; LA SCALA JR., N. Temporal variability of soil CO_2 emission after conventional and reduced tillage described by an exponential decay in time model. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.30, n.2, p.224-231, 2010.

TEIXEIRA, L. G. et al. Soil CO_2 emission as related to incorporation of sugarcane crop residues and aggregate breaking after rotary tiller. **Engenharia Agrícola**, v.31, p.1075-1084, 2011.

TEIXEIRA, L.G. et al. estoque de carbono em área de cana-de-açúcar utilizando diferentes plantas de cobertura e sistemas de preparo do solo. **Revista dos Trabalhos de Iniciação Científica da UNICAMP**, Campinas, SP, n. 26, 2018.

USSIRI, D.A.N.; LAL, R.; JARECKI, M.K. Nitrous oxide and methane emissions from long-term tillage under a continuous corn cropping system in Ohio. **Soil and Tillage Research**, v. 104, p. 247-255, 2009.

VARNER R. K. et al. Experimentally induced root mortality increased nitrous oxide emission from tropical soil. **Geophysical Research Letters**, v. 29, p.1-7, 2002.

VASCONCELOS, A. L. S. **Emissão de gases de efeito estufa do solo devido à remoção de quantidades de palha de cana-de-açúcar e à adubação nitrogenada**. 83 f. 2016. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP.

WORLD RESOURCES INSTITUTE. 4 gráficos para entender as emissões de gases de efeito estufa por país e por setor. 2016. Disponível em: < https://wribrasil.org.br>. Acesso em: 14 ago. 2020.

ZHI-MIN, Z. et al. Contribution of Root Respiration to Total Soil Respiration in a Cotton Field of Northwest China. **Pedosphere**, v.23, p.223-228, 2013.

CAPÍTULO 2

EFEITO RESIDUAL DO PREPARO PROFUNDO DO SOLO E DA CALAGEM SOBRE A RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DO SOLO EM CANA-DE-AÇÚCAR

RESUMO: Com a proibição da queima do canavial no estado de São Paulo e o consequente advento da colheita mecanizada, as áreas de cana-de-açúcar tem apresentado grandes modificações na estrutura do solo, principalmente no que se refere aos atributos físicos, onde técnicas convencionais de preparo e o uso intensivo de maquinários agrícolas tem contribuído com pressões ainda maiores no solo, aumentando a compactação e reduzindo o desempenho produtivo da cultura. Neste contexto, o Preparo profundo em faixas surge como uma alternativa para minimizar tais efeitos negativos acarretados pelo manejo convencional, efetuando cinco operações simultaneamente somente nas zonas de plantio da cultura. Entretanto, ainda é desconhecido seus efeitos sobre a estrutura do solo, podendo resultar ou não em menor compactação a longo prazo, além da sua ação conjunta à aplicação de calcário, uma vez que as doses preestabelecidas foram obtidas para sistema convencional. Para tanto, o presente estudo avaliou o efeito restritivo residual dos Preparo convencional (PC) sem e com aplicação de calcário em área total e Preparo profundo em faixas (PP) sem e com aplicação de calcário na linha de plantio sobre a Resistência à penetração do solo (RP) no segundo ano de produção da cana-de-açúcar. Foram observadas maiores médias de RP nos preparos profundos ao longo do perfil do solo das zonas de cultivos, com valores restritivos para PP sem logo nas camadas 0,1-0,2 m, PC sem a partir de 0,2-0,3 m e demais manejos a partir 0,3 m de profundidade. Em transepto, observou-se que a compactação foi mais atenuada em PC com aplicação do calcário, o mesmo não foi verificado para PP com. O preparo profundo mostrou uma tendência mais rápida e robusta na acomodação das partículas do solo, com o retorno para a compactação ao longo do perfil logo no segundo ano de cultivo da cana-de-açúcar.

Palavras-chave: Compactação. Calcário, Preparo do solo. Preparo convencional.

ABSTRACT: With the prohibition of burning cane fields in the state of São Paulo and the consequent advent of mechanized harvesting, as areas of sugarcane have shown major changes in the structure of the soil, especially with regard to physical resources, where integrated technicians from preparation and intensive use of agricultural machinery has contributed to even greater pressures on the soil, increased compaction and adjustment of the productive performance of the crop. In this context, Deep Bandwidth Preparation as an alternative to minimize such negative effects caused by conventional management, carrying out five simultaneous operations only in the planting zones of the crop. However, its effects on the soil structure are still unknown, which may or may not result in less long-term compaction, in addition to its joint action with the application of lime, since the pre-established doses were prepared for the conventional system. For this purpose, the present study evaluated the residual restrictive effect of Conventional Preparation (PC) without and with application of lime in total area and Deep Preparation in bands (PP) without and with application of lime in the planting line on the Resistance to the penetration of the soil (RP) in the second year of sugar cane production. Higher RP averages were observed in deep preparations along the soil profile of the cultivation zones, with restrictive values for PP without logo in the 0.1-0.2 m layers, PC without from 0.2-0.3 me too much handling from 0.3 m in depth. In transept, it was observed that compaction was more attenuated in PC with the application of lime, the same was not verified for PP with. The in-depth preparation a faster and more robust trend in the accommodation of soil particles, with the return to compaction along the profile in the second year of cultivation of sugar cane.

Keywords: Compaction. Limestone. Soil preparation. Conventional preparation.

1.5 INTRODUÇÃO

Implantada em terras brasileiras durante o período colonial, a cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) tornou-se uma das culturas agrícolas mais importantes do país, onde os produtos obtidos a partir do seu cultivo, como o açúcar e o etanol, participam ativamente na economia brasileira (DRUDI, 2017). O Brasil lidera o ranking de maior produtor mundial atualmente (CONAB, 2020), devido às condições favoráveis de clima, disponibilidade de terras cultivadas e da boa aceitação dos produtos oriundos da cana nos mercados nacional e internacional (LIMA, 2006), e ainda, do surgimento de veículos biocombustíveis e a alta do petróleo que fizeram o álcool hidratado ganhar espaço no mercado (IBGE, 2005).

Neste cenário, o planejamento das atividades envolvidas diretamente no cultivo da cultura, desde o plantio à colheita, são etapas cruciais na sua exploração econômica, etapas estas que inclui o uso de máquinas e implementos agrícolas com alta eficiência no preparo do solo, que segundo Tomaz (2013), viabilizam a produção de cana-de-açúcar mantendo a competitividade da atividade.

O papel fundamental das operações de preparo do solo é criar condições ideais para o desenvolvimento das raízes garantindo o estabelecimento da cultura e, por conseguinte, maiores produções. No entanto, o crescente aumento no uso de maquinários agrícolas em sistemas convencionais, muito utilizado em monoculturas, alteraram principalmente as características físicas dos solos, elevando significativamente sua degradação (SILVA; CASTRO, 2015; ARCOVERDE, 2018). Aliado a isto, o advento da colheita mecanizada da cultura nos dias atuais tornou possível a abolição da queima dos canaviais, em contrapartida, também contribuiu para o aumento da compactação do solo por meio do tráfego de colhedoras e transbordos de cargas, sendo ainda mais agravado quando estes são utilizados em condições de solo úmido (OTTO et al., 2011; SANTOS JUNIOR et al., 2015).

De acordo com Arcoverde (2018), solos compactados têm sua estrutura modificada a partir de alterações dos atributos físicos, como redução da macroporosidade, o aumento da densidade e da resistência do solo à penetração, que afetam a qualidade deste recurso ao limitar propriedades como aeração, disponibilidade e retenção hídrica e de nutrientes, bem como a restrição do desenvolvimento radicular da planta, resultando em decréscimo na produtividade e longevidade do canavial (CAVALIERI et al., 2011).

Por ser uma cultura altamente mecanizada, o grau de compactação do solo é de grande importância para a avaliação do manejo da cana-de-açúcar ao longo do tempo. Dentre as técnicas mais utilizadas para sua determinação está a resistência à penetração do solo, obtida a partir de um penetrômetro, sendo um indicador de compactação de fácil e rápida aferição (MERCANTE; URIBE-OPAZO; SOUZA, 2003), o qual é influenciado, principalmente, pela umidade do solo (BUSSCHER, 1990).

O solo é um recurso natural, e como tal, deve ser bem manejado, pois práticas inadequadas tornam a atividade agrícola economicamente inviável, além de causar danos ao meio ambiente. Desta forma, nos últimos anos, tem-se buscado alternativas para minimizar os efeitos da intensa mecanização dos sistemas convencionais em cana-de-açúcar sobre as propriedades físicas do solo (TOMAZ, 2013; AMORIM, 2019; ALVES, 2020), onde o tráfego controlado surge como uma opção para reduzir os problemas de compactação a partir da técnica de Preparo profundo em faixas, que além de mobilizar o solo em linhas delimitadas (somente nos sulcos de plantio, deixando as zonas de tráfego sem revolvimento), também aplica e incorpora calcário agrícola em profundidade.

A utilização de corretivos agrícolas, como o calcário, traz diversos benefícios às propriedades químicas do solo por meio da correção do pH, aumentando a produtividade da cana-de-açúcar (ROSSETO et al., 2005; SILVA et al., 2014). Além disso, segundo Castro et al. (2011), estes também podem conferir melhorias nos atributos físicos do solo.

