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

FCA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
UNESP | BOTUCATU

TIARA MORAES GUIMARÃES

PREPARO PROFUNDO E CALAGEM EM SOLOS ARENOSO E ARGILOSO NA FÍSICA E CARBONO DO SOLO E NA PRODUTIVIDADE DE CANA-DE-AÇÚCAR

Botucatu

2019

TIARA MORAES GUIMARÃES

PREPARO PROFUNDO E CALAGEM EM SOLOS ARENOSO E ARGILOSO NA FÍSICA E CARBONO DO SOLO E NA PRODUTIVIDADE DE CANA-DE-AÇÚCAR

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP - Campus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia (Agricultura).

Orientador: Prof. Dr. Juliano Carlos Calonego

Botucatu

2019

G963p

Guimarães, Tiara Moraes
Preparo profundo e calagem em solos arenoso e argiloso na física e carbono do solo e na produtividade de cana-de-açúcar / Tiara Moraes Guimarães. -- Botucatu, 2019
107 p. : tabs., fotos

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu
Orientador: Juliano Carlos Calonego

1. Cana-de-açúcar. 2. Solos ácidos. 3. Capineira. 4. Física do solo. 5. Humus. 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: "PREPARO PROFUNDO E CALAGEM EM SOLOS ARENOSO E ARGILOSO NA FÍSICA E CARBONO DO SOLO E NA PRODUTIVIDADE DE CANA-DE-AÇÚCAR"

AUTORA: TIARA MORAES GUIMARÃES
ORIENTADOR: JULIANO CARLOS CALONEGO

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

Prof. Dr. JULIANO CARLOS CALONEGO
Produção e Melhoramento Vegetal / Faculdade de Ciências Agronômicas - UNESP - Câmpus de Botucatu

Prof. Dr. ALEXANDRIUS DE MORAES BARBOSA
Produção Vegetal / Universidade do Oeste Paulista

Dr. GUSTAVO PAVAN MATEUS
Descentralização do Desenvolvimento / Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios

Prof. Dr. KLEBER PEREIRA LANÇAS
Engenharia Rural / Faculdade de Ciências Agrônomica - UNESP

Pós-doutorando JOÃO PAULO GONSIORKIEWICZ RIGON
Produção e Melhoramento Vegetal / Faculdade de Ciencias Agronomicas/Unesp Botucatu

Botucatu, 30 de julho de 2019.

Ao meu querido avô Renan,

um grande incentivador dos estudos,

que certamente está agora lá "em cima" muito feliz

DEDICO

Aos meus amados pais Renine e Vanice

à minha querida irmã Vanine

e ao meu noivo Claudio pelo amor e

companheirismo incondicionais

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo que Ele tem me permitido viver e aprender.

Aos amigos espirituais, pelas orientações e proteção.

À minha família sempre presente, pelo incentivo e amor incondicional.

Ao meu orientador prof. Dr. Juliano Carlos Calonego por acreditar em mim e sempre me incentivar. Gratidão pela amizade, confiança, paciência e por todo suporte no desenvolvimento deste trabalho.

À Faculdade de Ciências Agronômicas, pela acolhida e suporte para a realização do doutorado.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pela concessão da bolsa de estudos.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo financiamento do projeto.

Ao Grupo Zillor e às Agrícolas Tecnocana e Três Lagoas, pela parceria no desenvolvimento e condução do trabalho.

Aos membros da banca examinadora pela disponibilidade.

À coordenação do curso de Pós-Graduação em Agronomia (Agricultura), pela dedicação e qualidade de ensino.

Aos professores do Departamento de Produção e Melhoramento Vegetal – DPMV.

Aos funcionários do DPMV: Eliane, Yara, Dorival, Valéria, Casemiro, Camargo e Cirinho, por todo auxílio que recebi e pela amizade.

Ao Laboratório de Biologia do solo da Faculdade de Ciências Agrárias – UNOESTE, em especial ao Prof. Dr. Fabio Fernando de Araujo e Prof. Dra. Rita de Cássia Lima Mazzuchelli, pela parceria nas análises microbianas do solo.

Ao Centro de Isótopos Estáveis Prof. Dr. Carlos Ducatti – CIE, aos funcionários Cibele Regina, Mariana Sasso, Nádia dos Reis, Evandro Tadeu e ao professor Vladimir Eliodoro Costa por me permitir utilizar os moinhos criogênicos e pela disponibilidade de ajuda com as minhas amostras.

Aos funcionários da biblioteca e da seção de Pós Graduação, sempre solícitos, grata pela atenção e serviços prestados.

Aos estagiários do Laboratório Solo-Planta, Vinicius Vieira, Julia Cassemiro, Thalia Santos e Darieli Moreto pela parceria e ajuda essencial na condução deste trabalho.

Aos companheiros do projeto temático (“Team cana”), Ciro Pozzi, Erilene Romeiro, Ana Stella Freire, Patrícia Dias, Ariane Garcia, Gabriela Ferraz, Jorge Martinelli, Daniele Scudeletti, Murilo de Campos, Ana Paula Matusevicius pela colaboração nas coletas, trabalho conjunto e companheirismo.

Aos colegas Igor Vilela, Hugo Mota e Daniel Martins pela ajuda nas coletas das amostras e ao colega Gustavo Ferreira pela grande ajuda e pelos momentos de descontração durante as análises tão cansativas.

À Terra Brasil Consultoria Agrícola, pela prestação de serviços.

Aos colegas que fiz na pós-graduação, que indiretamente contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

Aos queridos amigos pelas boas conversas, pelas risadas e pelo incentivo ao longo dessa jornada: Silvia Capuani, João Paulo Rigon, Natália Rodrigues, Gleize Leviski, Letícia Pastore, Paula Caroline, Vania Fournou, Lilian Simonetti, Thais Botamede, Leonardo Rosolem, e tantas outras pessoas queridas que passaram pela minha vida neste período, gratidão!

Ao meu companheiro Claudio, por seu amor, incentivo, ajuda e pela paciência nos momentos difíceis.

A todos aqueles que, de alguma maneira, contribuíram para a realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

Com o advento de sistemas de direcionamento via satélite, onde é possível controlar tanto o tráfego das máquinas, quanto planejar e realizar o preparo e a sulcação apenas em locais pré-definidos, onde não haverá tráfego de máquinas, novos sistemas de preparo do solo têm surgido. O preparo profundo cateirizado consiste em preparar, corrigir e adubar o terreno somente na área onde serão confeccionados os sulcos de plantio, ou seja, somente na zona de crescimento das plantas, limitando a compactação em área específica de trânsito de maquinários. Porém, ainda é pouco conhecido os efeitos desse sistema de preparo na estrutura do solo e produtividade da cana-de-açúcar. Objetivou-se com esse trabalho avaliar, em área de cultivo de cana-de-açúcar, o efeito da calagem e do preparo do solo, na produtividade de colmos, nos atributos físicos do solo e na qualidade da matéria orgânica. Para isso, foram realizados dois experimentos, sendo um em solo de textura argilosa (Nitossolo Vermelho) e outro em solo de textura franco-arenosa (Latossolo Vermelho-Amarelo), utilizando-se o delineamento experimental de blocos casualizados, com quatro repetições. Os tratamentos foram constituídos por: Preparo Convencional (PC) sem aplicação de calcário, PC com aplicação de calcário, Preparo Profundo (PP) sem aplicação de calcário, e PP com aplicação de calcário. Foram avaliados os atributos físicos, carbono orgânico total (COT), fracionamento físico da MOS, biomassa microbiana do solo e produtividade de colmos. Em ambos os experimentos, o preparo do solo reduziu os teores de COT na área de canteiro até 20 cm de profundidade, quando realizou-se o preparo profundo, independente da aplicação de calcário, e quando realizou-se preparo convencional com calagem, com maior impacto no carbono associado aos minerais. A capacidade de imobilização de C pela biomassa microbiana do solo foi inversamente proporcional à intensidade de manejo do solo, com maiores teores de Cmic (carbono da biomassa microbina) e qMic (quociente microbiano) no sistema de preparo convencional, independente da aplicação de calcário para Nitossolo Vermelho, e com ausência de calagem no Latossolo Vermelho-Amarelo. Já o preparo profundo aumentou a RESP (respiração basal do solo) e o qCO_2 (quociente metabólico), independente da aplicação de calcário. As principais modificações na física do solo ocorreram em Nitossolo Vermelho, onde o preparo profundo no canteiro aumentou a macroporosidade e reduziu a densidade do solo até 40 cm de profundidade. A ação da haste subsoladora no preparo profundo reduziu a

compactação na camada de 60 a 80 cm de profundidade, aumentando os valores de macroporosidade. Em ambos os experimentos a aplicação de calcário aumentou a produtividade de colmos de cana-de-açúcar.

Palavras chave: *Sacharum spp*. Preparo profundo em faixas. Calcário. Atributos físicos do solo. Fracionamento físico da MOS.

ABSTRACT

The advent of satellite guidance systems promoted the emergence of the new tillage systems due to the possibility to control machine traffic, as well as to plan and prepare and furrow only in pre-defined locations where there will be no machine traffic. The deep soil tillage in the plant growth zone consists in the descompactation, liming and fertilization only in the area where the planting furrows will be made, ie only in the plant growth zone, limiting soil compaction in a specific machine traffic zone. However, the effects of this tillage system on soil structure and sugarcane yield are still poorly known.The aim of this experiment was to assess the effect of liming and soil tillage (deep tillage banded and conventional tillage), in the area of sugarcane production, on stalks yield, soil physical attributes and soil organic matter quality. For this, two experiments were carried out, one in clayey soil and the other in sandy soil, using a randomized blocks experimental design with four replications. The treatments were constituted by: conventional preparation (PC) without application of limestone, PC with limestone application, deep preparation (PP) without application of limestone, and PP with application of limestone. The physical attributes, total organic carbono, physical fractionation of organic matter, soil microbial biomass and stalk yield were evaluated. In both experiments, the soil tillage reduced the soil organic carbon in the plant growth zone, up to 20 cm depth, independent of the limestone application, and when PC with liming was carried out with higher carbon impact associated with minerals. The ability of C immobilization by soil microbial biomass was inversely proportional to soil management intensity, with higher levels of microbial biomass carbon and microbial quotient in the conventional tillage system, independent of the limestone application to the clayey soil, and with absence of liming in the sandy soil. On the other hand, the deep tillage increased the basal respiration and the metabolic quotient, independent of the application of limestone. The main changes in soil physics occurred in clayey soil, where deep soil tillage increased macroporosity and reduced soil density up to 40 cm deep. The action of the subsoiling rod in the deep preparation reduced the compaction in layer 60 to 80 cm deep, increasing the values of macroporosity. In both experiments the application of limestone increased the yield of sugarcane stalks.

Keywords: *Sacharum spp*. Deep strip-tillage. Lime. Soil physical atributes. Physical fraction of organic matter.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Espaçamento alternado (1,5 m x 0,9 m) em área de cana-de-açúcar. (Foto do Experimento 2 – Borebi – SP) 34

Figura 2 Precipitação Pluvial (mm) em Macatuba – SP, correspondente ao período de janeiro de 2015 a dezembro de 2017 35

Figura 3 Precipitação Pluvial (mm) em Borebi – SP, correspondente ao período de janeiro de 2015 a dezembro de 2017 35

Figura 4 Aplicação superficial em área total de calcário com equipamento "Nevoeiro" 42

Figura 5 Aplicação superficial de calcário dolomítico no canteiro com equipamento "Sollus" 43

Figura 6 Preparo convencional do solo com gradagem pesada (A), subsolagem (B) e gradagem leve (C) 44

Figura 7 Equipamento "Penta" com haste subsoladora e enxada rotativa (A) e Preparo profundo em metade da área (Canteiro) (B) 45

Figura 8 Abertura das trincheiras com mini retroescavadeira (A e B) e coleta de anéis volumétricos (C e D) 52

Figura 9 Câmara de Rhichards com anéis volumétricos 53

Figura 10 Penetrômetro convencional modelo Stolf 56

Figura 11 Transepto de coleta para análise de resistência à penetração pelo método de Stolf, onde os pontos de coleta estão numerados do 1 ao 9, distanciados em 15 cm 57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Atributos químicos do solo antes da implantação dos experimentos em um Nitossolo Vermelho (NV), Macatuba, SP, 2015 e em um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), Borebi, SP, 2015 37

Tabela 2 Estabilidade dos agregados antes da implantação dos experimentos em um Nitossolo Vermelho (NV), Macatuba, SP, 2015 e em um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), Borebi, SP, 2015 38

Tabela 3 Densidade do solo, porosidade total, macro e microporosidade antes da implantação dos experimentos em um Nitossolo Vermelho (NV), Macatuba, SP, 2015 e em um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), Borebi, SP, 2015 39

Tabela 4 Resistência do solo à penetração antes da implantação dos experimentos em um Nitossolo Vermelho (NV), Macatuba, SP, 2015 e em um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), Borebi, SP, 2015 40

Tabela 5 Caracterização dos calcários utilizados nos experimentos em um Nitossolo Vermelho (NV) Macatuba, SP, 2015 e em um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), Borebi, SP, 2015 41

Tabela 6 Doses de calcário aplicadas nos diferentes modos de preparo do solo em um Nitossolo Vermelho (NV), Macatuba, SP, 2015 e em um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), Borebi, SP, 2015 41

Tabela 7 Carbono orgânico total (COT), carbono orgânico particulado (COP), carbono orgânico associado aos minerais (COAM) e labilidade (LAB= (COP/COT)*100), nas profundidades de 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm, em um Nitossolo Vermelho, em função do tipo de preparo do solo, na presença ou ausência de aplicação de calcário, em coletas no canteiro de cana-de-açúcar, Macatuba, SP, 2017 60

Tabela 8 Carbono orgânico total (COT), carbono orgânico particulado (COP), carbono orgânico associado aos minerais (COAM) e labilidade (LAB= (COP/COT)*100), nas profundidades de 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm, em um Nitossolo Vermelho, em função do tipo de preparo do solo, na presença ou ausência de aplicação de calcário, em coletas na área de tráfego, Macatuba, SP, 2017 63

Tabela 9 Carbono da biomassa microbiana (Cmic), quociente microbiano (qMIC), quociente metabólico (qCO_2), respiração basal do solo (RESP) e desidrogenase em função dos tipos de preparo do solo

aplicação de calcário, em um Nitossolo Vermelho e probabilidade de F 65

Tabela 10. Porosidade total (Pt), microporosidade (Micro), macroporosidade (Macro), densidade do solo (Ds), agregados maiores que 2 mm (Ag>2), diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG) e índice de estabilidade de agregados (IEA), nas profundidades de 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm, em um Nitossolo Vermelho, em função do tipo de preparo do solo, na presença ou ausência de aplicação de calcário, em coletas no canteiro de cana-de-açúcar, Macatuba, SP, 2017 68

Tabela 11 Porosidade total (Pt), microporosidade (Micro), macroporosidade (Macro), densidade do solo (Ds), agregados maiores que 2 mm (Ag>2), diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG) e índice de estabilidade de agregados (IEA), nas profundidades de 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm, em um Nitossolo Vermelho, em função do tipo de preparo do solo, na presença ou ausência de aplicação de calcário, em coletas na área de tráfego, Macatuba, SP, 2017 71

Tabela 12 Resistência do solo à penetração nas distâncias 0 (D0), 15 (D15), 30 (D30), 45 (D45), 60 (D60), 75 (D75), 90 (D90), 105 (D105) e 120 (D120) cm do centro da linha da cultura, em um Nitossolo Vermelho, em função do tipo de preparo do solo, na presença ou ausência de aplicação de calcário, Macatuba, SP, 2017 74

Tabela 13 Produtividade de colmos da primeira colheita (TCH/16) e da segunda colheita (TCH/17) em função dos tipos de preparo do solo e aplicação de calcário, em um Nitossolo Vermelho e probabilidade de F 76

Tabela 14 Carbono orgânico total (COT), carbono orgânico particulado (COP), carbono orgânico associado aos minerais (COAM) e labilidade (LAB), nas profundidades de 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm, em um Latossolo Vermelho-Amarelo, em função do tipo de preparo do solo, na presença ou ausência de aplicação de calcário, em coletas no canteiro de cana-de-açúcar, Borebi, SP, 2017 78

Tabela 15 Carbono orgânico total (COT), carbono orgânico particulado (COP), carbono orgânico associado aos minerais (COAM) e labilidade (LAB), nas profundidades de 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm, em um Latossolo Vermelho-Amarelo, em função do tipo de preparo do solo, na presença ou ausência de aplicação de calcário, em coletas na área de tráfego, Borebi, SP, 2017 80

Tabela 16 Carbono da biomassa microbiana (Cmic), quociente microbiano (qMIC), quociente metabólico (qCO_2), respiração basal do solo (RESP) e desidrogenase em função dos tipos de preparo do solo

e aplicação de calcário, em um Latossolo Vermelho-Amarelo e probabilidade de F 81

Tabela 17 Porosidade total (Pt), microporosidade (Micro), macroporosidade (Macro), densidade do solo (Ds), agregados maiores que 2 mm (Ag>2), diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG) e índice de estabilidade de agregados (IEA), nas profundidades de 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm, em um Latossolo Vermelho-Amarelo, em função do tipo de preparo do solo, na presença ou ausência de aplicação de calcário, em coletas no canteiro de cana-de-açúcar, Borebi, SP, 2017 83

Tabela 18 Porosidade total (Pt), microporosidade (Micro), macroporosidade (Macro), densidade do solo (Ds), agregados maiores que 2 mm (Ag>2), diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG) e índice de estabilidade de agregados (IEA), nas profundidades de 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm, em um Latossolo Vermelho-Amarelo, em função do tipo de preparo do solo, na presença ou ausência de aplicação de calcário, em coletas na área de tráfego, Borebi, SP, 2017 85

Tabela 19 Resistência do solo à penetração nas distâncias 0 (D0), 15 (D15), 30 (D30), 45 (D45), 60 (D60), 75 (D75), 90 (D90), 105 (D105) e 120 (D120) cm do centro da linha da cultura, em um Latossolo Vermelho-Amarelo, em função do tipo de preparo do solo, na presença ou ausência de aplicação de calcário, Borebi, SP, 2017.. 88

Tabela 20 Produtividade de colmos da primeira colheita (TCH/16) e da segunda colheita (TCH/17) em função dos tipos de preparo do solo e aplicação de calcário, em um Latossolo Vermelho-Amarelo e probabilidade de F 89

SUMÁRIO

1	**INTRODUÇÃO**	21
2	**REVISÃO DE LITERATURA**	23
2.1	A cultura da cana-de-açúcar	23
2.2	Preparo do solo em área de cultivo de cana-de-açúcar	25
2.2.1	Preparo Convencional do solo	26
2.2.2	Preparo Profundo do solo	28
2.3	Calagem em cana-de-açúcar	30
3	**MATERIAL E MÉTODOS**	34
3.1	Localização e caracterização das áreas experimentais	34
3.2	Tratamentos e delineamento experimental	36
3.3	Coleta e análise dos atributos químicos	36
3.4	Coleta das amostras dos atributos físicos	38
3.5	Implantação dos experimentos	40
3.6	Implantação dos tratamentos	42
3.7	Condução dos experimentos após a primeira e segunda colheitas (Tratos culturais das Soqueiras)	46
3.8	Avaliações	46
3.8.1	Fracionamento físico da matéria orgânica	46
3.8.2	Análises microbianas	48
3.8.2.1	Análise de C na Biomassa Microbiana (Cmic)	47
3.8.2.2	Atividade da enzima desidrogenase	50
3.8.2.3	Análise da respiração microbiana do solo	50
3.8.2.4	Quociente metabólico (qCO_2)	50
3.8.2.5	Quociente microbiano (qMic)	51
3.9	Atributos físicos do solo	51
3.9.1	Coleta e preparo das amostras não deformadas	51
3.9.2	Estabilidade de agregados	54
3.9.3	Resistência do solo à penetração	56
3.10	Produtividade de colmos	58
3.11	Análises estatísticas	58
4	**RESULTADOS E DISCUSSÃO**	58
4.1	**Experimento 1 – Nitossolo Vermelho – Textura argilosa**	58

4.1.1 Fracionamento físico da MOS 58
4.1.1.1 Canteiros 58
4.1.1.2 Área de tráfego 62
4.1.2 Biomassa microbiana 63
4.1.3 Atributos físicos do solo 66
4.1.3.1 Densidade do solo, macro e microporosidade e porosidade total do solo – Canteiro 66
4.1.3.2 Densidade do solo, macro e microporosidade e porosidade total do solo – Área de tráfego 70
4.1.3.3 Resistência do solo à penetração 72
4.1.4 Produtividade de colmos 74
4.2 Experimento 2 – Latossolo Vermelho-Amarelo – Textura Franco-Arenosa 76
4.2.1 Fracionamento físico da MOS 76
4.2.1.1 Canteiro 76
4.2.1.2 Área de tráfego 79
4.2.2 Biomassa microbiana 80
4.2.3 Atributos físicos do solo 82
4.2.3.1 Densidade do solo, macro e microporosidade e porosidade total do solo – Canteiro 82
4.2.3.2 Densidade do solo, macro e microporosidade e porosidade total do solo – Área de tráfego 84
4.2.3.3 Resistência do solo à penetração 86
4.2.4 Produtividade de colmos 89
5 CONCLUSÃO 90
REFERÊNCIAS 91

1 INTRODUÇÃO

Estima-se que no Brasil aproximadamente 8,59 milhões de hectares são destinados à atividade sucroalcooleira, estando um pouco mais de 50% situados no estado de São Paulo (CONAB, 2019). Com a substituição da colheita manual pela colheita mecanizada e a não adequação do tráfego das máquinas, tem se observado que algumas técnicas de cultivo empregadas no setor podem provocar danos aos atributos do solo, aumentando significativamente a compactação. Essa degradação tem acarretado danos nos atributos físicos, químicos e biológicos do solo, com reflexos na produtividade da cultura.

O sistema de preparo do solo mais utilizado nas áreas de cana-de-açúcar é o preparo convencional. O revolvimento intenso da camada superficial, através de uma sucessão de atividades, resultam na degradação de toda a superfície pela inversão de camadas de solo, podendo ocorrer efeito deletério na qualidade estrutural do solo pelo favorecimento da decomposição da matéria orgânica do solo (MOS). Além dessa degradação, um dos grandes problemas desse tipo de sistema de preparo é o surgimento de camadas compactadas abaixo da zona mobilizada, com consequente redução do volume de macroporos e aumento de microporos, podendo resultar em aumento da erosão hídrica nesses solos.

Contudo, com a adoção do controle de tráfego, onde as zonas de tráfego são separadas das zonas em que há o crescimento das plantas, ocorre redução da compactação próxima às linhas de cultivo. Além disso, o advento de sistemas de direcionamento via satélite permite o planejamento e a realização do preparo e sulcação apenas em locais pré-definidos, onde não poderá haver tráfego de máquinas, e com isso novos sistemas de preparo do solo tem surgido.

O preparo profundo canteirizado surgiu como uma opção na busca de romper camadas compactadas, revolvendo o solo em profundidade apenas nos canteiros de plantio, permitindo pleno desenvolvimento do sistema radicular. Esse sistema de preparo mobiliza o solo de maneira localizada, combinando implementos que realizam, simultaneamente, subsolagem profunda, aplicação e incorporação de corretivos, enleiramento da palha e quebra dos torrões. O tráfego, portanto, ocorre de forma controlada, proporcionando menor acúmulo de pressões de contato geradas pelos rodados das máquinas agrícolas.

Com a introdução desses equipamentos, espera-se haver benefícios de curto prazo tais como o melhor enraizamento, melhor aproveitamento de água e nutriente e consequentemente, aumento da produção de biomassa. No entanto, há dúvidas se esses benefícios perduram no tempo ou se podem causar impactos negativos sobre o solo devido ao estímulo à mineralização da matéria orgânica pelo revolvimento excessivo e profundo e elevação do pH do solo.

Porém, cabe ressaltar que os efeitos do preparo do solo na sua estrutura vão depender da intensidade de revolvimento e do trânsito, dos tipos de equipamentos utilizados, do manejo dos resíduos vegetais e das condições de umidade do solo no momento em que o preparo é realizado. Além disso, o preparo do solo em áreas de cana-de-açúcar não se limita apenas às operações que afetam a sua estrutura física, mas também envolve aquelas ligadas aos fatores que determinam o pH e o ambiente de crescimento radicular. Dessa forma, a calagem é parte das operações de preparo de solo, sendo de grande importância, pois ao promover a neutralização de Al^{+3}, a elevação do pH, fornecer Ca^{+2} e Mg^{+2}, dentre outros benefícios, possibilita o desenvolvimento das raízes, tornando as plantas mais resistentes a períodos de baixa precipitação pluviométrica.

Ao se analisar trabalhos com cana-de-açúcar, observa-se que a grande maioria que avaliam sistemas de preparo do solo consideram apenas os atributos físicos do solo, porém a interação existente entre preparo do solo e as condições de acidez do solo pode ser o fator de sucesso de cada modo de preparo, visto que, embora o sistema de preparo propicie menor resistência à penetração das raízes, estas não se desenvolverão adequadamente em subsuperfície se existirem restrições químicas para o seu crescimento.

Sendo assim, o presente estudo teve como objetivos avaliar, em área de cultivo de cana-de-açúcar, o efeito da calagem e do preparo do solo, constituído por preparo profundo do solo em faixas e do preparo convencional, na produtividade de colmos, nos atributos físicos do solo e na qualidade da matéria orgânica.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A cultura da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp*.) é uma planta monocotiledônea, alógama e perene, pertencente à família Poaceae e do gênero Saccharum. Seus atuais cultivares são híbridos interespecíficos, os quais possuem, em suas constituições genéticas, as espécies *S. officinarum, S. spontaneum, S. sinense, S. barberi, S. robustum* e *S. edule* (GUPTA et al., 2010).

Apesar de ser uma planta de reprodução sexuada, quando cultivada comercialmente é multiplicada assexuadamente, por propagação vegetativa (CAIEIRO et al., 2010). É cultivada em regiões tropicais e subtropicais de mais de 90 países, difundida em uma ampla faixa de latitude, adaptando-se a diversas condições de clima e solo (DOOREMBOS; KASSAM, 1979; TAVARES, 2009).

O ciclo de desenvolvimento da cana-de-açúcar possui, em média, a duração de cinco anos e é caracterizado por quatro estádios principais, que são: emergência (cana-planta) ou brotação (cana-soca), perfilhamento, elongação do colmo e maturação (GASCHO e SHIH, 1983). Segundo Machado et al. (1891), o crescimento pode ser dividido em três etapas: na primeira fase, o crescimento da planta é lento, durando normalmente 200 dias após o plantio; a segunda fase é caracterizada pelo rápido crescimento, durando de 200 a 400 dias após o plantio e pelo acúmulo de 75% do total de sua massa e na fase final, o crescimento se torna novamente lento e o acúmulo de sua massa total chega a 11%. Esta fase geralmente dura de 400 a 500 dias após o plantio.

É uma cultura de grande importância econômica no mundo, cultivada principalmente como matéria prima para produção de açúcar e álcool, sendo o Brasil o maior produtor mundial de açúcar, destacando-se o estado de São Paulo como maior produtor nacional (CONAB, 2019).

A cana-de-açúcar também apresenta relevante papel social e ambiental para o país, caracterizando-se como a segunda cultura mais importante para o agronegócio brasileiro (VITTI e MAZZA, 2002). Segundo levantamentos da CONAB (2019), a agroindústria sucroalcooleira nacional, opera numa conjuntura positiva e sustentável, conciliando preocupações relacionadas ao meio ambiente e aos efeitos indesejáveis da utilização dos combustíveis fósseis. Além da produção de etanol e açúcar, as

unidades de produção têm buscado aumentar sua eficiência na geração de energia elétrica, auxiliando no aumento da oferta e redução dos custos e contribuindo para ampliar a sustentabilidade do setor. Na condição de maior produtor mundial, o Brasil, projeta-se para o segmento crescente relevância para o agronegócio brasileiro. O aumento de demanda mundial por etanol, aliado às grandes áreas cultiváveis e condições edafoclimáticas favoráveis à cana-de-açúcar, tornam o Brasil um participante na comercialização mundial com elevada competitividade.

A área cultivada com cana-de-açúcar colhida e destinada à atividade sucroalcooleira na safra 2018/19 foi de aproximadamente 8,59 milhões de hectares, representando uma redução de 1,6% em relação ao ocorrido na safra anterior. Sendo a segunda queda consecutiva na área colhida. Nas regiões Centro-Oeste, Sudeste e Sul, a redução foi de 1,7% e nas regiões Norte e Nordeste, a estimativa é de uma área colhida 0,9% menor que na safra passada (CONAB, 2019).

A produção de cana-de-açúcar, na safra 2018/19, foi de 620,44 milhões de toneladas, apresentando uma redução de 2% em relação à safra anterior e conferindo aos canaviais brasileiros uma produtividade média de colmos de cerca de 72,2 Mg ha^{-1}, valor 0,4% menor do que os obtidos na safra 2017/18. O envelhecimento das lavouras, a baixa taxa de renovação, a falta de investimentos em algumas regiões e a redução do pacote tecnológico têm mantido as médias brasileiras inferiores a 80 Mg ha^{-1} (CONAB, 2019).

Outro fator que também exerceu influência na redução da produtividade nas últimas safras foi a introdução da colheita mecanizada. Principalmente pelo fato das lavouras não estarem sistematizadas para esse tipo de colheita, gerando pisoteio e outros danos (CONAB, 2019).

Observa-se assim que a produtividade se encontra muito abaixo do potencial produtivo desta cultura, que, segundo Albuquerque e Silva (2008), pode chegar a 200 Mg ha^{-1}. Portanto, novas práticas devem ser adotadas a fim de aumentar essa produtividade e a rentabilidade da atividade econômica de exploração dessa cultura.

O planejamento das atividades envolvidas diretamente com a cultura da cana-de-açúcar, desde o plantio até a colheita, é uma etapa muito importante na sua exploração econômica, definindo uma série de técnicas a serem adotadas, como, insumos, máquinas, implementos, adubações e escolha de variedades (SILVA JUNIOR e CARVALHO, 2010). Neste planejamento o preparo de solo para

implantação do canavial representa uma etapa crucial para a longevidade da cultura, considerando que este só será revolvido novamente, após o quarto ou quinto corte.

2.2 Preparo do solo em área de cultivo de cana-de-açúcar

De maneira geral, a cultura da cana-de-açúcar tem apresentado baixas produtividades em virtude da contínua utilização de métodos convencionais de manejo do solo (MORGADO e VIEIRA, 1999) e, nos dias atuais, a colheita mecanizada tem influído drasticamente nesse aspecto.

A cana-de-açúcar é uma cultura semi-perene que sofre renovação a cada ciclo de cultivo, correspondendo geralmente de 4 a 5 anos, dependendo das condições edafoclimáticas e tecnológicas de cada ambiente de produção. Portanto, como nesse período de cultivo o solo não é mobilizado, os efeitos prejudiciais das intervenções mecânicas se acumulam ao longo dos anos (TIM CHAMEN et al., 2015; CHERUBIN et al., 2016). Como consequência negativa sobre o solo está o declínio de sua estrutura, com alterações dos atributos físicos do solo, como porosidade total e macroporosidade (LANA et al., 2017), microporosidade e densidade do solo (VISCHI FILHO et al., 2017), e resistência do solo à penetração das raízes (LIMA et al., 2017).