Neste sentido, a utilização do preparo profundo em faixas aliado à prática da calagem pode ser uma alternativa para minimizar a compactação a longo prazo em relação ao manejo convencional, o qual é largamente utilizado em sistemas de produção da cana, podendo ser um fator decisivo para se alcançar melhores condições de estabelecimento da cultura, longevidade do canavial, altas produtividades e bom retorno econômico. Assim, o objetivo deste estudo foi avaliar o efeito residual do Preparo profundo em faixas, com e sem aplicação de calcário sobre a resistência à penetração do solo no segundo ano de cultivo da cana-de-açúcar.

1.6 MATERIAL E MÉTODOS

1.6.1 Local do experimento e caracterização da área

O experimento foi implantado em março de 2017 em área de reforma de canavial pertencente à Usina Barra Grande, grupo Zilor, situada no município de Lençóis Paulista – SP, com localização geográfica a 22°40’22.4’’ latitude sul e 48°46’30.6” longitude oeste, altitude média de 651 m (Figura 1, capítulo 1). O solo foi classificado como Latossolo Vermelho (EMBRAPA, 2013) de textura média.

1.6.2 Instalação e condução do experimento

De acordo com a classificação climática de Köppen, o clima da região se caracteriza como tropical tipo Cwa, alcançando temperatura média anual de 20,5°C, mínima de 4°C e máxima de 38°C. A precipitação concentra-se entre os meses de setembro a março, com total anual de 1258 mm (Figura 2, capítulo 1).

Para a determinação das características químicas (RAIJ et al., 2001), físicas e granulométricas do solo (EMBRAPA, 1997), foram coletadas na área experimental 12 amostras representativas nas profundidades de 0,0-0,2; 0,2-0,4; 0,4-0,6 e 0,6-0,8 m (Tabelas 1 e 2, capítulo 1).

1.6.3 Tratamentos e delineamento experimental

O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, com quatro repetições e quatro tratamentos: Preparo convencional (PC) padrão/controle sem aplicação de calcário e PC com o dobro da dose recomendada (5,2 Mg ha^{-1}); Preparo Profundo em Faixas com Haste Subsoladora e Enxada Rotativa (PP) sem aplicação de calcário e PP com o dobro da dose recomendada (5,2 Mg ha^{-1}).

As operações realizadas no sistema PC constaram de uma gradagem aradora de arrasto com 28 discos recortados, com espaçamento entre discos de 0,28 m e profundidade de trabalho a 0,25 m, seguida da aplicação de calcário em área total Figura 3A, capítulo 1). Posteriormente, realizou-se a subsolagem utilizando equipamento com quatro hastes espaçadas a 1,5 m, com profundidade de trabalho a 0,4 m e, por último, mais uma gradagem.

No PP, utilizou-se o equipamento denominado Penta, o qual possui uma haste subsoladora que trabalha a 0,8 m de profundidade em conjunto com uma enxada rotativa que opera a 0,4 m. O preparo profundo do solo e a aplicação de calcário

ocorreu somente nas faixas de cultivo (zonas com plantas) mantendo as zonas de tráfego sem revolvimento. Isto devido ao controle de tráfego realizado via GPS, que separa as duas zonas e mantém a máquina em linha permanente a partir do sistema de piloto assistido (piloto automático). Nesse preparo foram aplicadas ¾ da dose recomendada do calcário na superfície do solo seguida de incorporação, e ¼ da dose restante nos filetes localizados na parte posterior da haste subsoladora, com saídas à 0,4 e 0,8 m de profundidade (Figuras 3B e 4, capítulo 1).

As unidades experimentais (faixas) foram constituídas por 10 linhas de 20 m de comprimento com espaçamento duplo alternado de 1,4 × 0,5 m entre linhas (Como exposta na figura 5, capítulo 1).

1.6.4 Calagem

A partir da análise do solo efetuada antes da instalação do experimento, foram calculadas as doses de calcário de acordo com as recomendações propostas por Spironello et al. (1996), equação 1:

$$\mathrm{NC} = \mathrm{CTC} \times (\mathrm{V2} - \mathrm{V1})/10 \times \mathrm{PRNT} \quad (1)$$

Onde:

NC = Necessidade de calagem (t ha^{-1});

V2 = Saturação por bases a atingir (60% para a cana-de-açúcar);
V1 = Saturação por bases atual
CTC = capacidade de troca de cátions ($mmol_c$ dm^{-3});
PRNT = poder relativo de neutralização total do calcário a ser utilizado.

Foram coletadas e enviadas para laboratório amostras de calcário para determinação dos níveis de CaO, MgO, Reatividade, Poder de Neutralização e PRNT (Expostos na tabela 3, capítulo 1). A quantidade de calcário aplicada foi obtida considerando o somatório das quantidades recomendadas para as camadas 0,0-0,2 e 0,2-0,4 m e aplicando-se o dobro da dose obtida para elevar a saturação por bases a 60%, de acordo com Spironello et al. (1996).

No sistema PC, foram aplicadas doses de 5,2 Mg ha^{-1} em área total, enquanto que no PP aplicou-se 3,9 Mg ha^{-1} em superfície apenas nas linhas de plantio (zona de canteiro) (Figura 6A, Capítulo 1) com posterior incorporação a 0,4 m, e o restante da

dose de 1,3 Mg ha^{-1} posto em profundidade nas camadas entre 0,4 e 0,8 m (Figura 6B, capítulo 1).

1.6.5 Plantio da cana-de-açúcar

Após o período de reação do calcário (3 meses), foi realizado o plantio mecanizado da cana-de-açúcar no dia 17/03/2017, utilizando 18 gemas viáveis m^{-1} na profundidade de 0,3-0,4 m da variedade RB966928. Para a adubação nos sulcos de plantio foram aplicados 800 kg ha^{-1} do formulado 04-20-15 (NPK). Os toletes foram tratados com 330 mL ha^{-1} do inseticida Singular (Fipronil) 5,0 L ha^{-1} do inseticida nematicida Pottente (Benfuracarbe) e 500 mL do fungicida Comet (Piraclostrobina), além de 100 L ha^{-1} de microgeo.

1.6.6 Avaliação

1.6.6.1 Resistência à penetração do solo (RP)

Após a colheita, foram efetuadas as medições de resistência do solo à penetração com o auxílio de um penetrômetro convencional modelo Stolf, o qual é constituído por um peso que ocasiona o impacto, uma haste e um cone para a penetração no solo (STOLF; FERNANDES; FURLANI NETO, 1983). A haste é penetrada no solo por meio do impacto de uma massa (4 kg) em queda livre, a uma altura h (metros). A cada impacto foi registrado os valores do deslocamento x (metros) que foram convertidos em pressão de penetração ou resistência (em unidades de MPa), conforme a equação 7, considerada para o cálculo de índice de cone (STOLF, 1990):

$$RP(MPa) = \frac{[(M+m)g] + {}^{M}/_{(M+m)} * {}^{Mgh}/_{x}]}{A} * 0{,}101325 \quad (2)$$

Onde:

R = resistência à penetração (Mpa);

M = massa total do equipamento (Kg);

M = massa do êmbolo (Kg);

G = aceleração da gravidade (m/s);

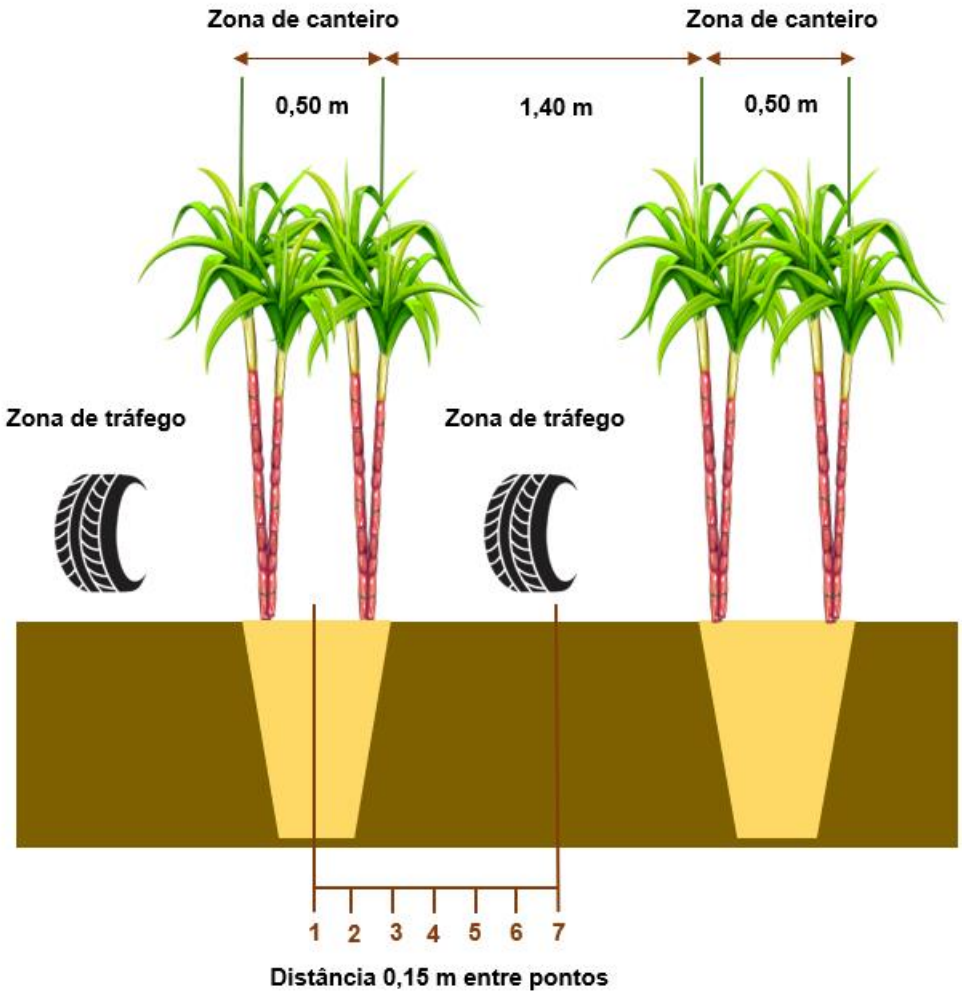
H = altura da queda do êmbolo (cm);

X = número de impactos;

A = área de projeção da ponteira (mm^2).