Baquero et al. (2012) verificaram que a macroporosidade média de três cortes (1º, 3° e 5°) de uma área cultivada com cana-de-açúcar apresentou o valor de 0,05 m^3 m^{-3}, valor mínimo inferior ao necessário para o desenvolvimento da maioria das plantas (> 0,10 m^3 m^{-3}) indicando que o solo sofreu adensamento de poros devido ao tráfego constante de máquinas na área. Constataram também que a densidade de raízes foi 77% superior nos primeiros 0,10 m do que na camada de 0,10-0,40 m do solo na área cultivada.

No cultivo da cana-de-açúcar, o manejo inicial do solo assume papel fundamental quanto ao desenvolvimento da planta, criando condições ideais para o desenvolvimento das raízes, reduzindo a densidade e a resistência do solo à penetração (ROSA et al., 2011) e melhorando as condições físicas do solo, uma vez que promove aumento do espaço poroso (CORTEZ et al., 2011). Porém, um preparo de solo inadequado, executado fora das recomendações agronômicas estabelecidas, pode comprometer o processo de sulcação e as operações agrícolas subsequentes, prejudicando o desenvolvimento da cultura e elevando os custos de produção (FREITAS, 1987; BARROS e MILAN, 2010), além de possibilitar a redução da vida útil

do canavial, encurtando o tempo para a reforma e consequentemente refletindo em grande prejuízo econômico. Estudos como de Bangita e Rao (2012) e Souza et al. (2014) têm evidenciado esses efeitos indesejados, demonstrando que solos com qualidade física degradada resultaram em redução da capacidade de absorção de água e nutrientes pela cana, implicando na diminuição da produtividade.

O preparo do solo não se limita somente às operações que afetam diretamente a sua estrutura física, mas também envolve aquelas ligadas aos fatores que determinam o pH e o ambiente. Estes fatores são adequados para absorção eficiente de nutrientes (FREITAS, 1987) e para facilitar a infiltração da água, contribuindo para o controle da erosão (ORLANDO FILHO e ZAMBELLO, 1983), que é a maior causa da degradação das terras agrícolas e provoca, ainda, a poluição dos recursos hídricos.

Souza et al. (2004) também destacaram que o manejo inadequado pulveriza a superfície dos solos, deixando-os mais susceptíveis ao processo de erosão e propiciam a formação de impedimentos físicos logo abaixo das camadas movimentadas pelos equipamentos. A compactação, a desestruturação do solo e a redução nos teores de matéria orgânica são consideradas os principais indutores da degradação dos solos agrícolas. Tal degradação, com todas as suas implicações e consequências negativas, tem resultado no desafio de viabilizar sistemas de produção que possibilitem maior eficiência energética e conservação ambiental (KLUTHCOUSKI et al., 2000).

A diversificação dos sistemas de manejo é complexa, visto que as operações variam no tempo e no espaço e de região para região. Em virtude de tal complexidade surge a necessidade de se quantificar e qualificar as condições estruturais do solo. Desta forma, é possível a obtenção de informações sobre a eficácia do manejo do solo e sua influência na produtividade da cultura, buscando a minimização dos efeitos da degradação da sua estrutura, os quais podem comprometer o desenvolvimento do sistema radicular das plantas (TAVARES FILHO et al., 1999; MARASCA, 2014).

2.2.1 Preparo Convencional do solo

O sistema convencional de produção procura o desenvolvimento econômico da cultura utilizando todos os tipos de recursos disponíveis, sem restrições quanto ao uso de fertilizantes, de defensivos, e de outros agroquímicos (STORINO et al., 2008). No

entanto, é o preparo mais utilizado no setor produtivo de cana-de-açúcar, o qual envolve a utilização de operações sucessivas com grades pesadas, arados, subsoladores e grades niveladoras para a sistematização do terreno e a distribuição de corretivos. Tais operações são realizadas de modo variável de acordo com a região e decisões dos agricultores, visando a incorporação de matéria orgânica, sementes, corretivos e fertilizantes no solo; o rompimento de camadas adensadas, restabelecendo a porosidade superficial original do solo, possibilitando melhor drenagem e a penetração das raízes das plantas; destorroamento da camada superficial do solo, permitindo maior contato solo-semente e a emergência da cultura; nivelamento da superfície do terreno para facilitar operações de plantio e posterior colheita da cultura; eliminação de plantas daninhas, doenças e pragas (MARTINS FILHO et al., 2015).

Sendo assim, segundo Santiago e Rossetto (2007), o preparo convencional ao promover a descompactação de camadas adensadas, incorporar corretivos e fertilizantes e aumentar os espaços porosos, eleva a permeabilidade e o armazenamento de água e ar. O que favorece o aumento da possibilidade de translocação de argila no perfil, a oxidação da matéria orgânica, a compactação das camadas imediatamente inferiores às que foram mobilizadas e erosões (ANDRADE et al., 2009).

Diversas pesquisas (CEDDIA et al., 1999; SILVA et al., 2005; SOUZA et al., 2008; SEVERIANO et al., 2009) detectaram altos níveis de degradação dos solos cultivados com cana-de-açúcar no que diz respeito ao rearranjamento da estrutura do solo. Em decorrência das técnicas de cultivo empregadas pelos agricultores e empresas do ramo sucroalcooleiro, há o surgimento de camadas compactadas os quais alteram a distribuição dos poros do solo, podendo refletir na densidade do mesmo, alterando os fluxos de água e ar do solo (SILVA e RIBEIRO, 1997).

Trabalhos científicos relatam a perda da estrutura original dos solos pelo fracionamento dos agregados maiores em unidades menores, havendo, como consequência, diminuição de macroporos e aumento de microporos e da densidade de solos submetidos a cultivos intensos (CARPENEDO e MIELNICZUK, 1990). Silva e Fernandes (2014) e Gonçalves et al. (2014), estudando o efeito de vários anos de cultivo convencional com cana-de-açúcar, verificaram que, nos solos com maior tempo de cultivo, a porosidade e, em maior evidência, a macroporosidade diminuíram.

Neste sentido, busca-se melhorar os métodos de manejo para que se obtenham aumentos de produtividade e minimização da degradação do solo (MARASCA, 2014).

2.2.2 Preparo Profundo do Solo

Atualmente, tem se observado uma substituição gradual do preparo com a utilização da escarificação em área total, conhecido como preparo reduzido, por um preparo apenas na linha da cultura (canteiro), visando diminuição de perdas de solo, dos custos de operação e do uso de combustíveis (ROSSETTO e SANTIAGO, 2017).

O preparo do solo apenas no “canteiro” (em faixas), que consiste em preparar, corrigir e adubar o terreno 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, surge como um novo sistema de preparo de solo (ROSSETTO, 2011). Esse sistema pode apresentar diversas variações diferindo quanto ao tipo de máquina utilizada, operações executadas e profundidades. A restrição do local de passagem dos pneus das máquinas configura-se indiretamente como controle de tráfego já que este tem como princípio concentrar a passagem dos pneus em linhas fixas dividindo regiões de tráfego das de crescimento das plantas, reduzindo a área com tráfego agrícola e evitando a compactação nas linhas de plantio ocasionada pela pressão exercida pelos pneus do maquinário agrícola (KINGWELL e FUCHSBICHLER, 2011).

Esta tecnologia vem sendo utilizada em extensas áreas de cultivo de cana-de-açúcar, e tem permitido a redução do custo operacional com o preparo do solo em 30%, uma vez que, comparativamente ao sistema convencional a passagem do equipamento se dá em uma única vez, podendo proporcionar incrementos acima de 20% na produtividade, além da melhoria na conservação de solo e melhor controle de plantas daninhas (MAFES AGROMECÂNICA, 2014). Com esta técnica, a cana-de-açúcar pode também ser plantada em linha dupla, com espaçamento de até 1,8 m (ROSSETTO et al., 2008).

Em uma avaliação do efeito da posição do tráfego na colheita de cana-de-açúcar, Braunack et al. (2006) verificaram redução da compactação e aumento da produtividade da cultura em áreas com controle de tráfego. Avaliando a densidade relativa do solo em áreas onde foi utilizado o preparo profundo canteirizado e outra

com preparo convencional, Marasca (2014) observou que para ambos os tratamentos de preparo do solo, a densidade relativa apresentou valores aceitáveis para a camada de 0 a 0,15 m. Porém, na área com preparo convencional, as camadas 0,15-0,30 m e 0,30-0,45 m apresentaram valores prejudiciais ao desenvolvimento da cultura.

Por ser um manejo inovador, há questionamentos se o sistema de preparo profundo do solo em faixas 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, 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 (BAYER, 2000; LICHT; AL-KAISI, 2005).

Souza (2016) estudando o preparo com escarificação em área total e o preparo com escarificação na linha de plantio em Latossolo Vermelho e em um Argissolo Amarelo cultivados com cana-de-açúcar, verificou que a escarificação na linha de plantio proporcionou uma melhora da estrutura do solo, bem como criou condições físicas adequadas para o cultivo da cana em ambos os solos. Além disso, Souza et al. (2017), nas mesmas condições deste trabalho, observaram que o preparo com escarificação na linha de plantio contribuiu para a redução da emissão de CO_2 para a atmosfera, se comparado a escarificação realizada em área total.

A redução de zonas compactadas, principalmente, pelo sistema de preparo profundo do solo em faixas, poderá favorecer o aprofundamento radicular e, portanto, em períodos com menor precipitação pluvial, ou mesmo em condições de veranicos, a planta poderá manter a absorção de água, a condutância estomática, a taxa de assimilação de CO_2 e, consequentemente, a taxa fotossintética (TAIZ e ZEIGER, 2004), por maiores períodos em relação ao sistema de preparo convencional. Nestas condições a produção de fitomassa aérea e radicular tenderá a ser maior, em relação ao sistema de preparo convencional, aumentando os teores MOS e a atividade microbiana, fatores que auxiliam a agregação do solo (GRIÈVE et al., 2005).

Tomaz (2013) verificou que no preparo profundo do solo em área com cultivo de cana-de-açúcar em espaçamento duplo alternado, o comprimento, a área e o volume das raízes foram superiores aos do sistema de preparo convencional. O autor também verificou que a resistência do solo à penetração no preparo profundo foi de 0,29 MPa e 0,45 MPa, nas profundidades de 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, respectivamente.

Ao comparar os reflexos do preparo profundo canteirizado do solo e do preparo convencional na distribuição do sistema radicular da cana-de-açúcar e nos atributos físicos e mecânicos do solo, Lima (2016) observou que houve melhoria na qualidade física do solo com o sistema de preparo profundo, verificando uma redução da densidade, aumento da porosidade total e macroporosidade, além, da diminuição da resistência à penetração das raízes. Esses fatores contribuíram para o maior crescimento do sistema radicular da cana-de-açúcar. Já no sistema convencional houve redução da qualidade física do solo devido ao tráfego de máquinas sobre o solo mobilizado durante as operações de preparo, resultando em limitações ao crescimento das raízes abaixo da camada 0-0,2 m, refletindo em uma queda de produtividade da cultura de 23%.

É importante saber quantificar as propriedades do solo auxilia na formação de bases sustentáveis para a produtividade, já que, conhecer essas propriedades é essencial para a tomada de decisões no preparo e manejo adequado do solo (GOES, 2005).

2.3 Calagem em cana-de-açúcar

A acidez do solo limita a produção agrícola em consideráveis áreas no mundo, em decorrência da toxidez causada por Al e Mn e da baixa saturação por bases (CAIRES, 2013). Aproximadamente 70% do território brasileiro é composto de solos ácidos, capazes de reduzir o potencial produtivo das culturas em cerca de 40%, principalmente devido às suas elevadas concentrações de Al^{3+} solúvel. Estes solos também são caracterizados por baixa saturação por bases, baixo teor de P, e uma predominância de argila 1:1 (QUAGGIO, 2000).

A baixa saturação de bases em profundidade prejudica o desenvolvimento do sistema radicular (MORELLI et al., 1987). Segundo Demattê (2005), a baixa fertilidade em profundidade se reflete em um menor volume explorado pelo sistema radicular e em consequência em menor produtividade. O baixo teor de cálcio e a presença de alumínio são os principais impedimentos químicos para o crescimento radicular, principalmente no subsolo (RITCHEY et al., 1980; PAVAN et al., 1982; QUAGGIO, 2000).

Uma das práticas mais comumente utilizadas para a correção de acidez do solo é a calagem, sendo o calcário o sal de reação alcalina mais empregado e quando aplicado de forma correta, reduz a acidez, incrementa os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} e neutraliza a toxidez por Al^{3+} e Mn^{2+}. Favorecendo assim o desenvolvimento do sistema radicular e o melhor aproveitamento dos nutrientes, o que tem refletido em maior produtividade e rentabilidade econômica (NICOLODI; ANGHINONI; GIANELLO, 2008; CASTRO; CRUSCIOL, 2013). Porém, a velocidade de solubilização dos corretivos nos solos, com a consequente disponibilização de cálcio e magnésio para as plantas, bem como a neutralização dos constituintes ácidos, depende além de sua granulometria, do modo de aplicação, da localização do corretivo no solo (GONZALEZ ERICO et al., 1979; RITCHEY et al., 1983), da dose aplicada, do teor de matéria orgânica e do nível de acidez do solo (poder tampão do solo).

Como os materiais corretivos da acidez utilizados são pouco solúveis, os produtos da reação do calcário com o solo têm mobilidade limitada, e a ação da calagem normalmente fica restrita às camadas superficiais do solo (CAIRES et al., 2011). Sendo assim, a incorporação de calcário em profundidade tem por finalidade proporcionar uma melhor condição química nas camadas mais profundas, contribuindo para um sistema radicular mais desenvolvido e consequentemente aumento da produtividade, principalmente em áreas onde há ocorrência de deficiência hídrica. Marschner (2002) ressalta que mesmo quando uma quantidade adequada de calcário é misturada, mas apenas no solo superficial, as raízes são severamente restringidas em sua capacidade de penetrar em subsolos ácidos.

Com as plantas de cana-de-açúcar não será diferente, principalmente sem irrigação, limitando a tolerância da cultura aos períodos de déficit hídrico, condição esta que pode reduzir a taxa de assimilação de CO_2 e, consequentemente, a taxa fotossintética (TAIZ e ZEIGER, 2004), com reflexo negativo na produtividade de colmos e açúcar. Experimentos realizados por Ritchey et al. (1983) no Brasil Central demonstraram que o sistema radicular da cultura tende a se aprofundar no solo se houver disponibilidade de bases, principalmente cálcio.

Além dos efeitos na fertilidade do solo, a calagem pode influenciar o teor de carbono orgânico do solo (COS). O efeito da calagem no estoque de COS pode ser resultado de vários fatores: primeiro, a calagem aumenta a atividade biológica do solo, favorecendo, assim, a mineralização da MOS, o que resulta em perdas de CO_2 e uma diminuição dos estoques de COS. Em segundo lugar, a calagem melhora a estrutura

do solo, aumentando a estabilidade das associações de argila e da ligação da argila com a matéria orgânica, que deve aumentar a proteção física e físico-química do COS. Finalmente, como a calagem melhora as condições do solo para o crescimento das plantas, aumenta a produtividade das plantas e também o retorno de entradas de C para o solo, aumentando assim potencialmente o COS. Porém, a influência da calagem no estoque de COS ainda é pouco compreendida (PARADELO et al., 2015). Sendo assim, a correção da acidez pode ter efeito indireto sobre as propriedades do solo, à medida que favorecem a produção de fitomassa aérea e radicular das culturas, aumentam os teores MOS e a atividade microbiana, fatores estes que auxiliam na agregação do solo (GRIÈVE et al., 2005; CORRÊA et al., 2009).

Embora muitos estudos tenham sido realizados sobre a correção de acidez na cana-de-açúcar, não há consenso sobre esse assunto (QUAGGIO e RAIJ, 2008). Segundo Rossetto et al. (2004) os acréscimos na produtividade em resposta à calagem são esporádicos e quando ocorreram nos experimentos relatados na literatura, foram obtidos em condições de severa acidez, na presença de alumínio em níveis tóxicos e, principalmente, na ausência de teores adequados de cálcio e magnésio.

Marinho et al. (1980); Santos et al. (1980) e Orlando Filho et al. (1990) relataram efeitos benéficos da calagem na produtividade da cana. Em experimentos testando doses de escória de siderurgia e calcário, Prado e Fernandes (2001); Prado et al. (2003) e Brassioli et al.(2009), também observaram aumento da produtividade da cana com o aumento das doses de corretivos. Já Azevedo et al. (1996) estudando a aplicação de calcário e gesso e mistura de ambos em 13 experimentos com cana-de-açúcar não observaram qualquer resposta da utilização desses insumos na produtividade da cultura, assim como Hermann (2005) e Leite et al. (2008) que também não observaram efeitos positivos das doses de corretivos sobre o rendimento da cana-de-açúcar.

Essa variação de respostas da cana à calagem permite levantar a hipótese de ocorrer variabilidade de tolerância das diferentes cultivares à acidez, pois, em alguns experimentos, foram obtidas respostas acentuadas ao calcário em condições menos severas de acidez do solo do que experimentos conduzidos em condições extremas de acidez (QUAGGIO e RAIJ, 2008).

Sendo assim, o que se verifica com os resultados dos diversos experimentos publicados é que a cana é uma planta tolerante às condições de acidez dos solos e

com respostas modestas à calagem, quando comparada com outras gramíneas, especialmente se o subsolo não estiver muito ácido (WUTKE e ALVAREZ, 1968; MARINHO et al., 1980; MORELLI et al., 1992; PENATTI e FORTI, 1993; ROSSETTO et al., 2004).

Apesar dessa característica, a correção da acidez torna-se indispensável para garantir produtividade e longevidade das soqueiras, pois o efeito acidificante dos fertilizantes, empregados em doses elevadas na cultura, deve ser monitorado, e a acidez corrigida pela calagem, quando a saturação por bases na camada de 0-20 cm nas soqueiras for inferior a 40%. Resultados práticos tem demonstrado que a calagem em soqueiras aumenta a produtividade e expande a vida útil do canavial em, pelo menos mais um corte, o que já é suficiente para viabilizar economicamente essa prática. Outra vantagem observada é que a calagem na soqueira contribui para manter o subsolo em melhores condições para o desenvolvimento da cana-planta na reforma do talhão (QUAGGIO e RAIJ, 2008).

Porém, cabe ressaltar que as recomendações de calcário para cana-de-açúcar 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 da cana-de-açúcar, praticamente não existem pesquisas com corretivos de acidez. Além disso, Raij (2008) analisou diversos resultados de experimentos com calcário em cana-de-açúcar e concluiu que as recomendações oficiais para a calagem, dadas por Spironello et al. (1996), consideradas como as “recomendações oficiais para o Estado de São Paulo”, estão subestimadas para o sistema atual de cultivo dessa planta energética.

Além dessas questões, com a introdução de sistemas de preparo profundo em faixas, surgiram alguns questionamentos referentes à possibilidade de aplicação do calcário apenas na faixa de preparo do solo, bem como, a profundidade e a quantidade de calcário a ser aplicada nesse novo sistema. Portanto, existe a necessidade de estudos com calcário nos diferentes e novos sistemas de preparo do solo em cana-de-açúcar.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização das áreas experimentais

Foram instalados dois experimentos, em áreas pertencentes ao Grupo Zilor, ambos com espaçamento alternado (1,5 x 0,9 m) e controle de tráfego (Figura 1). O primeiro experimento (Experimento 1), realizado em parceria com a Agrícola Três Lagoas, foi instalado em abril de 2015 em Nitossolo Vermelho com textura argilosa, com ambiente de produção classificado como A, no município de Macatuba, SP (22º 29’ 20’’ de latitude Sul e 48º 47’ 06’’ de longitude Oeste de Greenwich).

O segundo experimento (Experimento 2), realizado em parceria com a Agrícola Tecnocana, foi instalado em agosto de 2015 em Latossolo Vermelho-Amarelo com textura franco-arenosa, com ambiente de produção classificado como E, no município de Borebi, SP (22º 33’ 15’’ de latitude Sul e 48º 53’ 23’’ de longitude Oeste de Greenwich).

Figura 1 - Espaçamento alternado (1,5 m x 0,9 m) em áreas de cana-de-açúcar.

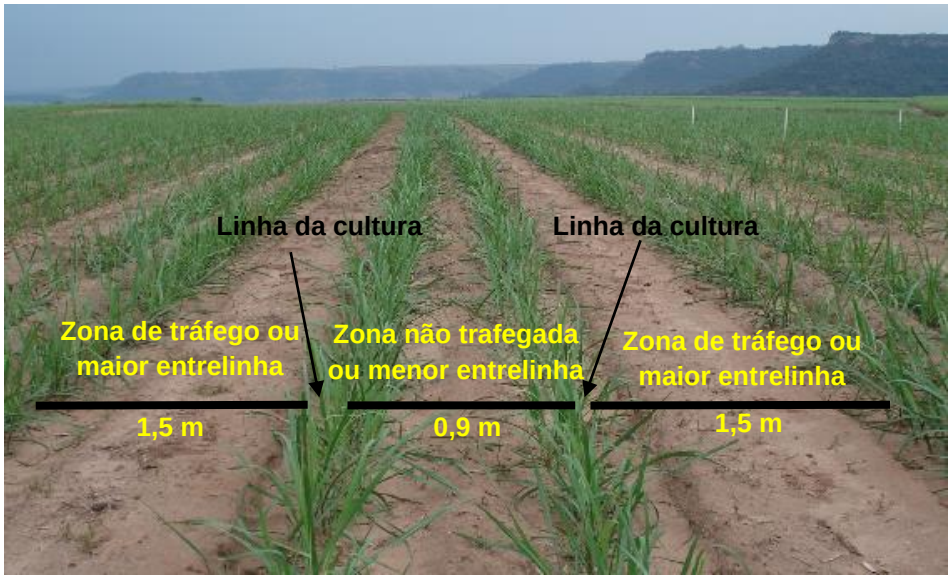


Foto do Experimento 2 – Borebi - SP

De acordo com a classificação de Köeppen, o clima predominante em ambas as áreas experimentais é do tipo Cwa, que se caracteriza pelo clima tropical de altitude, com inverno seco e verão quente e chuvoso (LOMBARDI NETO; DRUGOWICH, 1994). A estação chuvosa compreende os meses de setembro a março, sendo o mês

de janeiro o mais chuvoso (CUNHA et al., 1999). Os dados mensais referentes à precipitação pluvial no período de realização dos experimentos estão apresentados nas Figuras 2 e 3 referentes aos experimentos 1 e 2, respectivamente.

Figura 2 - Precipitação pluvial (mm) em Macatuba – SP, correspondente ao período de janeiro de 2015 a dezembro de 2017

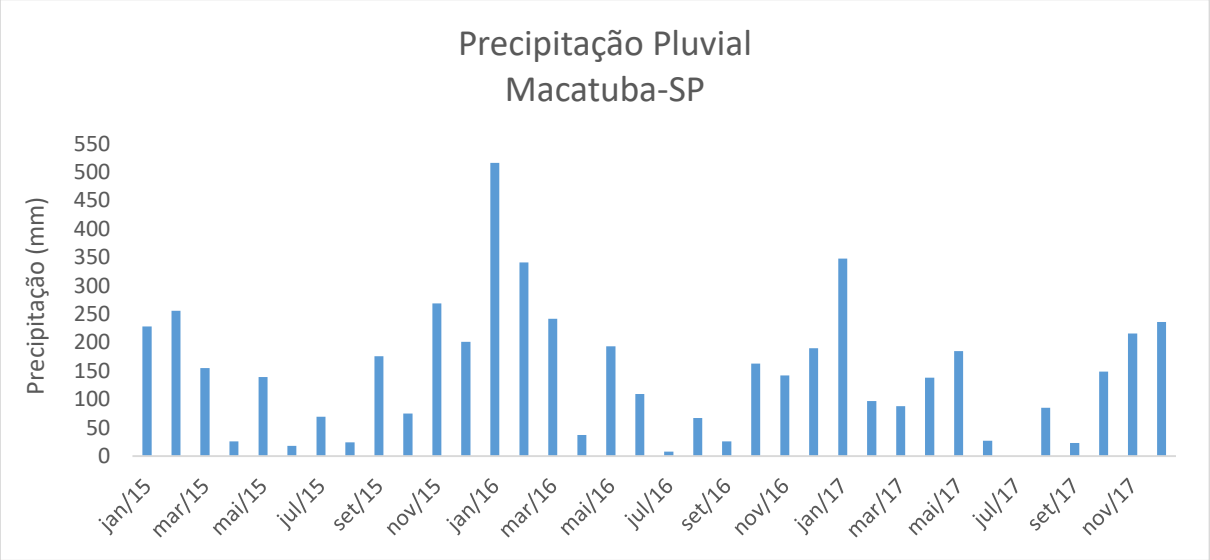
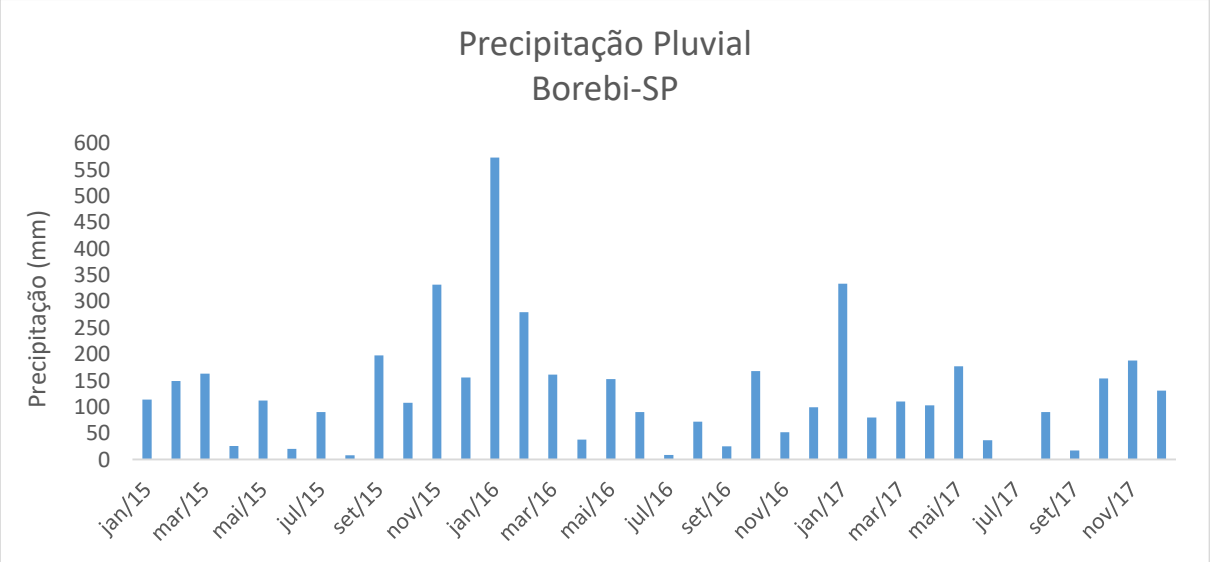


Figura 3 - Precipitação pluvial (mm) em Borebi – SP, correspondente ao período de janeiro de 2015 a dezembro de 2017



3.2 Tratamentos e delineamento experimental

O delineamento experimental utilizado em ambos os experimentos foi em blocos casualizados, com quatro repetições. Os tratamentos foram constituídos por: Preparo Convencional (PC) sem aplicação de calcário, PC com aplicação de calcário, Preparo Profundo (PP) sem aplicação de calcário, e PP com aplicação de calcário.

Os sistemas de preparo foram caracterizados pelas seguintes operações: PC - preparo com grade aradora, subsolagem e grade aradora novamente em área total e o PP - preparo com enxada rotativa e haste subsoladora (equipamento Penta) somente na faixa de cultivo da cultura.

A aplicação de calcário no PC foi realizada em área total antes da primeira operação de revolvimento do solo. Já no PP, a aplicação de calcário foi realizada na metade da área cultivada, ou seja, apenas na faixa de preparo (área de cultivo da cultura). Sendo ¾ da dose aplicada na superfície do solo e incorporado com enxada rotativa e haste subsoladora e ¼ da dose aplicada nos filetes situados atrás da haste subsoladora com saídas á 0,4 m e 0,8 m de profundidade. A definição da menor dose em profundidade foi devido ao menor volume corrigido, visto que foi aplicado em filetes.

As unidades experimentais tinham 240 m^2, ou seja, 10 linhas de 20 m de comprimento com espaçamento alternado de 1,50 x 0,90 m entre linhas.

As áreas para a montagem dos experimentos foram selecionadas baseadas nos resultados da análise de amostras de solo retiradas previamente a instalação dos experimentos, desde que apresentassem necessidade de calcário.

3.3 Coleta e análise dos atributos químicos

Em março e maio de 2015 foram coletadas amostras para a caracterização química das áreas dos experimentos 1 e 2, respectivamente. Para a caracterização inicial, foram retiradas, com trado tipo holandês, 8 amostras representativas em cada área experimental, nas camadas de 0-0,2, 0,2-0,4, 0,4-0,6, 0,6-0,8 e 0,8-1 m, a fim de representar os atributos químicos do solo.

As análises químicas de solo, para fins de fertilidade, foram efetuadas seguindo os procedimentos descritos por Raij et al. (2001). A determinação de pH foi realizada em $CaCl_2$ 0,01mol L^{-1}; a análise de MOS foi feita por oxidação úmida e determinada

pela leitura colorimétrica; P, K, Ca e Mg foram extraídos por resina trocadora de íons, sendo o P determinado por espectrofotometria, a leitura de K por fotometria de chama, e a determinação de Ca e Mg realizada por espectrofotometria de absorção atômica; H+Al: realizada por leitura do pH SMP; B foi extraído em água quente e determinado por colorimetria pelo método da azometina-H; Cu, Fe, Mn e Zn foram extraídos pelo método do DTPA em pH 7,3 e determinação por espectrometria de absorção atômica. A soma de bases (SB) foi calculada pela soma de Ca + Mg + K, a CTC pela soma de SB + H + Al e a saturação por bases (V%) foi calculada pela equação (SB/CTC) x 100. O enxofre foi extraído com fosfato monocálcico, sendo a quantificação feita por turbidimetria, provocada por $BaSO_4$ formado pela reação do $BaCl_2.2H_2O$ com o SO_4^2, extraído das amostras de terra (VITTI, 1988).