As medições foram feitas baseadas em um transepto perpendicular de 0,90 m com início no centro da zona de canteiro e final na zona de tráfego. No total, avaliou-se 7 pontos distanciados a 0,15 m (D0, D15, D30, D45, D60, D75 e D90) e a 0,70 m de profundidade.

Figura 1 – Localização dos pontos de coleta para análise de resistência à penetração do solo (RP) pelo método de Stolf em um Latossolo Vermelho de textura média. Pontos numerados de 1 a 7 e distanciados a 0,15 m.



Fonte: autor

Para obtenção da umidade do solo no momento da avaliação de resistência à penetração, foi utilizado um leitor com sonda de capacitância, modelo Diviner 2000®, da Sentek Pt Ltda, que realiza as medições até 1,0 m de profundidade a partir de tubos já instalados na área, sendo um em cada parcela experimental.

Figura 2 – Avaliação de resistência do solo à penetração (A); Tubos para medição de umidade a 1,0 m de profundidade (B); Medição da umidade do solo com sonda modelo Diviner 2000® (C)

1.6.6.2 Análise estatística

Todos os dados foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste LSD à 5% de probabilidade, com o auxílio do programa estatístico Sisvar 4,2 (FERREIRA, 2011).

1.7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

1.7.1 Resistência à penetração do solo (RP)

Embora o manejo PP com não tenha diferido do PC sem (0,0-0,1 m), observou-se maiores valores de RP nas zonas de canteiro para o preparo profundo do solo nas camadas mais superficiais (0,0-0,1 e 0,1-0,2 m) ao final do segundo ano de cultivo da cana-de-açúcar (Tabela 1), os quais variaram entre 0,94 a 2,0 MPa, contrariando a

superioridade deste manejo em menores RP relatada em alguns estudos em cana planta.

Tabela 1 – Resistência à penetração do solo (MPa) em zonas de canteiro e tráfego, nas profundidades de 0,0-0,2, 0,2-0,4, 0,4-0,6, 0,6-0,8 e 0,8-1,0 m no segundo ano de cultivo da cana-de-açúcar em um Latossolo Vermelho de textura média submetido ao Preparo Convencional (PC) e Preparo Profundo (PP), com e sem aplicação de calcário

Tratamentos	RP (MPa)						
	0,0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,3	0,3-0,4	0,4-0,5	0,5-0,6	0,6-0,7
Canteiro							
PC com	0,58 c	0,68 c	1,35 b	2,01 b	2,63	2,61 b	3,00 b
PC sem	0,79 bc	1,25 b	2,61 a	3,04 a	2,62	3,13 ab	3,15 b
PP com	0,94 ab	1,83 a	1,63 b	3,10 a	2,97	3,56 ab	3,51 b
PP sem	1,09 a	2,01 a	2,59 a	2,80 ab	2,82	4,17 a	4,25 a
Pr>Fc	0,0140	0,0011	0,0012	0,0511	0,6356	0,0513	0,0087
DMS	0,28	0,53	0,58	0,83	0,70	1,18	0,66
CV (%)	20,47	22,66	17,56	18,91	15,91	21,98	11,89
Tráfego							
PC com	1,57	2,50 b	4,35	5,14	4,84 ab	3,69	3,37
PC sem	2,13	3,55 b	4,52	4,48	4,06 b	3,78	3,32
PP com	1,86	3,29 b	4,09	4,07	4,27 b	3,61	3,42
PP sem	1,99	5,17 a	5,11	5,11	5,36 a	4,35	3,77
Pr>Fc	0,3680	0,0033	0,2937	0,1949	0,0271	0,5908	0,7269
DMS	0,69	1,14	1,15	1,18	0,84	1,31	0,98
CV (%)	22,96	19,65	15,95	15,79	11,41	21,32	17,72

*Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem entre si pelo teste LSD (p≤0,05).

Guimarães (2019) ao avaliar o preparo profundo e o convencional com e sem aplicação de calcário em um Nitossolo Vermelho de textura argilosa, obteve menores valores de RP nos tratamentos PP, independente da prática da calagem, nas camadas superficiais e subsuperficiais (0,0-0,2 m e 0,2-0,4 m) das zonas de canteiro. Garcia (2018) quando avaliou os mesmos tratamentos em um Latossolo Vermelho Amarelo de textura arenosa, constatou que as diferenças ocorreram somente nas camadas de 0,2 a 0,5 m de profundidade no canteiro, alcançando valores de RP duas vezes maiores no PC em relação ao PP. Já para área de Latossolo Vermelho de textura média no primeiro ano da cana-de-açúcar, Alves (2020) obteve valores semelhantes entre os tratamentos PP e PC na camada superficial de 0,0-0,1 m, variando entre 0,88 a 1,31 MPa, e valores menores no PP a 0,1-0,2 m de profundidade em relação ao PC nesta mesma zona. Segundo o autor, até a profundidade de 0,5 m a RP mais baixa foi verificada no tratamento PP com aplicação de calcário.

Quanto aos resultados em profundidade ainda nas zonas de canteiro, foram constatados valores elevados ao longo do perfil do solo (Tabela 1), chegando a atingir RP pouco acima de 2,5 MPa nos manejos sem aplicação de calcário (PC sem e PP com) em subsuperfície (0,2-0,3 m) e até 3,10 MPa (PP com e PC sem) na camada seguinte (0,3-0,4 m).

Para as camadas mais profundas (0,5-0,6 e 0,6-0,7 m) verificou-se RP ainda maiores, acima de 3 MPa, principalmente no tratamento PP sem que atingiu valores médios de 4,17 a 4,25 MPa nestas duas camadas, respectivamente (Tabela 1). A exceção foi o manejo PC com que se manteve com as menores médias em praticamente todas as camadas amostradas, alcançando um máximo de 3 MPa apenas na profundidade de 0,6-0,7 m, contrariando os trabalhos supracitados, onde o preparo profundo obteve menos compactação em profundidade em relação ao manejo convencional.

De acordo com Alves (2020), valores de RP menores que 2 MPa não se constitui um fator impeditivo para o crescimento radicular e consequente desenvolvimento da cana-de-açúcar, sendo este mesmo valor proposto por Otto et al. (2011). Contudo, na literatura parece não haver um consenso sobre esta característica limitante para a cultura. Tomaz (2013) considerou em seu estudo um valor de 1,5 MPa como referência, o qual encontrou impedimentos ao crescimento das raízes, na linha de plantio, nas profundidades acima de 40 cm para o PC e nenhuma limitação para o PP ao longo do perfil. Gonçalves et al (2014) utilizaram 2,5 MPa, enquanto outros autores determinaram entre 3,0 MPa (CAVALIERI et al., 2011; SOUZA et al., 2015) a 3,8 MPa (DE SÁ et al., 2016).

A literatura reporta que tende ser maior a resistência fornecida pelo solo à haste do equipamento Penetrômetro do que aquela efetivamente realizada sobre as raízes (VEEN; BOONE, 1990; VAN LIER; GUBIANI, 2015). Além disso, se houver condições químicas e de umidade favoráveis e, também, boa difusão do oxigênio permitida pela porosidade do solo, o sistema radicular pode se deformar morfologicamente e se desenvolver através de pontos de menor resistência, ainda que estejam submetidos a solos de alta RP. Isto pode ocorrer, principalmente, por canais ou macroporos que são formados pós senescência de raízes velhas (TAVARES FILHO et al., 2001; UNGER; KASPAR, 1994). Porém, vale ressaltar que a característica de RP limitante pode estar mais bem relacionada com a distribuição das raízes em determinadas

condições de solo e com a variedade de cana utilizada (PORTUGAL; OSTA; COSTA, 2010; DE SÁ et al., 2016).

Com base no valor limitante de RP para cana-de-açúcar de 2 MPa proposto por Otto et al. (2011), também utilizado em estudos mais recentes com a cultura (GARCIA, 2018, GUIMARÃES, 2019) e em Latossolo vermelho de textura média (ALVES, 2020; GONÇALVES, 2020), o tratamento PP sem foi o que apresentou limitação para o desenvolvimento do sistema radicular logo na camada superficial de 0,1-0,2 m, seguido do manejo PC sem em 0,2-0,3 m e os demais tratamentos com valores restritivos a partir dos 0,3 m de profundidade no canteiro (Tabela 1).