Os resultados da caracterização inicial dos atributos químicos do solo antes da implantação dos tratamentos para o Nitossolo Vermelho (Experimento 1) e Latossolo Vermelho-Amarelo (Experimento 2) estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1 - Atributos químicos do solo antes da implantação dos experimentos em um Nitossolo Vermelho (NV), Macatuba, SP, 2015 e em um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), Borebi, SP, 2015

Solo	Camada (m)	pH ($CaCl_2$)	M.O.	P_{resina}	S	Al^{3+}	H + Al	K	Ca	Mg
			(g dm^{-3})	(mg dm^{-3})		----------(mmol$_c$ dm^{-3})----------				
NV	0,0-0,2	4,4	23	12	21	5	52	2,0	19	9
NV	0,2-0,4	4,0	15	7	47	10	59	0,8	10	5
NV	0,4-0,6	4,0	12	4	36	13	59	0,3	6	3
NV	0,6-0,8	3,9	10	3	50	11	66	0,2	7	3
NV	0,8-1,0	4,0	10	4	45	13	59	0,7	6	2
LVA	0,0-0,2	4,5	11	7	7	2	22	0,8	13	2
LVA	0,2-0,4	4,3	7	3	15	3	18	0,5	9	2
LVA	0,4-0,6	4,0	6	2	51	6	19	0,4	5	1
LVA	0,6-0,8	4,1	5	2	73	5	19	0,9	4	2
LVA	0,8-1,0	4,2	5	4	72	4	18	0,6	5	2

Solo	Camada, (m)	SB	CTC	V%	m%	Ferro	Cobre	Manganês	Zinco	Boro
		---(mmolc dm^{-3})---				----------(mg dm^{-3})----------				
NV	0,0-0,2	31	82	37	14	23	3,0	9,7	1,1	0,20
NV	0,2-0,4	16	75	21	38	15	3,3	4,3	0,5	0,18
NV	0,4-0,6	10	69	14	57	8	2,2	3,0	0,1	0,12
NV	0,6-0,8	10	76	13	52	7	1,8	1,2	0,1	0,06
NV	0,8-1,0	9	68	13	59	7	1,8	2,0	0,1	0,08
LVA	0,0-0,2	16	38	42	10	41	1,3	1,6	2,2	0,13
LVA	0,2-0,4	11	29	38	20	28	1,3	0,6	0,8	0,14
LVA	0,4-0,6	6	25	24	50	16	1,0	0,2	0,3	0,10
LVA	0,6-0,8	7	26	27	41	11	0,8	0,2	0,2	0,10
LVA	0,8-1,0	8	25	31	33	9	0,6	0,3	0,1	0,10

3.4 Coleta das amostras e análise dos atributos físicos

Antes da instalação dos experimentos, em março e maio de 2015, para as áreas do experimento 1 e 2, respectivamente, foram retiradas 12 amostras representativas (1 amostra composta por 4 subamostras em cada tratamento), nas camadas de 0-0,2, 0,2-0,4, 0,4-0,6, 0,6-0,8 e 0,8-1 m de profundidade, a fim de caracterizar os atributos físicos em cada área experimental.

Para a avaliação da umidade do solo e da estabilidade de agregados foram abertas quatro trincheiras e coletadas amostras de solo no centro da zona não trafegada, na linha da cultura e no centro da zona de tráfego.

Os resultados da caracterização inicial da estabilidade de agregados antes da instalação dos experimentos para o Nitossolo Vermelho (Experimento 1) e Latossolo Vermelho-Amarelo (Experimento 2) estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Estabilidade dos agregados antes da implantação dos experimentos em um Nitossolo Vermelho (NV), Macatuba, SP, 2015 e em um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), Borebi, SP, 2015

Nitossolo Vermelho (NV)				
		Atributos*		
Zona**	**Profundidade (cm)**	**DMP**	**DMG**	**IEA**
		-------- mm -------		**(%)**
Canteiro	0 a 20	4,17	3,38	97,54
	20 a 40	3,19	1,70	94,99
	40 a 60	2,70	1,86	90,28
	60 a 80	2,07	1,23	55,50
	80 a 100	2,39	1,26	85,85
Tráfego	0 a 20	3,96	3,04	96,45
	20 a 40	3,22	2,06	92,11
	40 a 60	3,04	2,19	88,12
	60 a 80	2,41	1,23	84,21
	80 a 100	2,08	0,82	88,66
Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA)				
Canteiro	0 a 10	0,95	0,53	67,40
	10 a 20	0,82	0,46	64,12
	20 a 40	0,42	0,37	61,92
	40 a 60	0,70	0,33	63,64
	60 a 80	0,45	0,27	63,95
	80 a 100	0,65	0,33	67,55
Tráfego	0 a 10	1,55	0,73	73,05
	10 a 20	1,22	0,66	65,30
	20 a 40	1,03	0,55	66,84
	40 a 60	1,10	0,45	70,36
	60 a 80	0,91	0,42	68,41
	80 a 100	0,90	0,38	64,02

* DMP = Diâmetro médio ponderado; DMG = Diâmetro médio geométrico; IEA = Índice de estabilidade de agregados

** Canteiro = ponto zero bem no centro do canteiro e no meio das duas linhas menores de cana-de-açúcar; Cultura = ponto situado a 35 cm de distância do ponto zero, imaginando uma linha perpendicular às linhas de plantio e em direção à linha trafegável; Tráfego = obtido no ponto a 75 cm distanciado do ponto zero, situado na linha de tráfego.

Para a avaliação da densidade do solo e determinação da micro e macroporosidade (Tabela 3), foram retiradas amostras indeformadas coletadas com anéis volumétricos de 0,05 m de altura e 0,048 m de diâmetro. Foi utilizada câmara de Richards (KLUTE, 1986) para determinação de micro e macroporosidade e a densidade aparente do solo foi determinada pelo método do anel volumétrico (EMBRAPA, 1997).

Tabela 3 - Densidade do solo, porosidade total, macro e microporosidade antes da implantação dos experimentos em um Nitossolo Vermelho (NV), Macatuba, SP, 2015 e em um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), Borebi, SP, 2015

	Profundidades	Densidade do solo	Porosidade		
			Total	Macro	Micro
	(cm)	(g cm^{-3})	---------- (cm^3 cm^{-3}) ----------		
Nitossolo Vermelho (NV)					
Canteiro	0-20	2,34	0,41	0,02	0,40
	20-40	2,16	0,44	0,03	0,42
	40-60	2,05	0,47	0,05	0,42
	60-80	1,95	0,47	0,06	0,41
Tráfego	0-20	2,26	0,43	0,04	0,40
	20-40	2,13	0,44	0,03	0,40
	40-60	1,97	0,48	0,05	0,42
	60-80	1,85	0,48	0,07	0,41
Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA)					
Canteiro	0-20	2,26	0,38	0,14	0,11
	20-40	2,07	0,46	0,18	0,19
	40-60	2,15	0,36	0,13	0,17
	60-80	2,04	0,40	0,16	0,20
Tráfego	0-20	2,40	0,25	0,19	0,19
	20-40	2,27	0,37	0,23	0,23
	40-60	1,32	0,30	0,17	0,19
	60-80	1,26	0,36	0,22	0,19

Também foi avaliada a resistência do solo a penetração, com 8 repetições, no centro da zona não trafegada, na linha da cultura e no centro da zona de tráfego até a profundidade de 0,7 m, com o penetrômetro de impacto (modelo IAA/Planalsucar-Stolf) (STOLF et al., 1983) com ângulo de cone de 30°.

Os dados de caracterização inicial da resistência do solo à penetração, no centro da zona não trafegada, na linha da cultura e na zona de tráfego, antes da instalação dos experimentos para o Nitossolo Vermelho (Experimento 1) e para o Latossolo Vermelho-Amarelo (Experimento 2) estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Resistência do solo à penetração antes da implantação dos experimentos em um Nitossolo Vermelho (NV), Macatuba, SP, 2015 e em um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), Borebi, SP, 2015

Profundidade (cm)	Resistência à penetração (MPa)*			
	Nitossolo Vermelho (NV)			
	Tráfego	Cultura	Canteiro	Canteiro/Tráfego
0-10	1,12	5,10	1,99	1,78
10-20	1,83	3,92	2,84	1,55
20-30	3,20	3,27	2,96	0,93
30-40	3,26	3,84	2,96	0,91
40-50	2,95	3,39	2,70	0,91
50-60	2,60	2,88	2,57	0,99
60-70	2,39	2,54	2,37	0,99
	Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA)			
0-10	1,13	0,72	0,94	0,83
10-20	3,90	1,42	1,03	0,26
20-30	4,92	3,42	1,04	0,21
30-40	3,98	4,28	1,80	0,45
40-50	3,47	3,44	3,36	0,97
50-60	2,57	2,48	3,03	1,18
60-70	2,38	2,29	2,54	1,07

* Canteiro = ponto zero bem no centro do canteiro e no meio das duas linhas menores de cana-de-açúcar; Cultura = ponto situado a 35 cm de distância do ponto zero, imaginando uma linha perpendicular às linhas de plantio e em direção à linha trafegável; Tráfego = obtido no ponto a 75 cm distanciado do ponto zero, situado na linha de tráfego.

3.5 Implantação dos experimentos

Baseado nos resultados da análise do solo (Tabela 1), foram calculadas as doses de calcário baseadas nas recomendações propostas por Spironello et al. (1996):

$NC = CTC \times (V_2 - V_1) / 10 \times PRNT$

Onde:

NC = Necessidade de calagem, em t ha^{-1}

V_2 = Saturação de bases a atingir - 60% para a cana-de-açúcar

V_1 = Saturação de bases atual

CTC = capacidade de troca de cátions, expressa em $mmol_c\ dm^{-3}$

PRNT = poder relativo de neutralização total do calcário a ser utilizado (Tabela 3).

Para a caracterização do PRNT, amostras de calcário foram coletadas e enviadas para laboratório onde foi determinado os teores de CaO, MgO, Reatividade, Poder de neutralização e PRNT dos calcários, descritos na Tabela 5.

Tabela 5 - Caracterização dos calcários utilizados nos experimentos em um Nitossolo Vermelho (NV), Macatuba, SP, 2015 e em um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), Borebi, SP, 2015

Solo	CaO	MgO	Reatividade	PN*	PRNT**
			%		
Nitossolo Vermelho	30	17	89	107	95
Latossolo Vermelho-Amarelo	30	23	80	103	90

*PN = Poder de Neutralização ou equivalente em $CaCO_3$. **PRNT = Poder relativo de neutralização total.

Para o cálculo da quantidade de calcário a ser aplicada, nas duas áreas experimentais, foi considerado o somatório das quantidades recomendadas para as camadas 0-0,2 e 0,2-0,4 m. As doses de calcário para os sistemas de preparo em que foram implantados os experimentos estão descritas na Tabela 6. Cabe ressaltar que a dose utilizada nesses experimentos foi o dobro da dose recomendada para elevar a saturação por bases a 60% (SPIRONELLO et al., 1996). A escolha da dose foi baseada em experimentos prévios, onde as maiores produtividades foram alcançadas quando se aplicou o dobro da dose recomendada pela literatura.

Tabela 6 - Doses de calcário aplicadas nos diferentes modos de preparo do solo em um Nitossolo Vermelho (NV), Macatuba, SP, 2015 e em um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), Borebi, SP, 2015

Preparo do solo	**Preparo Convencional**		**Preparo Profundo**		
Aplicação de calcário	**Superficial em área total**	**Por m^2 de Canteiro**	**Superficial Canteiro**	***Profundo Canteiro**	**Por m^2 de Canteiro**
Dose de calcário	**(Mg ha^{-1})**	**(Kg m^{-2})**	**-------- (Mg ha^{-1}) -------**		**(Kg m^{-2})**
			Nitossolo Vermelho		
Sem aplicação	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Com aplicação	10,0	1,0	7,5	2,5	2,66
			Latossolo Vermelho-Amarelo		
Sem aplicação	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Com aplicação	3,0	0,3	2,2	0,8	0,8

*Aplicação em profundidade com o Penta.

3.6 Implantação dos tratamentos

Após a definição da dose de calcário e antes do preparo do solo, em abril de 2015 para o Nitossolo Vermelho (Experimento 1) e agosto de 2015 para o Latossolo Vermelho-Amarelo (Experimento 2), foram aplicadas as quantidades de calcário citadas na tabela 6. Para a aplicação superficial em área total foi utilizado o equipamento Nevoeiro (Figura 4), tipo cocho com distribuição tipo colmeia, a fim de proporcionar uniformidade na aplicação. Para isso, o equipamento foi calibrado com pesagem das quantidades distribuídas em 30 metros de acordo com as doses necessárias para cada tratamento.

Figura 4 - Aplicação superficial em área total de calcário com equipamento "Nevoeiro"

Para a aplicação superficial concentrada no canteiro foi utilizado o equipamento de distribuição Sollus (Figura 5), porém para que a aplicação ficasse concentrada no canteiro foram retirados os pratos responsáveis pela distribuição centrífuga. O equipamento foi calibrado com pesagem das quantidades distribuídas em 30 metros de acordo com a dose necessária para cada tratamento.

Figura 5 - Aplicação superficial de calcário dolomítico no canteiro com equipamento “Sollus”

Após a aplicação do calcário, foram realizados os preparos do solo de acordo com cada tratamento. No Nitossolo Vermelho (Experimento 1) os preparos do solo foram realizados em agosto de 2015 e no Latossolo Vermelho-Amarelo (Experimento 2) foram realizados em abril de 2015. O preparo convencional foi realizado em área total com uma passada de grade pesada (Figura 6A), subsolador (Figura 6B) e grade leve (Figura 6C).

Figura 6 - Preparo convencional do solo com gradagem pesada (A) subsolagem (B) e gradagem leve (C)

No tratamento com preparo profundo foi realizada a operação com a haste subsoladora e enxada rotativa do equipamento Penta (Figura 7A) apenas no canteiro (preparo em faixas) (Figura 7B) e foi realizada a aplicação em profundidade de ¼ da dose de calcário, atrás da haste subsoladora (Tabela 6).

Figura 7 - Equipamento "Penta" com Haste subsoladora e enxada rotativa (A) e Preparo profundo em metade da área (Canteiro) (B)

Para ambos os experimentos, na dessecação das plantas daninhas e na rebrota da cana-de-açúcar foi realizada a aplicação de glifosato na dose de 2400 g ingrediente ativo (i.a.) ha^{-1}, utilizando volume de 5 L ha^{-1}, e foi aplicado, juntamente ao preparo de solo, 1 Mg ha^{-1} de gesso.

Na área do Nitossolo Vermelho (Experimento 1), no mesmo dia em que foi realizado o preparo e a aplicação de calcário, em abril de 2015, foi realizado o plantio mecanizado da cana-de-açúcar, utilizando a variedade de cana-de-açúcar CTC 20, distribuindo 18 gemas viáveis m^{-1}, a uma profundidade de 30-40 cm. Foi realizada a aplicação no fundo do sulco de plantio de 500 kg ha^{-1} do formulado 06-28-24 e também foram aplicados sobre os toletes o inseticida Fipronil (200 g do i.a. ha^{-1}), o inseticida Clorantraniliprole (105 g i.a. ha^{-1}) e o fungicida Piraclostrobina (125 g i.a L^{-1}). Aos 90 dias após o plantio (DAP) foram aplicados os herbicidas Sulfentrazona (900g i.a ha^{-1}) e o Clomazone (1040 g i.a. L^{-1}) e aos 240 DAP foi aplicado o inseticida Clorantraniliprole (18 g i.a. ha^{-1}).

Para o Latossolo Vermelho-Amarelo (Experimento 2), quatro meses após o preparo de solo e aplicação do calcário, em dezembro de 2015, foi realizado o plantio manual da cana-de-açúcar, utilizando a variedade CV7870, distribuindo 18 gemas viáveis m^{-1}, a uma profundidade de 30-40 cm. Foi realizada a aplicação no fundo do sulco de plantio de 500 kg ha^{-1} do formulado 04-30-10 e também foram aplicados sobre os toletes o inseticida Fipronil (400 g i.a. ha^{-1}), o fungicida Piraclostrobina (125 g i.a. L^{-1}), o inseticida-acaricida Carbosulfano (2800 g i.a. L^{-1}), e aos 60 DAP foi aplicado 180 kg ha^{-1} de KCL (00-00-60) e o herbicida S-metolacloro (1800 g i.a. ha^{-1}).

3.7 Condução dos experimentos após a primeira e segunda colheitas (Tratos culturais das Soqueiras)

A primeira colheita dos experimentos 1 e 2 foi realizada em julho de 2016. Ocorreu geada na área do experimento 2, em Borebi, SP, fazendo com que a cana-de-açúcar fosse colhida antecipadamente, aos 7 meses após o plantio. A segunda colheita dos experimentos 1 e 2 foi realizada em agosto e setembro de 2017, respectivamente.

Os tratos culturais realizados na área do Nitossolo Vermelho (Experimento 1) foram: na primeira soqueira, aos 20 dias após a colheita (DAC) (agosto de 2016), foi realizada a aplicação em cobertura de 115 kg ha^{-1} do fertilizante organomineral Ajifer, o herbicida Sulfentrazona (600 g i.a. ha^{-1}), o herbicida Isoxaflutol (97,5 g i.a. ha^{-1}), o herbicida Amicarbazona (910 g i.a ha^{-1}) e o inseticida Fipronil (200 g i.a ha^{-1}). Na segunda soqueira, aos 30 DAC (setembro de 2017), foi realizada a aplicação em cobertura de 115 kg ha^{-1} do fertilizante organomineral Ajifer, o herbicida Sulfentrazona (600 g i.a. ha^{-1}), o herbicida Clomazona (900 g i.a. ha^{-1}), o herbicida Amicarbazona (910 g i.a ha^{-1}) e o inseticida Tiametoxam (282 g i.a. ha^{-1}).

Na área do Latossolo Vermelho-Amarelo (Experimento 2) foram realizados os seguintes tratos culturais: na primeira soqueira, aos 60 DAC (setembro de 2016), foi realizada a aplicação em cobertura de 2000 kg ha^{-1} do fertilizante organomineral Ajifer, 300 kg ha^{-1} do fertilizante organomineral Organosolvi, o herbicida Diuron (1085,4 g i.a. ha^{-1}) e o herbicida Metsulfurom metilico (6 g i.a. ha^{-1}). Na segunda soqueira, aos 30 DAC (setembro de 2017), foi realizada a aplicação em cobertura de 750 kg ha^{-1} do fertilizante organomineral Organomais (11-03-15).

3.8 Avaliações

3.8.1 Fracionamento físico da matéria orgânica

Foi realizado após a segunda colheita nos experimentos 1 e 2, em agosto e setembro respectivamente. Foram coletadas amostras nas camadas de 0,-0,2, 0,2-0,4, 0,4-0,6, 0,6-0,8 e 0,8-1 m de profundidade na menor entrelinha (0,90 m - entrelinha não trafegável) e na maior entrelinha (1,50 m - entrelinha trafegável).

Procedeu-se o fracionamento granulométrico, adaptado de Cambardella e Elliott (1992). O princípio do método consiste em separar o carbono orgânico do solo em

duas frações: carbono orgânico particulado (COP), menos decomposto e mais recentemente depositado no solo, e carbono orgânico associado a minerais (COAM), mais recalcitrante e humificado.

Para tal, foram pesados 20 gramas de solo seco ao ar, tamisados em malha de 2 mm, em copos de polietileno de 250 mL e adicionados 80 mL de solução dispersante de hexametafosfato de sódio 5 g L^{-1}. Em seguida, as amostras foram agitadas por 15 horas em agitador horizontal, passadas em peneira de malha de 0,053 mm (270 Mesh) e enxaguadas várias vezes com água destilada até remoção total da argila. O material particulado retido na peneira, ou fração particulada (FP), foi transferido para potes de alumínio, com auxílio de jatos de água, e seco em estufa de circulação de ar forçada a 50°C até atingir massa constante.

Após a secagem, o material foi pesado, determinando-se assim a massa da fração particulada (MFP), moído e homogeneizado com auxílio de um bastão de vidro, e submetido à determinação de C em analisador elementar automático modelo TruSpec™ CHNS, da LECO®, obtendo-se o teor de carbono da fração particulada do solo (CFP), sendo possível calcular o teor de carbono orgânico particulado (COP) do solo, de acordo com a equação 1:

$$COP = \frac{CFP \,.MFP}{Ps} \quad (1)$$

Onde: COP = teor de carbono orgânico particulado do solo (g kg^{-1}); CFP = teor de carbono da fração particulada (g kg^{-1}); MFP = massa da fração particulada (g); Ps = massa da amostra inicial do solo (g) (20 gramas).

O teor de carbono associado a minerais (COAM) foi calculado pela diferença entre o carbono orgânico total e o carbono orgânico particulado (equação 2):

$$COAM = COT - COP \quad (2)$$

Onde: COAM = teor de carbono orgânico associado a minerais no solo (g kg^{-1}); COT = teor de carbono orgânico total do solo (g kg^{-1}); COP = teor de carbono orgânico particulado do solo (g kg^{-1}).

3.8.2 Análises microbianas

Para as análises microbianas, após a segunda colheita, nos meses de agosto e setembro, foram coletadas amostras de solo na profundidade de 0-20 cm, nos experimentos 1 e 2 respectivamente. O solo retirado foi destinado para as análises microbiológicas como carbono da biomassa microbiana do solo, atividade da enzima desidrogenase, respiração basal e quociente metabólico do solo.

Essas análises foram realizadas no Laboratório de Biologia do Solo da Universidade do Oeste Paulista - Faculdade de Ciências Agrárias (UNOESTE).

3.8.2.1 Análise de C na Biomassa Microbiana (Cmic)

A análise da biomassa microbiana do solo (BMS) foi realizada em duplicata, utilizando a metodologia descrita por Ferreira et al. (1999), onde o solo foi seco em estufa com ventilação a 30º C por 24 horas, após este processo as amostras foram passadas em peneira de 2,0 mm de malha. Depois foram pesadas em erlenmeyer de 250 mL, 2 amostras de 50 g de cada parcela, foram reumedecidas com 3 mL de água destilada para atingir aproximadamente 25% da capacidade de campo de um solo arenoso (REICHARDT, 1988), agitadas para uniformizar a distribuição da umidade e colocada 1 amostra de cada tratamento para irradiar no micro-ondas por 70 segundos, tempo obtido pela equação 3.

$$T = r \,.\, \frac{\mathrm{mt}}{P} \qquad (3)$$

Onde: T = tempo real de exposição das amostras ao micro-ondas; R = 800J g^{-1} de solo, quantidade de energia necessária para exposição; m_t= Massa total das amostras a serem irradiadas em gramas; P = Potência real do aparelho em W.

A potência real do aparelho foi calculada pela equação 4.

$$P = \frac{Cp \,.K \,.\Delta \mathrm{t} \,.\mathrm{m}}{T} \qquad (4)$$

Onde: P = potência real do aparelho em W; Cp = 1 J ml^{-1} $ºK^{-1}$, capacidade da água de receber calor; K = 4,184, fator de correção de cal m^{-1} º K^{-1} para watts (J s^{-1}); Δt =

variação de temperatura em ºC de 1 L de água em 2 minutos de exposição; m = 1000 g, massa da água em gramas; t = 120 s, tempo de exposição da água ao micro-ondas.

As amostras irradiadas e não-irradiadas foram submetidas à extração com 50mL de Sulfato de Potássio - K_2SO_4 (0,5 mol L^{-1}) por 30 minutos, em agitador rotatório circular. Foram então deixadas para decantar e filtradas em papel filtro.

A determinação do carbono nos extratos irradiados e não irradiados foram feitas utilizando-se 10 mL do extrato, oriundo dos 50 mL após filtração, e adicionando-se em seguida 2 mL de $K_2Cr_2O_7$ (0,066 mol L^{-1}), 10 mL de H_2SO_4 concentrado e 5 mL de H_3PO_4 concentrado. Após o resfriamento foi adicionado 50mL de água destilada.

A titulação foi feita utilizando-se Sulfato Ferroso Amoniacal (0,04 mol L^{-1}) com fenil-alanina como indicador.

O C extraído do solo foi calculado pela equação 5.

$$C = \frac{(Vb - Va).N .1000 .Vextrator}{(\text{volume do extrato x massa do solo seco})} \quad (5)$$

Onde: C = carbono extraído do solo (mg kg^{-1}); Vb = Volume (mL) do $(NH_4)_2Fe(SO_4)_2$ gasto na titulação do branco; Va = Volume (mL) do $(NH_4)_2Fe(SO_4)_2$ gasto na titulação da amostra; N = normalidade exata do $(NH_4)_2Fe(SO_4)_2$, N = 0,677; Vextrator = Volume de K_2SO_4 utilizado na extração = 50mL; Vextrato= Volume de K_2SO_4 utilizado para análise = 10mL; Massa do solo seco em gramas = 50g.

O Cmic é calculado pela equação 6:

$$Cmic = \frac{CI - CNI}{K_{ec}} \quad (6)$$

Onde: C_I = carbono extraído do solo irradiado; C_{NI} = carbono extraído do solo não irradiado; K_{ec} = proporção total do carbono microbiano extraído após irradiação = 0,21 (FRIGHETTO, 2000).

O fator de correção Kec citados na literatura são muito variáveis (0,21 a 0,45), não havendo um consenso a respeito do valor a ser utilizado. Neste trabalho adotou-se o valor de 0,21 (FRIGHETTO, 2000).

3.8.2.2 Atividade da enzima desidrogenase

A atividade da enzima desidrogenase foi estimada segundo Van Os e Ginkel (2001). Foram colocadas 5 g de solo de cada amostra em tubos de ensaio, que em seguida receberam 2 mL da solução de cloreto de 2,3,5-trifeniltetrazólio (T.T.C) a 1%, juntamente com 1 ml de glicose a 0,1%. As amostras foram misturadas em agitador tipo VORTEX e incubadas em tubo de ensaio a 30 ºC, por 18h. Após a incubação, foi adicionado 9 mL de metanol em todas as amostras, e logo em seguida, foram filtradas para a realização da leitura no espectofotômetro em 530 nm. Os resultados foram ajustados em curva padrão e expressos na forma de concentração de trifenil formazan (TTF - $\mu g\ g^{-1}$).

3.8.2.3 Análise da respiração microbiana do solo

A taxa de respiração microbiana do solo foi avaliada segundo Alef e Nanipieri (1995). Foram utilizadas alíquotas de 50 g de solo de cada amostra, umedecidas a 50% da capacidade de campo, homogeneizadas e mantidas dentro de frascos fechados hermeticamente. Sobre a superfície do solo, em cada frasco, colocou-se um becker de 50 ml contendo 40 mL de solução de NaOH 0,5 mol L^{-1}. Os frascos ficaram incubados pelo período de 48 horas. Para avaliar a retenção de CO_2 na solução, utilizou o método condutimétrico (RODELLA; SABOYA, 1999) com leituras de condutividade na solução de NaOH a cada 24 horas, empregando-se um condutivímetro HI99301 (Hanna instruments). A quantidade de CO_2 produzida pela respiração foi calculada utilizando-se fórmula definida por Rodella e Saboya (1999) e os resultados foram expressos em mg de C-CO_2 g^{-1} h^{-1}.

3.8.2.4 Quociente metabólico (qCO_2)

O quociente metabólico foi calculado pela razão entre o C-CO_2 liberado na análise de respiração microbiana e o teor de carbono na biomassa microbiana do solo (Cmic), expresso em mg C-CO_2 g^{-1} Cmic h^{-1} (ANDERSON; DOMSCH, 1993).

3.8.2.5 Quociente microbiano (qMic)

O quociente microbiano foi calculado pela relação entre o teor de carbono da biomassa microbiana (Cmic) e o teor de carbono orgânico total (COT) (ANDERSON; DOMSCH, 1993), sendo os resultados expressos em porcentagem.

3.9 Atributos físicos do solo

Após o segundo corte da cana, também nos meses de agosto e setembro, foram coletadas amostras para as avaliações dos atributos físicos do solo, nos experimentos 1 e 2 respectivamente.

3.9.1 Coleta e preparo das amostras não deformadas

Para determinação da densidade, da macro e microporosidade e da porosidade total do solo, foram coletadas amostras indeformadas de solo, por meio de anéis volumétricos com 5,0 cm de altura por 4,8 cm de diâmetro interno, nas camadas de 0-0,2; 0,2-0,4; 0,4-0,6; 0,6-0,8 e 0,8-1 m, em trincheiras de 120 cm de largura por 100 cm de profundidade e 100 cm de comprimento abertas no transecto entre a linha de cultivo e a zona de tráfego, utilizando um suporte de aço para os anéis (“castelinho”) e marreta de 1 kg (Figura 8). Com essa dimensão de largura da trincheira foi possível posicionar uma parede da trincheira no centro da menor entrelinha da cultura, ou seja, no centro do canteiro (zona não trafegável) e a outra parede no centro da maior entrelinha, ou seja, no centro da zona de tráfego. Dessa forma, foi coletada 1 amostra por profundidade em duas paredes de cada trincheira. As trincheiras foram abertas com mini retroescavadeira, em cada repetição parcela experimental, totalizando 16 trincheiras em cada experimento.

Após a coleta das amostras, ainda no campo, foi retirado o excesso de solo dos bordos dos anéis, com o auxílio de um estilete. Em seguida, os anéis volumétricos foram vedados com tampas plásticas para evitar possíveis danos e deformações, e armazenados em refrigerador a 2ºC, até serem processados.

Para determinar a densidade (Ds), a macroporosidade (Macro), a microporosidade (Micro) e a porosidade total do solo (Pt), foram utilizados os métodos descritos em EMBRAPA (1997).

As amostras não deformadas foram colocadas para saturar em bandejas plásticas com água até 2/3 da altura dos anéis. Para evitar perda de solo, foi colocado um tecido de poliéster, que permite apenas a passagem de água, no fundo de cada anel e fixado com atilho de borracha. Após 72 horas de imersão das amostras, e com todos os poros do solo ocupados pela água, iniciou-se a drenagem das amostras, submetendo-as à tensão de 0,006MPa.

Figura 8 - Abertura das trincheiras com mini retroescavadeira (A e B) e coleta de anéis volumétricos (C e D)

A extração de água das amostras nas câmara de Rhichards (KLUTE, 1986) foi realizada por meio de compressor com capacidade para 20 bar (Figura 9). Após extração da água, as amostras foram pesadas e colocadas para secar a 105 ºC, por 48 horas, em estufa de aeração forçada, para em seguida serem determinados os pesos secos das amostras com volume de solo conhecido.

Figura 9 - Câmara de Rhichards com os anéis volumétricos

Com a diferença entre a massa das amostras saturadas com água e secas a 105ºC, e com volume conhecido das amostras, calculou-se a Pt (EMBRAPA, 1997). Para calcular a Ds, dividiu-se a massa das amostras secas a 105 ºC pelo volume do anel volumétrico (BLAKE e HARTGE, 1986).

A Macro e a Micro foram determinadas através do teor de água retida nas amostras em equilíbrio com a tensão de 0,006 MPa. Considerando que essa tensão é suficiente para retirar toda a água retida nos macroporos, sendo que a água restante representa o volume de microporos (EMBRAPA, 1997). Portanto, conhecendo a Pt e a Micro foi possível calcular a Macro (Pt = Macro + Micro).