Segundo Faroni e Trivelin (2006), após o corte da cana, a atividade das raízes permanecem por algum tempo, onde são gradativamente substituídas pelas raízes dos perfilhos da soqueira nesse período. Com isto, há um desenvolvimento acumulativo do sistema radicular entre um corte e outro muito verificado nas camadas mais superficiais do solo durante os ciclos das soqueiras, local este onde ocorre maior quantidade de matéria seca de raiz em virtude da brotação de perfilhos acontecer mais próximo a superfície (VASCONCELOS; DINARDO-MIRANDA, 2011). Desta forma, no presente estudo, se prevê uma restrição no crescimento de novas raízes da cana soca para o ciclo seguinte (terceiro ano) a partir dos 0,1 m de profundidade para o tratamento PP sem, e nos demais tratamentos de 0,2 a 0,3 m, limitando o desenvolvimento radicular em profundidade que pode chegar entre 2 a 6 m na cana-de-açúcar dependendo do manejo (CURY; DE MARIA; BOLONHEZI, 2014).

De modo geral, com relação as zonas de tráfegos (Tabela 1), observou-se valores elevados ao longo do perfil do solo em todos os manejos estudados, com limitações às raízes variando entre 2,13 a 5,36 MPa. As menores RP foram verificadas somente na camada superficial de 0,0-0,1 m, a qual o tratamento PC sem já começa a apresentar restrições a partir desta profundidade. Contudo, os dados obtidos apenas demonstraram efeito significativo nas camadas de 0,1-0,2 m e 0,4-0,5 m, onde o preparo profundo sem aplicação de calcário apresentou as maiores médias de RP, com valores de 5,17 e 5,36 MPa, respectivamente. Este também se apresentou mais compactado em praticamente todas as camadas amostradas.

Segundo Roque et al. (2010), a compactação nas zonas trafegáveis é intensificada com o controle de tráfego, uma vez que a passagem dos rodados de maquinários e implementos agrícolas ao longo do ano de cultivo é concentrada em linhas permanentes, o que torna os resultados obtidos coerentes e previsíveis.

Independentemente do tipo de preparo e da aplicação ou não de calcário, os resultados nessa zona foram inconsistentes no presente trabalho, corroborando com os dados obtidos por Guimarães (2019), onde todos os manejos permaneceram com condições inadequadas à penetração das raízes na área de passagem dos rodados.

Analisando a resistência à penetração do solo nos transeptos com sete pontos distanciados a 0,15 m em cada manejo (Figura 3), observou-se maior compactação no PC sem nas zonas de canteiro em relação ao mesmo preparo com aplicação de calcário, onde esta foi mais presente nas camadas a partir de 0,2 m de profundidade, com RP elevadas concentradas nas distâncias de 0,0 a 0,15 m (aproximadamente centro do canteiro) (Figura 3A). No PC com, a compactação se demonstrou ter sido mais atenuada na mesma zona, apesar de apresentar restrições às raízes logo na metade da camada de 0,2 m nas mesmas distâncias do transepto supracitada e de não haver diferenças significativas entre o teor de umidade do solo entre as camadas (Figura 4).

Figura 3 – Resistência à penetração do solo (RP) nas camadas de 0,0 a 0,7 m de profundidade, nas distâncias 0, 0,15, 0,30, 0,45, 0,60, 0,75 e 0,90 m ao final do segundo ano de cultivo da cana-de-açúcar em um Latossolo Vermelho de textura média submetido ao preparo convencional (PC) (A) e preparo profundo (PP) (B), com e sem aplicação de calcário

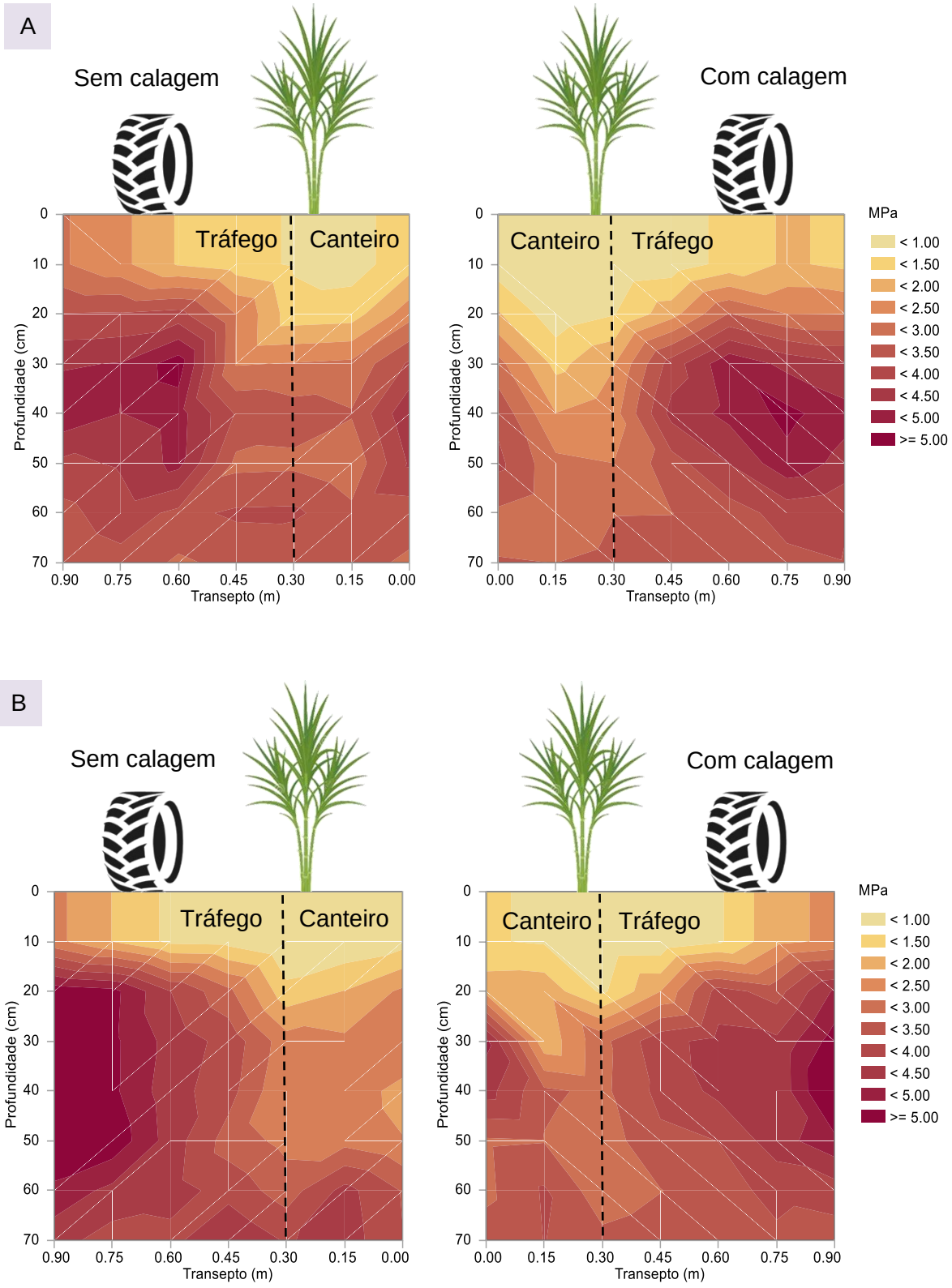
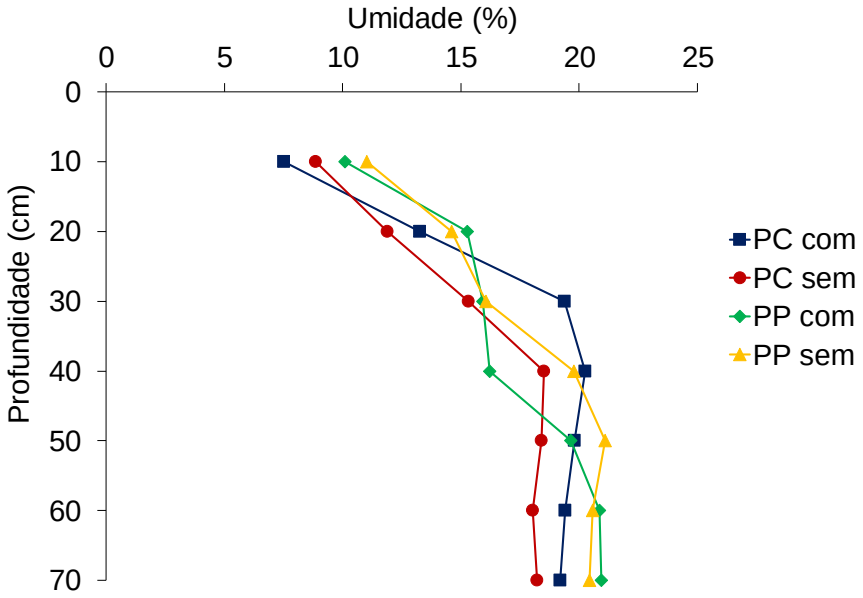


Figura 4 – Dados médios de umidade do solo (%) nas camadas 0,1, 0,2, 0,3, 0,4, 0,5, 0,6, e 0,7 m de profundidade, no segundo ciclo de cultivo da cana-de-açúcar em um Latossolo Vermelho de textura média submetido ao Preparo convencional (PC) e Preparo profundo (PP), com e sem aplicação de calcário



Embora haja uma visão mais clara em transepto e se tenha obtido um efeito mais atenuado no manejo com aplicação de calcário no preparo convencional, isto não ocorreu no tratamento PP com, que apresentou maior compactação no centro da zona de canteiro (0,0 a 0,15 m), principalmente na camada de 0,3 a 0,4 m, estendendo-se ao longo do perfil, enquanto que valores máximos de RP no mesmo preparo e sem a prática da calagem foram verificados nas ultimas camadas amostradas (Figura 3B).