3.9.2 Estabilidade de agregados

No perfil exposto pelas trincheiras foram retirados, com o auxílio de uma espátula, monólitos de solo com dimensões aproximadas de 20 cm de altura por 10 cm de comprimento e 10 cm de largura, nas profundidades de 0-0,2; 0,2-0,4; 0,4-0,6; 0,6-0,8 e 0,8-1 m. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos e posteriormente pré-selecionadas em um jogo de peneiras sobrepostas, tendo as peneiras superior e inferior malhas de 8 e 4 mm, respectivamente. Para a avaliação da estabilidade dos agregados utilizou-se a porção que passou pela malha de 8 mm e ficou retida na de 4 mm.

Os agregados do solo pré-selecionados foram avaliados quanto à estabilidade de agregados via úmida, conforme Kemper e Chepil (1965), utilizando o aparelho de oscilação vertical (YODER, 1936). O aparelho que movimenta verticalmente 4 conjuntos de peneiras imersos em água consta de um motor elétrico acoplado a um redutor de velocidade, tendo uma polia com eixo excêntrico, com 30 ciclos por minuto (MÜLLER, 2002). Ligado ao eixo excêntrico há uma haste vertical com a função de sustentar quatro jogos de peneiras e de mergulhar cada jogo em um tanque contendo água. Os jogos de peneiras são ajustados de tal forma que, quando ocorre a oscilação vertical (3,5 cm), a amostra de solo depositada inicialmente no tamis superior mergulhe totalmente e depois suba até aflorar acima do nível da água. É importante frisar que foi evitada a queda de água sobre as amostras pela borda superior da peneira, o que ocorre caso o nível da água esteja elevado ou o curso de deslocamento esteja desajustado, ou ainda, quando há bolhas de ar entre as peneiras.

Cada conjunto foi composto por 5 peneiras com as seguintes malhas: 2,0, 1,0, 0,5, 0,25 e 0,105 mm. Como o aparelho possui 4 jogos de peneiras, foi possível processar 4 amostras por vez.

Duas subamostras, uma de 20 e outra de 15 gramas, foram retiradas de cada amostra, sendo a primeira para o tamisamento e a segunda para determinar o teor de água do solo no momento da avaliação. As amostras para tamisamento, após serem pesadas, foram umedecidas levemente por meio de um borrifador de água. Esperou-se 10 minutos para que a umidade dentro dos agregados fosse uniformizada, e em seguida depositou-se a amostra na peneira superior do conjunto (malha de 2 mm).

O tamisamento mecânico em água foi realizado por 15 minutos. Após esse tempo de peneiramento, supõe-se que os falsos agregados se desfaçam inteiramente e que

os agregados verdadeiros passem para as peneiras inferiores onde serão retidos pelas malhas menores que suas dimensões. Finalmente, o material contido em cada peneira é trasferido para potes de alumínio, com auxílio de pissetas, levado para secar em estufa a 105 °C por 48h, e pesado em balança com precisão de centésimo de grama. Uma sexta classe de agregados foi considerada como agregados menores que 0,105 mm, pela diferença entre massa de solo inicial e o somatório de solo retido em cada peneira.

Obtido o peso de solo seco de cada classe de agregados, bem como o peso seco total das amostras, por meio da determinação do teor de água do solo, os valores de DMP (diâmetro médio ponderado) e DMG (diâmetro médio geométrico) foram calculados através das equações 7 e 8, respectivamente. Calculou-se, também, o índice de estabilidade dos agregados (IEA), utilizando a equação 9 (CASTRO FILHO et al., 1998) e a porcentagem de agregados retidos na peneira de 2 mm.

Quanto maior for a porcentagem de agregados grandes, retidos nas peneiras com malhas maiores, maior será o DMP. O DMG representa uma estimativa da classe de agregados de maior ocorrência. O IEA representa a medida de agregação total do solo e não considera a distribuição por classe de agregados. Quanto maior a quantidade de agregados menores que 0,25 mm, menor será o IEA. Essas propriedades foram calculadas por meio das seguintes equações.

$$DMP = \sum_{i=1}^{n}(xi \,.\, wi) \tag{7}$$

Onde: xi = diâmetro médio das classes; wi = proporção de cada classe em relação ao total.

$$DMG = \frac{exp \sum_{i=1}^{n} wp \,.\, \log xi}{\sum_{i=1}^{n} wi} \tag{8}$$

Onde: wp = peso dos agregados de cada classe (g).

IEA = ((peso da amostra seca – wp25)/peso da amostra seca) . 100 (9)

Onde: wp25 = peso dos agregados menores que 0,25 mm.

3.9.3 Resistência do solo à penetração

Para as medidas de resistência à penetração realizadas no campo, utilizou-se o penetrômetro convencional modelo Stolf, constituído por um peso para provocar o impacto, uma haste e um cone para a penetração no solo (STOLF et al., 1983). A penetração da haste é obtida pelo impacto de uma massa (4 kg) em queda livre de uma altura h (metros) (Figura 10).

Figura 10 - Penetrômetro convencional modelo Stolf

A cada impacto foram registrados os valores do deslocamento x (metros), os quais foram convertidos em pressão de penetração ou resistência à penetração (em unidades de MPa), através da fórmula, modificada por Stolf (1990), considerada para o cálculo de índice de cone (Equação 10).

$$R(MPa) = \frac{[(M=m)g)+{}^{M}/_{(M+m)}{}^{*}{}^{Mgh}/_{x}}{A} * 0{,}101325 \qquad (10)$$

Onde *R* é a resistência à penetração conhecido como Índice de Cone (MPa); *M* é a massa total do equipamento (Kg); *m* é a massa do êmbolo (Kg); *g* é a aceleração da gravidade (m/s); *h* é a altura da queda do êmbolo (cm); *x* é o número de impactos; *A* é a área de projeção da ponteira (mm^2).

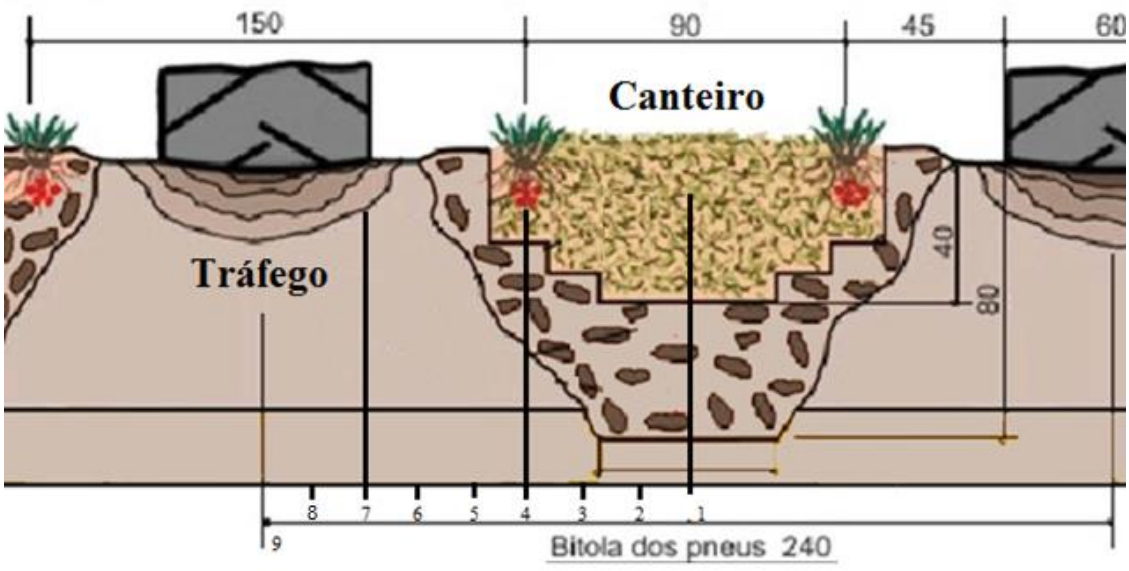
Os valores para as variáveis são: M = 4,019 kg; m = 3,33 kg; (M+m) g = 7,349 kgf; h = 40 cm e A = 1,22 cm^2. Assim utilizou-se a equação 11:

$$R(MPa) = 0{,}67 + 0{,}731 * N \quad (11)$$

Onde *R* é a resistência à penetração conhecido como Índice de Cone, MPa; e *N* é o número de impactos/10cm no solo.

A avaliação foi baseada em um transepto perpendicular de 1,20 m, entre o centro da linha não trafegável (canteiro) e o centro da linha trafegável (tráfego) (Figura 11). Nesse transepto foram avaliados 9 pontos distanciados em 0,15 m um do outro. Dessa forma, foi possível obter resultados desde a área não trafegada até a área trafegada. Foi realizado 1 transepto em cada parcela experimental.

Figura 11 – Transepto de coleta para análise de resistência a penetração pelo método de Stolf, onde os pontos de coleta estão numerados do 1 ao 9, distanciados em 15 cm



(Fonte: Adaptado de Ciro Pozzi Garcia).

Concomitante à leitura de RP, foi realizada a coleta de umidade do solo nas profundidades 0-0,2 e 0,2-0,4 m. No experimento 1 a umidade em ambas as camadas amostradas foi de 30% e no experimento 2 a umidade foi 4,6% e 10% nas camadas 0-0,2 e 0,2-0,4 m, respectivamente.

3.10 Produtividade de colmos

No momento da colheita, em ambos os experimentos, foi avaliada a produtividade de colmos (Mg ha^{-1}) através da colheita mecânica e pesagem de colmos das parcelas com transbordo equipado com célula de carga.

3.11 Análises estatísticas

Os dados foram submetidos a análise de variância e as médias comparadas pelo teste LSD à 5% de probabilidade, utilizando o programa Sisvar 4.2 (FERREIRA, 2008).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 EXPERIMENTO 1 – NITOSSOLO VERMELHO – TEXTURA ARGILOSA

4.1.1 Fracionamento físico da MOS

4.1.1.1 – Canteiro

Como esperado, os maiores teores de carbono orgânico total (COT) foram verificados na camada superficial do solo, devido a deposição dos resíduos vegetais da cultura, aumentando o acúmulo de matéria orgânica em superfície. O manejo que apresentou o maior teor de COT na camada de 0-20 cm, foi o PC sem aplicação de calcário (Tabela 7). Os menores teores encontrados nos demais tratamentos podem ser decorrentes do aumento da mineralização do carbono e consequente oxidação da matéria orgânica, ou devido ao revolvimento excessivo e profundo do solo no PP, e/ou decorrente da aplicação do calcário. As condições mais oxidativas decorrentes do revolvimento do solo, associadas ao aumento do fracionamento e contato dos resíduos vegetais com o solo devido a incorporação, favorecem o processo de decomposição da MOS resultando em menores concentrações de CO.

Persson et al. (1995) relatam que as perdas de COT após calagem podem ser atribuídas ao aumento das taxas de mineralização e aumento do transporte em horizontes subjacentes. As alterações induzidas pela calagem no pH do solo, inicialmente aumentam a solubilidade de CO (ANDERSSON e NILSSON, 2001) e podem subsequentemente estabilizar o CO via pontes de Ca^{+2} (SIX et al., 2004) alterando sua suscetibilidade à lixiviação e decomposição microbiana. Um ambiente

de pH mais favorável criado pela calagem pode alterar o tamanho, atividade e/ou composição da comunidade microbiana do solo (ACIEGO PIETRI e BROOKES, 2009; ROUSK et al., 2009), potencialmente consumindo mais CO.

Na camada de 20-40 cm de profundidade, observou-se que nos dois tipos de preparo do solo, a aplicação de calcário aumentou os teores de COT (Tabela 7). Como em ambos os preparos do solo houve a incorporação do calcário, a melhoria nas condições químicas do solo em subsuperfície decorrentes da calagem, proporcionando um melhor desenvolvimento do sistema radicular, podem ter sido os responsáveis pelos maiores teores de COT nesses tratamentos.

Observa-se, no entanto, que a variação dos teores de COT, nas diferentes profundidades amostradas e entre os dois tipos de preparo de solo, independentemente da aplicação de calcário, foi baixa, o que pode ser justificado pelo alto teor de argila desse solo, conferindo ao carbono orgânico proteção coloidal maior e dificultando a degradação do material orgânico. Segundo Parfitt et al. (1997), o efeito dos sistemas de preparo sobre a taxa de perda de matéria orgânica depende do tipo de solo, basicamente da sua mineralogia e textura. Sendo assim, quanto mais argiloso o solo e com predominância de minerais de cargas variável, como óxidos de ferro e de alumínio e caulinita, menor a diferença entre as taxas de decomposição da matéria orgânica do solo submetido a diferentes sistemas de preparo.

Para o carbono orgânico particulado (COP) observou-se que, em média, na camada de 0-20 cm de profundidade o PC apresentou os maiores teores quando comparado ao PP, sendo o maior teor observado no PC com aplicação de calcário (Tabela 7). O COP pode ser um indicativo de um manejo mais conservacionista da MOS, por ser mais lábil e de fácil mineralização, evidenciando assim um aporte de C mais recente. Quando o acúmulo se dá na superfície do solo, indica um aporte de resíduos da parte aérea e quando em profundidade um aporte de resíduos radiculares. Segundo Silva e Mendonça (2007), os estoques dessa fração podem aumentar em sistemas com menor revolvimento do solo. Ainda que ambos os sistemas de preparo tenham revolvido o solo, o PP quando comparado ao PC do solo, é considerado mais agressivo, uma vez que mobiliza o solo até 70-80 cm de profundidade, além de pulverizar a superfície do solo através da enxada rotativa.

Tabela 7 - Carbono orgânico total (COT), carbono orgânico particulado (COP), carbono orgânico associado aos minerais (COAM) e labilidade (LAB = (COP/COT)* 100), nas profundidades de 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm, em um Nitossolo Vermelho, em função do tipo de preparo do solo, na presença ou ausência de aplicação de calcário, em coletas no canteiro de cana-de-açúcar, Macatuba, SP, 2017

Tratamentos	COT	COP	COAM	LAB
	---------- (g kg^{-1}) ----------			%
---------- Camada de 0 a 20 cm ----------				
PP com	11,45 b	1,28 c	10,16 b	11,26 b
PP sem	10,63 b	0,83 d	9,79 b	7,89 c
PC com	11,47 b	1,59 a	9,87 b	14,34 a
PC sem	14,43 a	1,46 b	12,97 a	10,17 b
---------- Camada de 20 a 40 cm ----------				
PP com	8,86 a	0,57 a	8,28 a	6,51 ab
PP sem	8,60 ab	0,44 b	8,16 ab	5,13 b
PC com	9,49 a	0,56 ab	8,93 a	5,89 b
PC sem	7,61 b	0,61 a	7,00 b	8,21 a
---------- Camada de 40 a 60 cm ----------				
PP com	8,20 ab	0,55 a	7,65 ab	6,73 a
PP sem	7,65 b	0,52 a	7,12 b	6,95 a
PC com	8,26 ab	0,51 a	7,74 ab	6,30 a
PC sem	9,18 a	0,47 a	8,70 a	5,20 a
---------- Camada de 60 a 80 cm ----------				
PP com	8,60 a	0,84 a	7,75 a	9,97 a
PP sem	7,96 ab	0,61 b	7,35 a	7,74 b
PC com	7,36 b	0,54 b	6,81 a	7,81 b
PC sem	7,69 ab	0,59 b	7,09 a	7,72 b
---------- Camada de 80 a 100 cm ----------				
PP com	7,13 a	0,56 ab	6,56 a	7,89 a
PP sem	7,44 a	0,51 b	6,92 a	6,97 ab
PC com	6,69 a	0,39 c	6,57 a	5,68 b
PC sem	7,80 a	0,64 a	7,15 a	8,24 a

*Médias seguidas por letras distintas diferem estatisticamente pelo teste t ($p<0,05$) e comparam os manejos dentro de cada profundidade.