Mesmo que haja na literatura trabalhos em que a calagem e outros condicionantes, como o gesso, proporcionaram melhorias em alguns atributos físicos do solo como agregação, densidade, porosidade total e resistência a penetração do solo (RAIJ, 2008; CASTRO; CALONEGO; CRUSCIOL, 2011; BERTOLLO, 2014; GOMES et al., 2017), isto ainda não está bem elucidado. Costa (2015) obteve redução na RP e aumento da umidade do solo com a aplicação de calcário e calcário + gesso nas profundidades de 0,1 a 0,2 m. Bertollo (2014) ao avaliar o SPD com aplicação de gesso + calcário, verificou efeito das doses de calcário com aplicação de 6 Mg ha^{-1} de gesso, o qual aumentou linearmente a RP com as doses crescentes de calcário agrícola. Já Oliveira et al. (2017) não obteve nenhuma influência dos dois condicionantes sobre a resistência a penetração do solo.

Os dois manejos convencionais, que foram submetidos ao preparo do solo em área total, apresentaram compactação elevadas espalhadas por todas as zonas trafegáveis, independentemente da prática da calagem. No tratamento PC sem verificou-se valores de RP restritivos logo na camada de 0,0 a 0,1 m, compreendendo uma área maior desta zona (0,60 a 0,90 m) comparado a PC com que na mesma camada superficial houve início de RP limitante na distância 0,75 m (aproximadamente centro do tráfego), exato local que delimita a passagem dos rodados. Em profundidade, os valores máximos de RP foram constatados nas camadas entre 0,3 a 0,5 m nas distâncias 0,60 a 0,90 m em ambos os tratamentos (Figura 3A).

Quanto ao preparo profundo (Figura 3B), foi notadamente observado compactação máxima de forma vertical na zona de tráfego nos pontos de passagem dos rodados (a partir de 0,75 m), a qual se estendeu em profundidades maiores (0,2 a quase 0,6 m) no PP sem comparado aos manejos convencionais. De modo geral, em todos os tratamentos estudados houve um aumento da RP do solo da linha de plantio para o rodado, como observado por Roque et al. (2010) e Esteban (2018). Contudo, em PP sem, esse efeito ocorreu verticalmente em profundidade maior, sendo estendido gradativamente atingindo RP mais baixas à medida que se aproximava da zona de canteiro. Em PP com a RP mais elevada no tráfego foi constada em menor distância (0,90 m) nas camadas de 0,3 a 0,5 m.

Diante dos trabalhos supracitados em cana planta onde os valores de RP foram menores tanto em superfície como em profundidade nos preparos profundos, possivelmente devido ao período de tempo para amostragem ser mais curto, os resultados do presente estudo (Figura 3), indicam uma modificação da estrutura do solo a partir do segundo ano de cultivo da cana-de-açúcar, observadas em todos os tratamentos estudados.

Isto pode estar associado a um rearranjo das partículas do solo, a qual ocasiona o retorno da compactação, ocorrendo de forma mais sutil nos tratamentos com preparo convencional e de maneira acelerada e mais robusta no preparo profundo, sendo um tipo de preparo do solo que não proporciona um efeito residual para o segundo ano de produção da cultura.

Segundo Carvalho Júnior, Fontes e Costa (1998), ano após ano o solo acumula pressões pelo tráfego de máquinas provocando uma reacomodação das partículas que reduz a porosidade quando cria um arranjo estruturalmente forte para suportar as

cargas atuantes. Além disso, essa acomodação pode acontecer de forma natural ao longo do tempo, mesmo em áreas com redução de passagem de maquinários agrícolas.

1.8 CONCLUSÃO

O preparo profundo, independente da aplicação de calcário, proporciona as maiores resistência à penetração no perfil do solo a longo prazo.

Em transepto, a compactação é mais atenuada pela prática da calagem no preparo convencional.

O preparo profundo é mais rápido e robusto na acomodação das partículas do solo ao longo do perfil, acelerando o processo de compactação em relação ao manejo convencional a partir do segundo ano de cultivo da cana-de-açúcar.

REFERÊNCIAS

ALVES, E. R. **Atributos físicos e produtividade de cana planta com calagem e preparo profundo canteirizado em um Latossolo**. 2020. 85f. Tese (Doutorado em Agronomia/Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP.

AMORIM, F. R. **A competitividade dos sistemas de preparo de solo e plantio de cana-de-açúcar: uma análise dos sistemas utilizados por fornecedores e usinas no estado de São Paulo**. 2019. 163f. Tese (Doutorado em Gestão de Sistemas na Agricultura e Desenvolvimento Rural) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.

ARCOVERDE, S. N. S. **Atributos físicos e desempenho de cultivares de cana-de-açúcar em um Latossolo Vermelho Distroférrico submetido a dois sistemas de preparo.** 2018. 136f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, MS.

BERTOLLO, A. M. **Propriedades físicas de um latossolo após calagem, gessagem em manejos de solo**. 2014. 99f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Centro de Educação Superior Norte, Universidade Federal de Santa Maria, Frederico Westphalen, RS.

BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v.33, p.519-524, 1990.

CANA-DE-AÇÚCAR. **Acompanhamento da Safra Brasileira**: cana-de-açúcar, Brasília, DF, v. 7, n. 2, p. 11-16, ago. 2020. Safra 2020/21, Segundo levantamento. Disponível em: www.conab.org.br. Acesso em: 12 dez. 2020.

CASTRO, G. S. A.; CALONEGO, J. C.; CRUSCIOL, C. A. C. Propriedades físicas do solo em sistemas de rotação de culturas conforme o uso de corretivos da acidez. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 12, p. 1690–1698, 2011.

CARVALHO JÚNIOR, I. A.; FONTES, L. E. F.; COSTA, L. M. Modificações causadas pelo uso e formação de camadas compactadas e, ou, adensadas em um Latossolo Vermelho Escuro textura média, na região do Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, p. 505-514, 1998.

CAVALIERI, K.M.V. et al. Qualidade física de três solos sob colheita mecanizada de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.1541-1550, 2011.

COSTA, C. H. M. **Calagem superficial e aplicação de gesso em sistema plantio direto de longa duração: efeitos no solo e na sucessão milho/crambe/feijão-caupi.** 2015. 97f. Tese (Doutorado em Agronomia/Agricultura) – Faculdade de Ciências agronômicas “Júlio de Mesquita Filho”, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, Sp.

CURY, T. N.; DE MARIA, I. C.; BOLONHEZI, D. Biomassa radicular da cultura de cana-de-açúcar em sistema convencional e plantio direto com e sem calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, p. 1929-1938, 2014.

DE SÁ, M. A. C. et al. Qualidade física do solo e produtividade de cana-de-açúcar com uso da escarificação entre linhas de plantio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 51, n. 9, p. 1610-1622, 2016.

DRUDI, F. S. **Parâmetros para a padronização dos ensaios de colhedora de cana-de-açúcar para avaliação de seu desempenho energético.** 2017. 73f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agronômicas “Júlio de Mesquita Filho”, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP.

EMBRAPA. Centro nacional de pesquisa de solos**. Manual de métodos de análise de solo.** 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, 2013. 353p.

ESTEBAN, D. A. **Atributos do solo e desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar com diferentes espaçamentos de plantio e controle de tráfego.** 2018. 118f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.

FARONI, C.E.; TRIVELIN, P.C.O. Quantificação de raízes metabolicamente ativas de canade-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.41, n.6, p.1007-1013, 2006.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n.6, p. 1039-1042, 2011.

GARCIA, C. P. **Efeitos do preparo profundo do solo e da calagem na compactação do solo e na produtividade da cana-de-açúcar.** 2018. 96f. Dissertação (Mestrado em Agronomia-Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas “Júlio de Mesquita Filho”, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP.

GOMES, P. H. S. et al. Efeito do calcário e gesso nos atributos físicos do solo em sistema de plantio direto no oeste do Pará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 36., 2017, Belém. **Anais** [...]. Belém: SBCS, 2017.

GONÇALVES, W.G. et al. Least limiting water range in assessing compaction in a Brazilian Cerrado Latosol growing sugarcane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.38, p.432-443, 2014.

GONÇALVES, A. S. F. **Emissões de gases de efeito estufa e estoque de carbono em função da calagem e do preparo do solo na cana-de-açúcar**. 2020. 150f. Tese (Doutorado em Agronomia/Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas “Júlio de Mesquita Filho”, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP.

GUIMARÃES, T. M. **Preparo profundo e calagem em solos arenoso e argiloso na física e carbono do solo e na produtividade de cana-de-açúcar.** 2019. 107f. Tese (Doutorado em Agronomia/Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas “Júlio de Mesquita Filho”, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP.

IBGE. Pesquisa Industrial Produção Física - Agroindústria. Comunicação Social de 15 de fevereiro, 2005.

LIMA, A. D. **Modelos matemáticos aplicados a problemas na cultura da cana-de-açúcar e no aproveitamento da energia da biomassa**. 2006. 75f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas “Júlio de Mesquita Filho”, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP.

MERCANTE, E.; URIBE-OPAZO, M. A.; SOUZA, E. G. Variabilidade espacial e temporal da resistência mecânica do solo à penetração em áreas com e sem manejo químico localizado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 6, p. 1149-1159, 2003.

OLIVEIRA, M. P. et al. Efeito residual da gessagem e calagem na resistência à penetração do solo obtida com dois penetrômetros. **Revista de Agricultura Neotropical**, Cassilândia, v. 4, n. 1, p. 58-64, 2017.

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

PORTUGAL, A. F.; OSTA, A. D. V.; COSTA, L. M. Propriedades físicas e químicas do solo em áreas com sistemas produtivos e mata na região da zona da mata mineira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, n.3, p. 575-585, 2010.

RAIJ, B. VAN. et al. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais.** Campinas: Instítuto Agronômico, 2001. 284p.

RAIJ, B. Gesso na agricultura. Campinas: Instituto Agronômico, 2008. 233 p.

ROQUE, A. A. O. et al. Controle de tráfego agrícola e atributos físicos do solo em área cultivada com cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.45, n.7, p.744-750, 2010.

ROSSETTO, R. et al. Adubação e calagem em cana-de-açúcar. **O Agronômico**, Campinas, v. 57, n.2, p.22-23, 2005.

SANTOS JUNIOR, J. D. G. et al. Sistema plantio direto de cana-de-açúcar no cerrado. **Circular técnica**, Planaltina, DF, 2015.

SILVA, A.A.; CASTRO, S.S. Indicadores macro e micromorfológicos da qualidade física de um Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar. **Mercator**, Fortaleza, v.4, n.3, p.169-185, 2015.

SILVA, S. V.; SANTOS, J. Z. L.; TUCCI, A. F.; CARDOSO, A. A. S. Efeito de doses de calcário e cultivares na produtividade e qualidade agroindustrial da cana-de-açúcar em solo da Amazônia. **Revista AgroAmbiente On-line**, v. 8, n. 3, p. 298-305, 2014

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

SPIRONELLO, A. et al. Cana-de-açúcar. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo.** Campinas: IAC, 1996. cap. 22, p. 237- 239.

STOLF, R.; FERNANDES, J.; FURLANI NETO, V. Penetrômetro de impacto – modelo IAA/Planalsucar – STOF (recomendações para seu uso). **Revista STAB**, jan/fev. 1983.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Rev. Bras. Ci. Solo**, v.15, p.229-235, 1990.

TAVARES FILHO, J. et al. Resistência do solo à penetração e desenvolvimento do sistema radicular do milho (Zea mays) sob diferentes sistemas de manejo em um

Latossolo Roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, p.725-730, 2001

TOMAZ, H. V. Q. **Sistema de preparo profundo do solo e sua influência no desenvolvimento da cana-de-açúcar**. 2013. 132f. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP.

UNGER, P.W.; KASPAR, T.C. Soil compaction and root growth: a review. **Agronomy Journal**, v.86, p.759-766, 1994.

VAN LIER, Q. J.; GUBIANI, P. I. Beyond the “Least Limiting Water Range”: rethinking soil physics research in Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.39, p. 925-939, 2015.

VASCONCELOS, A. C. M.; DINARDO-MIRANDA, L. L. **Dinâmica do desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar e implicações no controle de nematóides**. Revista e Ampliada. 2ª Edição. Campinas. 2011.

VEEN, B.W.; BOONE, F.R. The influence of mechanical resistance and soil water on the growth of seminal roots of maize. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.16, p.219-226, 1990.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A adoção de sistemas conservacionistas de manejo do solo, como o Preparo profundo em faixas aliado à prática da calagem com aplicação de calcário localizada e em profundidade, minimiza as emissões relativas de carbono para a atmosfera em cana-de-açúcar de primeiro corte. Além disso, aumenta a produtividade de colmos e promove incrementos nos estoques de carbono no solo pela redução de área mobilizada e diminuição do número de implementos de preparo em uso, favorecendo a permanência do C armazenado e a sustentabilidade na produção da cultura ao longo do tempo.

O preparo profundo em faixas, independente da aplicação de calcário, promove um acelerado retorno da compactação do solo ao longo do perfil, logo no segundo ano de produção da cana-de-açúcar, não possuindo um efeito residual prolongado na resistência à penetração do solo.

Mais pesquisas precisam ser realizadas para uma avaliação mais efetiva nos anos seguintes, principalmente com relação à compactação do solo, devido se tratar de uma cultura com ciclo longo podendo atingir entre 5 a 7 anos, onde diferentes atividades para o manejo da cultura que afetam as propriedades físicas do solo e os fluxos de GEE são realizadas todos os anos.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE FILHO, M, R. et al. Árvore do conhecimento do milho: plantio convencional. Campinas: **Agência Embrapa de Informação Tecnológica**, 2016. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/milho/arvore /CONTAG01_32_59200523355.html. Acesso em: 28 agosto 2020.

AMORIM, F. R. **A competitividade dos sistemas de preparo de solo e plantio de cana-de-açúcar: uma análise dos sistemas utilizados por fornecedores e usinas no estado de São Paulo**. 2019. 163f. Tese (Doutorado em Gestão de Sistemas na Agricultura e Desenvolvimento Rural) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas.

ANDRÉ, J.A. **Sistemas de preparo de solo para cana-de-açúcar em sucessão com amendoin**. 2009. 32f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, SP.

ARCOVERDE, S. N. S. **Atributos físicos e desempenho de cultivares de cana-de-açúcar em um Latossolo Vermelho Distroférrico submetido a dois sistemas de preparo**. 2018. 136f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, MS.

ARCOVERDE, S. N. S. et al. Atributos físicos do solo cultivado com cana-de-açúcar em função do preparo e época de amostragem. **Revista de Agricultura Neotropical**, Cassilândia-MS, v. 6, n. 1, p. 41-47, 2019.

ASSAD. E.; PINTO. H. S. **Aquecimento Global e a Nova Geografia da Produção Agrícola no Brasil.** São Paulo, SP: Embrapa/Unicamp, 2008. 84p.

BARBIERI, J.L.; ALLEONI, L.R.F.; DONZELLI, J.L. Avaliação agronômica e econômica de sistemas de preparo e solo para cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.21, n.1, p.89-98, 1997.

BOECKX, P.; VAN CLEEMPUT; VILLARALVO, I. Methane oxidation in soils with different textures and land use. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.49, n.1-3, p. 91-95, 1997.

BORDONAL, R. O. **Balanço de gases de efeito estufa em áreas de cana-de-açúcar sob diferentes cenários de manejo, considerando-se mitigações**. 2012. 67f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Produção Vegetal) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, SP.

BRASSIOLI, F. B.; PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M. Avaliação agronômica da escória de siderurgia na cana-de-açúcar durante cinco ciclos de produção. **Bragantia**, Campinas, v. 68, n. 2, p. 381-387, 2009.

BREMNER, J. M. Sources of nitrous oxide in soils. **Nutrient Cycling in Agroecosystems,** Dordrecht, v. 49, n. 1-3, p. 7-16, 1997.

CAMILOTTI, F. et al. Efeito prolongado de sistemas de preparo do solo com e sem cultivo de soqueira de cana crua em algumas propriedades físicas do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.25, n.1, p.189-98, 2005.

CANA-DE-AÇÚCAR. **Acompanhamento da Safra Brasileira**: cana-de-açúcar, Brasília, DF, v. 7, n. 2, p. 11-16, ago. 2020. Safra 2020/21, Segundo levantamento. Disponível em: www.conab.org.br. Acesso em: 14 ago. 2020.

CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTURITTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Org.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. p. 375-470.

CARMO, J. B. et al. Infield greenhouse gas emissions from sugarcane soils in Brazil: effects from synthetic and organic fertilizer application and crop trash accumulation. **Global Change Biology Bioenergy**, v. 5, p. 267-280, 2013.

CARVALHO, L. A. et al. Produtividade e viabilidade econômica da cana-de-açúcar em diferentes sistemas de preparo do solo no Centro-oeste do Brasil. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v.34, n.1, p.200-211, 2011.

CERRI, C. C. et al. Challenges and opportunities of soil carbono sequestration in Latin America. In: LAL, R.; BERNOUX, M.; ETCHEVERS, J. D.; CERRI, C. E. P. (Ed). **Carbon sequestration in soils of Latin America**. New York: The Haworth Press, 2006. V. 1, p. 41-47.

CERRI, C.C. et al. Estoques de carbono no solo e fluxo de gases do efeito estufa no agrossistema cana-de-açúcar. In: L. A. B. CORTEZ. (Org.). **Bioetanol de Cana-de-açúcar – P&D para produtividade e sustentabilidade**. 1 ed. São Paulo: Blucher, p.203-215, 2010a.

CERRI, C. C. et al. Greenhouse gas mitigations in Brazil for land-use change, livestock and agriculture. **Scientia Agricola**, v. 67, n. 1, 2010b.

CHALCO VERA, J. C.; ACRECHE, M. M. Towards a baseline for reducing the carbono budget in sugarcane: three years of carbono dioxide and methane emissions quantification. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 267, p. 156-164, 2018.

CHAPUIS-LARDY, L. et al. Soils, a sink for N2O?: a review. **Global Change Biology**, Oxford, v. 13, n. 1, p. 1-17, 2007.

DEGASPARI, I. A. M. et al. Emissão de N_2O e de CO_2 em cultivo de cana-de-açúcar em função da presença de palha sobre o solo. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 34., 2013, Florianópolis. **Anais** [...]. Florianópolis: CBCS, 2013.

DEGASPARI, I. A. M. et al. Nitrogen sources and application rates affect emissions of N_2O and NH_3 in sugarcane. **Nutr Cycl Agroecosyst**, v. 116, p. 329-344, 2020.

DEMATTÊ, J. L. I. Recuperação de manutenção da fertilidade do solo. Piracicaba: Potafos, 2005. 24p. **Informações Agronômicas** - Boletim Informativo, 111.

DERPSCH, R. et al. About the necessity of adequately defining no-tillage - a dicussion paper. In: WORLD CONGRESS OF CONSERVATION AGRICULTURE, 5.; 2011, Brisban. Proceedings...2011, p.90-91.

DIAS, F.L.F. **Sistemas de preparo de solo em área de colheita mecanizada de cana crua**. 2001. 83 f. Tese (Doutorado em produção vegetal) – Faculdade de Ciências agrárias e veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, SP.

DIAS, N. M. S. **Efeito da aplicação de vinhaça na emissão de gases do efeito estufa e na comunidade desnitrificante e metanogênica do solo**. 2013. 92 f. Dissertação (Mestrado em Biologia na Agricultura e no Ambiente) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP.

DOMINGUES, L.A.S. **Atributos físicos, desenvolvimento radicular e produtividade de cana-de-açúcar em preparos de solo em áreas de renovação e expansão**. 2012. 92f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Universidade de Uberlândia, Uberlândia, MG.

DUARTE JUNIOR, J.B.; COELHO, F.C. A cana-de-açúcar em sistema de plantio direto comparado ao sistema convencional com e sem adubação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, n.6, p.576-583, 2008.

ESCOBAR. L. F. **Emissão de gases de efeito estufa em sistemas de manejo em solo do planalto médio do Rio Grande do Sul.** 2008. 104f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

FAO – Organização das nações unidas para a alimentação e agricultura. Recarbonization of global soils. 2020. Disponivel em:<http://www.fao.org/global-soil-partnership/resources/highlights/detail/en/c/1201385/>. Acesso em 05 agosto 2020.

FIGUEIREDO, E. B. **Balanço de gases de efeito estufa e emissões de CO_2 do solo nos sistemas de colheita da cana-de-açúcar manual queimada e mecanizada crua**. 2012. 96f. Tese (Doutorado em Agronomia/Produção Vegetal) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, SP.

FORSTER, P. et al. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. *In*: SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K.B.; TIGNOR, M.; MILLER, H.L. **Climate change 2007: Physical Science Basis**. New York: Cambridge University Press, p. 129-234, 2007.

FORTIN, M. C.; ROCHETTE, P.; PATTEY, E. Soil carbon dioxide fluxes from conventional and no-tillage small-grain cropping systems. **Soil Sci. Soc. Am. J**., v. 60, p.1541-1547, 1996.

FREITAS, G. R. Preparo do solo*. In*: PARANHOS, S. B. (Cool.). **Cana-de-açúcar cultivo e ultilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. v. 1, p. 271-332.

FUENTES, J.P. et al. Microbial activity affected by lime in a long-term no-till soil. **Soil Tillage and Research**, Amsterdam, v.88, n.1-2, p.123- 131, 2006.

GARCIA, C. P. **Efeitos do preparo profundo do solo e da calagem na compactação do solo e na produtividade da cana-de-açúcar.** 2018. 96f. Dissertação (Mestrado em Agronomia-Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas “Júlio de Mesquita Filho”, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP.

GRUTZMACHER, P. **Estoque de carbono no solo e emissão de gases de efeito estufa em sistema de produção de milho fertilizado com iodo de esgoto em longo prazo**. 2016. 104 f. Tese (Doutorado em Agricultura Tropical e Subtropical) – Instituto Agronômico, Campinas, SP.

GUIMARÃES, T. M. **Preparo profundo e calagem em solos arenoso e argiloso na física e carbono do solo e na produtividade de cana-de-açúcar.** 2019. 107f. Tese (Doutorado em Agronomia/Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas “Júlio de Mesquita Filho”, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP.

HERMANN, E. R. **Resposta de três variedades de cana-de-açúcar (Sacharum spp) cultivadas em solos ácidos submetidos a calagem e gessagem**. 2005. 102 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2005.

HÜSTSCH, B. W.; WEBSTER, C. P.; POWLSON, D. S. Long-term effects of nitrogen fertilization on methane oxidation in soil of the Broadbalk wheat experimente. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 25, p. 1307-1315, 1993.

HUTSCK, B. W. Methane oxidation, nitrification, and counts of methanothophic bactéria in soils from a long-term fertilization experiment (“EwigerRoggenbau” at Halle). **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.164, p.21-28, 2001.

IAMAGUTI, J. L. et al. Preparo do solo e emissão de CO_2, temperatura e umidade do solo em área canavieira. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, v. 19, n. 5, p. 497–504, 2015.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2007**: Mitigation.Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, Cambridge University Press, 92p, 2007.
IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change and land.** 2018. Disponivel em: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/08/4.-SPM_Approved_Microsite_FINAL.pdf>. Acesso em: 14 ago. 2020

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Guidelines for National Green House Gas Inventories: Agriculture, Forest and Other Land Use. *In*: National Greenhouse Gas Inventories Programme, Hayama, v. 4, 2006.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2014**: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing

Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp. 2014.

KAMIMURA, K. M. et al. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho sob cultivo de arroz de terras altas em diferentes manejos do solo e da água. **Bragantia**, Campinas, v.68, n.3, p.723-731, 2009.

LA SCALA, N.; BOLONHEZI, D.; PEREIRA, G. T. Short-term soil CO_2 emission after conventional and reduced tillage of a no-till sugar cane area in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v.91, p.244- 248, 2006.

LAL, R. Challenges and opportunities in soil organic matter research. **European Journal of Soil Science**, Malden, v. 60, n. 2, p. 158–169, 2009.

LAL, R. Digging deeper: A holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems. **Global Change Biology**, v. 24, p. 3285–3301, 2018.

LE MER, J.; ROGER, P. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: a review. **European Journal of Soil Biology**, Braunscheig, v. 37, n. 1, 2001. p.25-50.

LEITE, G. M. V. et al. Efeito de fontes e doses de silicato de cálcio no rendimento agrícola e na qualidade tecnológica da cana-de-açúcar, cultivar SP80-18161. **Ciência e Agrotecnologia**., Lavras, v. 32, n. 4, p. 1120-1125, 2008.

LIMA, C. C. **Canteirização no preparo convencional e profundo para cana-de-açúcar: atributos físicos e sistema radicular**. 2016. 130f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) – Instituto Agronômico de Campinas, Campinas, SP.

LIMA, L. B. Emissões de N_2O em sistemas agrícolas. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 9, n. 16, p. 998, 2013.

LINN, D.M.; DORAN, J.W. Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and non-tilled soils. **Soil Science Society of America Journal**, Amsterdam, v. 48, n. 6, p. 1267-1272, 1984.

LIU, X. J. et al. The impacto of nitrogen placement and tillage on NO, N_2O, CH_4 and CO2 fluxes from a clay loam soil. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 280, n. 1-2, p. 177-188, 2006.

LOPES, I. M. et al. Emissões de N_2O em Solos sob Cultivo de Cana-de-Açúcar no bioma Mata Atlântica: Efeito dos Sistemas de Colheita e da Adubação com Vinhaça. **Revista Virtual de Quimica**, v. 9, n. 5, p. 1930-1943, 2017.

LUDWIG, J. et al. Soil-air exchange of nitricoxide: an overview of processes, environmental factors, and modeling studies. **Biogeochemistry**, v. 52, p. 225–257, 2001.

MARASCA, I. et al. Soil Compaction Curve of an Oxisol under Sugarcane Planted after In-Row Deep Tillage. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v.39, n.5, p.1490-1497, 2015.

MASON, C. F. Decomposição. Trad. CAMARGO, O. A. São Paulo: Editora USP, 1980. 63p. MCINERNEY, M.J.; BRYANT, M.P. Review of methane fermentation fundamentals. *In*: WISE D.L. (Ed). **Fuel gas production from biomass**. New York: Chemical Rubber, vol.1, 1981. p. 19-46.

MATHEWS, J. A. Carbon-negative biofuels. **Energy Police**, Oxford, v. 36, n. 3, p. 940-945, 2008.

MCTI - MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. **Modelagem setorial de opções de baixo carbono para agricultura, florestas e outros usos do solo (AFOLU)**. 2018. Disponível em: <http://www.mctic.gov.br>. Acesso em: 25 jul 2020.

MEDA, A. R. et al. Plantas invasoras para melhorar a eficiência da calagem na correção da acidez subsuperficial do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.26, p. 647-654, 2002.

MMA – Ministério Do Meio Ambiente. **Acordo de Paris**. 2018. Disponível em: <https://www.mma.gov.br>. Acesso em: 25 jul. 2020.

MOITINHO, M. R. et al. Efeito do preparo do solo e resíduo da colheita de cana-de-açúcar sobre a emissão de CO_2. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, p. 1720-1728, 2013.

MORELLI, J.L. et al. Efeito do gesso e do calcário nas propriedades químicas de solos arenosos álicos e na produção de cana-de-açúcar. **STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, vol. 6 n. 2, pg. 24-31. 1987.

MORGADO, I. F.; VIEIRA, J. R. Tecnologias canavieiras nas regiões Norte Fluminense e Sul do Espírito Santo. **Boletim Técnico**, Campos dos Goytacazes: UFRRJ, 1999. 61p.

MORO, V. J. et al. Emissão de óxido nitroso na cultura da cana-de-açúcar sob diferentes sistemas de preparo do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 33., 2011, Uberlândia. Solos nos biomas brasileiros: sustentabilidade e mudanças climáticas: **anais**...Uberlândia: SBCS: UFU, ICIAG, 2011. 1 CD-ROM.

MOSIER, A. R. et al. Closing the global N_2O budget: nitrous oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 52, p. 225-248, 1998.

MOSIER, A.; WASSMANN, R.; VERCHOT, L. et al. Methane and nitrogen oxide fluxes in tropical agricultural soils: sources, sinks and mechanisms. **Environment, Development and Sustainability**, v.6, p.II-49, 2004.

NATALE, W. et al. Viabilidade econômica do uso do calcário na implantação de pomar de goiabeiras. **Ciência e agrotecnologia.**, Lavras, v. 34, n. 3, p. 708-713, 2010.

NOVACANA. Sistema de preparo do solo para o cultivo da cana-de-açúcar. 2013. Disponível em: < https://www.novacana.com/cana/sistemas-preparo-solo-plantio-da-cana>. Acesso em: 17 agosto 2020.

OLIVEIRA, M. E. D. **Estimativas de emissões de N_2O e CH_4 na cultura da cana-de-açúcar, no estado de São Paulo.** 2014. 112F. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP.

PAN, B. et al. Ammonia volatilization from synthetic fertilizers and its mitigation strategies: A global synthesis. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 232, p. 283–289, 2016.

PANOSSO, A. R. et al. Soil CO_2 emission and its relation to soil properties in sugarcane areas under Slash-and-burn and Green harvest. **Soil and Tillage Reseach**, Amsterdam, v. 111, p. 190–196, 2011.

PAULA, J. A. A. et al. Sistema informatizado para recomendação da calagem e gessagem em solos agrícolas brasileiros. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer, Goiânia, v.8, n.15; p. 1587, 2012.

PIERREHUMBERT, R. T. Infrared radiation and planetary temperature. **Physics Today,** p. 33-38, 2011.

PISSIONI, L. L. M. **Emissão de N_2O pela palha da cana-de-açúcar na região de Iracemápolis, SP**. 2011. 74f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP.

PRADO, R. M. Efeito do calcário sob diferentes modos de incorporação antes da instalação do sistema plantio direto. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental.**, v. 7, n. 3, p. 478-482, 2003.

RAIJ, B. Gesso na agricultura. Instituto Agronômico, Campinas. 233p. 2008.

ROQUE, A. A. O. et al. Controle de tráfego agrícola e atributos físicos do solo em área cultivada com cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.45, n.7, p.744-750, 2010.

ROSSETO, R. et al. Calagem para cana-de-açúcar e sua interação com a adubação potássica. **Bragantia**, Campinas, v. 63, n. 1, p. 105-119, 2004.

ROSSETTO, R. Manejo conservacionista e reciclagem de nutrientes em cana-de-açúcar tendo em vista a colheita mecânica. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n 124, 2011.

SANCHEZ-MARTIN, L. et al. The influence of soluble carbon and fertilizer nitrogen on nitric oxide and nitrous oxide emissions from two contrasting agricultural soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 40, p.142–151, 2008.

SANTIAGO, A. D. ROSSETTO, R. Adubação mineral. **Árvore do conhecimento**: cana-de-açúcar. 2016. Campinas: Agência Embrapa de Informação Tecnológica. Disponível em:https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de acucar/arvore/CONTAG01_85_22122006154841.html. Acesso em: 28 agosto 2020.

SANTOS JUNIOR, J. D. G. et al. Sistema plantio direto de cana-de-açúcar no cerrado**. Circular técnica**, Planaltina, DF, 2015.

SCHROEDER, D. **Bodenkunde in Stichworten**. 4. ed. Unterageri: Ferdinand Hirt AG, 1984.

SCHWARTZ, R.C.; BAUMHARDT, R.L.; EVETT, S.R. Tillage effects on soil water redistribution and bare soil evaporation throughout a season. **Soil and Tillage Reseach**, v. 110, p. 221- 229, 2010.

SEEG - SISTEMA DE ESTIMATIVA DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA. Emissões do setor de agropecuária. 2017. Disponível em: <https://www. imaflora.org/downloads/biblioteca/55ca3a26a856a_agropecuaria_2015.pdf>. Acesso em: 14 ago. 2020.

SIGNOR, D. **Estoque de carbono e nitrogênio e emissões de gases de efeito estufa em áreas de cana-de-açúcar na região de Piracicaba.** 2010. 119 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP.

SIGNOR, D.; CERRI, C. E. P. Emissões de óxido nitroso em solos agrícolas: uma revisão. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 43, n. 3, 2013.

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

SILVA, A.A.; CASTRO, S.S. Indicadores macro e micromorfológicos da qualidade física de um Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar. **Mercator**, Fortaleza, v.4, n.3, p.169-185, 2015.

SILVA, E. F.; et al. Emissão de CO_2 do solo associada à calagem em área de conversão de laranja para cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.34, n.5, p. 885-898, 2014a.

SILVA, S. V. et al. Efeito de doses de calcário e cultivares na produtividade e qualidade agroindustrial da cana-de-açúcar em solo da Amazônia. **Revista AgroAmbiente On-line**, v. 8, n. 3, p. 298-305, 2014b.

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

SNYDER, C. S. et al. Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 133, p. 247-266, 2009.

SOARES, D. A. **Emissões de gases de efeito estufa por fertilizantes nitrogenados em lavoura cafeeira irrigada.** 2016. 128f. Tese (Doutorado em Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

SOUZA, W. L. B. **Emissão de gases de efeito estufa associada ao manejo da cana-de-açúcar no Planalto Ocidental Paulista**. 2016. 77 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, SP.

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

SPIRONELLO, A. et al. Cana-de-açúcar. In: RAIJ, B. V; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: IAC, 1996. cap. 22, p. 237- 239. (Boletim Técnico n. 100).

STAUT, L.A. Condições dos solos para o cultivo de cana-de-açúcar. 2006. Disponível em: <http://www.infobibos.com/Artigos/2006_2/CanaSolo/index.htm>. Acesso em: 12 ago. 2020.

TAVARES, O.C.H.; LIMA, E.; ZONTA, E. Crescimento e produtividade da cana planta cultivada em diferentes sistemas de preparo do solo e de colheita**. Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v.32, n.1, p.61-68, 2010.

THOMSON, A. J. et al. Biological sources and sinks of nitrous oxide and strategies to mitigate emissions. Philosophical Transactions of The Royal Society. **Biological Sciences**, London, v. 367, n. 1593, p. 1157-1168, 2012

USSIRI, D.A.N.; LAL, R.; JARECKI, M.K. Nitrous oxide and methane emissions from long-term tillage under a continuous corn cropping system in Ohio. **Soil and Tillage Research**, v. 104, p. 247-255, 2009.

VARGAS, V. P. et al. Sugarcane Crop Residue Increases N2O and CO2 Emissions Under High Soil Moisture Conditions. Sugar Tech 2014, 16, 174.

WANG, W.; FENG, J.; OIKAWA, T. Contribution of root and microbial respiration to soil CO2 efflux and their environmental controls in a humid temperate grassland of Japan. **Pedosphere**, Beijing, v.19, n.1, p.31-39, 2009.

WORLD RESOURCES INSTITUTE. 4 gráficos para entender as emissões de gases de efeito estufa por país e por setor. 2016. Disponível em: < https://wribrasil.org.br>. Acesso em: 14 ago. 2020.

ZANDONA, R.R. et al. Gesso e calcário aumentam a produtividade e amenizam o efeito do déficit hídrico em milho e soja. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v.45, p.128-137, 2015.

ZOTELLI, L. C. **Palha e vinhaça: emissão de CO_2, N_2O e CH_4 em solo com cana-de-açúcar**. 2012. 77f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) – Instituto Agronômico de Campinas, Campinas, SP.