** PP com = Preparo Profundo em Faixa com haste Subsoladora e Enxada Rotativa, com aplicação de 10 Mg ha^{-1} de calcário apenas na faixa de preparo; PP sem = Preparo Profundo em Faixa com haste Subsoladora e Enxada Rotativa, sem aplicação de calcário; PC com = Preparo Convencional, com aplicação de10 Mg ha^{-1} de calcário em área total; PC com = Preparo Convencional, sem aplicação de calcário em área total.

O COP, em geral, apresenta-se em menor proporção do que o carbono orgânico associado a minerais (COAM), com valores em torno de 3 a 20% do COT no solo. Observou-se que na camada superficial (0-20 cm) e na camada de 20-40 cm, a labilidade do C (LAB) no PC, independente da aplicação de calcário, representou 12

e 6,5 % do COT respectivamente (Tabela 7), sendo superiores aos valores observados no PP do solo. A LAB indica uma matéria orgânica de maior qualidade, devido a importância do C lábil nos fluxos de matéria e energia no solo. De acordo com Galdos et al. (2009), diferenças nessa proporção (COP e COAM) podem estar associadas ao tipo de solo, às condições climáticas e à qualidade e magnitude do aporte de resíduos culturais, bem como à intensidade de revolvimento do solo.

O COAM é considerado a fração da matéria orgânica de maior estabilidade (BALESDENT et al., 1998; BUYANOVSKY et al., 1994; BAYER et al., 2001), devido sua interação com a superfície dos minerais, constituindo um mecanismo de proteção coloidal por meio de complexos organominerais (CHRISTENSEN, 2000; DIECKOW et al., 2009), caracterizado como um processo de transição lento. Na Tabela 7, observa-se que até a profundidade de 60 cm o COAM teve o mesmo comportamento do COT, mostrando que a maior parte do COT esteve ligada aos minerais. Normalmente, o COAM mostra-se menos sensível ao manejo do solo, principalmente no curto prazo (BAYER et al., 2004), porém o revolvimento do solo associado a aplicação de calcário pode ter estimulado perdas de matéria orgânica mais lábil, uma vez que houve um curto período para a sua reestabilização nessa fração. E também pelo fato do solo apresentar um alto teor de argila, o que pode ser um indício de considerável potencial de associação da MO a minerais do solo. Segundo Carmo et al. (2012) solos com maior conteúdo de argila têm maior poder de conservação e estabilização da MOS.

Além disso, a calagem em solos de carga variável, pode aumentar a quantidade de cargas dependentes de pH (SOARES et al., 2005; WEBER et al., 2005), porque com o aumento do pH, ocorre a dissociação do H^+ dos grupos OH da matéria orgânica, das argilas minerais e dos óxidos de Fe e Al, promovendo aumento da CTC (ALLEONI; CAMBRI; CAIRES, 2005). Concomitantemente a isso, a maior disponibilidade de Ca^{2+} na solução do solo, como resultado da calagem, podem promover a associação entre argila e húmus, que é explicado pela elevada correlação entre teores de COT e o Ca^{2+} (BRIEDIS et al., 2012b). De acordo com Muneer e Oades (1989), a presença de pontes catiônicas entre as argilas silicatadas e os radicais orgânicos é um mecanismo comum de estabilização da MOS, com o cálcio se destacando como um dos cátions de grande importância para o estabelecimento dessas pontes. Os autores enfatizam que a calagem faz com que o Ca^{2+} seja o cátion predominante no complexo de troca, atuando como estabilizante físico da MOS porque permite melhor floculação das partículas, melhorando a agregação, e ela conduz a um aumento da condensação de

minerais orgânicos, como resultado do contrabalanço das cargas negativas dos grupos funcionais da MOS.

4.1.1.2 Fracionamento físico da MOS - Área de tráfego

Na linha de tráfego, observou-se que até a profundidade de 60 cm, os maiores teores de COT foram encontrados em PC, sendo que nas camadas de 0-20 e 20-40 cm os maiores teores observados no PC foram quando não houve aplicação de calcário (Tabela 8). Como não houve preparo do solo na área de tráfego em PP, é possível que a compactação do solo tenha reduzido o crescimento radicular em direção a área de tráfego, reduzindo assim o aporte de C nesse tratamento.

Para os teores COP, até os 40 cm de profundidade, foram observados maiores teores em PC quando houve aplicação de calcário (Tabela 8). É possível que os maiores valores encontrados no sistema de PC tenham sido em função da melhoria nas condições químicas do solo decorrentes da calagem, proporcionando um melhor desenvolvimento do sistema radicular, o que não ocorreu na área de tráfego do sistema de PP, uma vez que nesse sistema a aplicação de calcário só ocorreu no canteiro da cultura.

O teor de COAM, normalmente é menos alterado pelas diferentes formas de manejo adotado, principalmente a curto prazo (BAYER et al., 2004). Entretanto, verificaram-se diferenças entre os tipos de preparo, sendo o PC o que apresentou, em média, os maiores teores até 60 cm de profundidade (Tabela 8). Estas diferenças podem ser reflexo da inversão das camadas pela gradagem, apresentando um conteúdo maior que no PP, onde não houve revolvimento do solo.

Em relação à labilidade do C, o PC com calagem foi quem apresentou o maior valor, na camada de 0-20 cm. É possível que o aporte de C promovido pelo PC em área total, apesar de promover a mineralização da MOS, tenha tornado o balanço de C positivo, aumentando a MOS, o que pode ser observado pelo aumento de COP nesse tratamento (Tabela 8). Já nas camadas mais profundas, de 40 a 60 cm, os maiores valores foram encontrados no PP quando houve aplicação de calcário (Tabela 8). Como também foi observado um maior teor de COP nesse tratamento, é provável que seja consequência do maior crescimento de raízes em profundidade, o que gera um maior aporte de resíduos, aumentando assim o teor de MO lábil.

Tabela 8 - Carbono orgânico total (COT), carbono orgânico particulado (COP), carbono orgânico associado aos minerais (COAM) e labilidade (LAB = (COP/COT)* 100), nas profundidades de 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm, em um Nitossolo Vermelho, em função do tipo de preparo do solo, na presença ou ausência de aplicação de calcário, na área de tráfego, Macatuba, SP, 2017

Tratamentos	COT	COP	COAM	LAB
	---------- (g kg^{-1}) ----------			%
---------- Camada de 0 a 20 cm ----------				
PP com	13,80 b	1,21 b	12,58 b	8,82 b
PP sem	12,86 c	0,90 c	11,95 b	7,09 c
PC com	13,60 bc	1,61 a	11,98 b	12,01 a
PC sem	14,77 a	1,26 b	13,50 a	8,65 b
---------- Camada de 20 a 40 cm ----------				
PP com	8,35 b	0,46 b	7,89 b	5,57 a
PP sem	8,32 b	0,46 b	7,86 b	5,54 a
PC com	9,66 a	0,59 a	9,06 a	6,18 a
PC sem	10,07 a	0,48 ab	9,58 a	4,84 a
---------- Camada de 40 a 60 cm ----------				
PP com	7,37 b	0,68 a	6,69 b	9,25 a
PP sem	7,47 b	0,59 a	6,87 b	7,98 ab
PC com	8,61 a	0,59 a	8,01 a	6,92 b
PC sem	8,49 a	0,59 a	7,89 a	6,95 b
---------- Camada de 60 a 80 cm ----------				
PP com	7,11 b	0,62 a	6,49 b	8,73 a
PP sem	7,43 ab	0,53 ab	6,89 ab	7,21 b
PC com	8,11 a	0,57 a	7,53 a	7,09 b
PC sem	6,96 b	0,42 b	6,54 b	6,08 b
---------- Camada de 80 a 100 cm ----------				
PP com	7,36 a	0,67 a	6,68 a	9,21 a
PM sem	7,50 a	0,44 c	7,05 a	5,98 c
PC com	7,16 a	0,57 ab	6,58 a	8,05 ab
PC sem	7,39 a	0,52 bc	6,87 a	7,06 bc

*Médias seguidas por letras distintas diferem estatisticamente pelo teste t ($p<0,05$) e comparam os manejos dentro de cada profundidade.

** PP com = Preparo Profundo em Faixa com haste Subsoladora e Enxada Rotativa, com aplicação de 10 Mg ha^{-1} de calcário apenas na faixa de preparo; PP sem = Preparo Profundo em Faixa com haste Subsoladora e Enxada Rotativa, sem aplicação de calcário; PC com = Preparo Convencional, com aplicação de 10 Mg ha^{-1} de calcário em área total; PC com = Preparo Convencional, sem aplicação de calcário em área total.

4.1.2 Biomassa microbiana

Na Tabela 9 observa-se que, o Cmic e o qMic apresentaram valores mais elevados no sistema de PC do solo, independentemente da aplicação de calcário, sendo em média 52 e 30% superiores aos valores encontrados em PP, respectivamente. O que

evidencia que a capacidade de imobilização de C pela biomassa microbiana foi inversamente proporcional à intensidade de manejo do solo.

Segundo revisão de Anderson e Domsch (1989) o qMic abrange amplo espectro, variando de 0,27 a 7,0%. Esse amplo espectro é devido, dentre outros, às diferenças de tipo e manejo do solo, visto que, a perturbação física causada pelo preparo do solo, provoca a quebra dos macroagregados e expõe o carbono protegido no interior deles aos processos microbianos, aumentando a decomposição da MOS (CAMBARDELLA e ELLIOTT, 1992). Porém, a magnitude das perdas de C devido às práticas de preparo do solo está muito relacionada com a intensidade do grau de perturbação atingida pelos implementos usados (LAL et al., 1995; BERNOUX et al., 2005), podendo ser este o motivo dos menores valores de Cmic e qMic no PP, onde houve um revolvimento mais excessivo e profundo do solo.

Porém, cabe ressaltar que um solo equilibrado em termos de qMic deve apresentar essa relação em torno de 2 a 5 % (GAMA-RODRIGUES; GAMA-RODRIGUES, 2008), o que não foi observado em nenhum dos tratamentos do presente estudo. Indicando que pode estar havendo algum problema físico e/ou químico do solo, ou ainda algum problema relacionado ao manejo do solo.

A respiração basal do solo (RESP) e o quociente metabólico (qCO_2) apresentaram comportamento inverso aos observados no Cmic e no qMic, sendo, neste caso, o PP do solo o sistema que apresentou os maiores valores, independentemente da aplicação de calcário (Tabela 9). Demonstrando mais uma vez que, onde houve um manejo mais intenso do solo, houve um aumento no qCO_2, apresentando uma biomassa microbiana menos eficiente na utilização dos compostos orgânicos, liberando mais C na forma de CO_2 e incorporando menos C aos tecidos microbianos. A RESP é a mensuração da atividade microbiológica do solo onde os micro-organismos degradam os compostos orgânicos à CO_2 (SILVA et al., 2013) e junto com o quociente metabólico expressam a eficiência de diferentes sistemas de manejo. Os estados fisiológicos das células microbianas influenciam na RESP, assim como a umidade, temperatura, a estrutura do solo, textura, quantidade de matéria orgânica dentre outros (SILVA et al., 2010).

Maiores valores de qCO_2 indicam que os micro-organismos do solo em condições de estresse consomem mais carbono oxidável para sua manutenção (PARTELLI et al., 2012). Isto tem implicações práticas importantes na agricultura, pois se mais C é respirado, maior quantidade de C pode estar sendo liberado do solo, acarretando

diminuição dos teores de C no solo (INSAM et al., 1991), conforme pode ser observado na Tabela 7. Assim como foi constatado neste trabalho, Insan et al. (1991) também observaram uma relação inversa entre a biomassa microbiana e o quociente metabólico, sugerindo que, em maiores teores de C, podem ocorrer aumento da biomassa microbiana e diminuição na atividade metabólica.

Com intuito de verificar o estado metabólico das comunidades de micro-organismos do solo, e assim obter indicações sobre os níveis de atividade dessas comunidades, foi avaliado a atividade da enzima desidrogenase. Devido à grande sensibilidade desta enzima em responder à alterações ocorridas no solo, diversos estudos tem utilizado a atividade da desidrogenase para verificar o efeito da adoção de diferentes práticas agrícolas sobre a biota do solo (CHU, et al., 2007; MOLERO et al., 2009).

No presente estudo observou-se que os resultados obtidos para a atividade da enzima desidrogenase foram os mesmos observados para o Cmic e qMic (Tabela 9). Segundo Krämer; Green (2000), as enzimas no solo são produzidas a partir de micro-organismos, e, geralmente, a multiplicação do número de micro-organismos implica em maior atividade enzimática. Este acréscimo em número de micro-organismos está relacionado ao ganho nos teores de carbono orgânico do solo, como também foi verificado por Böhme e Böhme (2006), corroborando os resultados observados para COT na Tabela 7.

Tabela 9 - Carbono da biomassa microbiana (Cmic), quociente microbiano (qMIC), quociente metabólico (qCO_2), respiração basal do solo (RESP) e desidrogenase, na profundidade de 0-20 cm, em função dos tipos de preparo do solo e aplicação de calcário, em um Nitossolo Vermelho e probabilidade de F

Tratamentos	*Cmic	qMIC	RESP	qCO_2	Desidrogenase
PP com	88,31 c	0,77 b	3,97 a	0,45 a	6,54 d
PP sem	93,57 c	0,88 b	3,71 a	0,39 a	7,97 c
PC com	124,34 b	1,10 a	2,73 b	0,22 b	8,75 b
PC sem	151,91 a	1,05 a	2,11 c	0,14 c	10,42 a
Pr > Fc	0,0001	0,0020	0,0001	0,0001	0,0001
CV%	7,81	9,66	11,15	14,94	4,57

*Unidades**:** Cmic = mg kg^{-1}; qMic = %; RESP = mg C-CO_2 kg^{-1} dia^{-1}; qCO_2 = mg C-CO_2 g^{-1} $Cmic^{-1}$ h^{-1}; Desidrogenase = ug TTF g^{-1} $24h^{-1}$.

**Médias seguidas de letras distintas na coluna diferem estatisticamente pelo teste t ($p<0,05$).

*** PC sem = Preparo Convencional, sem aplicação de calcário em área total; PC com = Preparo Convencional, com aplicação de 10 Mg ha^{-1} de calcário em área total; PP sem = Preparo Profundo em Faixa com haste Subsoladora e Enxada Rotativa, sem aplicação de calcário; PP com = Preparo Profundo em Faixa com haste Subsoladora e Enxada Rotativa, com aplicação de 10 Mg ha^{-1} de calcário apenas na faixa de preparo.

Cabe ressaltar que é possível que não tenha havido influência da calagem nos atributos microbiológicos do solo, devido a presença de pontes catiônicas entre as argilas silicatadas e os radicais orgânicos. Segundo Muneer e Oades (1989), esse é um mecanismo comum de estabilização da MOS, sendo o cálcio (Ca) destacado como um dos cátions de grande importância para o estabelecimento dessas pontes. Esses autores enfatizam que a calagem faz com que o Ca^{2+} seja o cátion predominante no complexo de troca, atuando como estabilizante físico da MOS porque permite melhor floculação das partículas, melhorando a agregação, e ela conduz a um aumento da condensação de minerais orgânicos, como resultado do contrabalanço das cargas negativas dos grupos funcionais da MOS. O que ainda segundo Paul e Clarck (1989), constitui uma proteção aos compostos orgânicos, dificultando a sua decomposição.

4.1.3 Atributos físicos do solo

4.1.3.1 Densidade do solo, macro e microporosidade e porosidade total do solo – canteiro

Em relação aos poros do solo, na camada mais superficial (0-20 cm), o tratamento PP sem aplicação de calcário aumentou a porosidade total do solo (Pt) em função do aumento promovido na macroporosidade (Macro). Comportamento inverso foi observado na microporosidade (Micro), sendo reduzida onde houve aumento da Macro (Tabela 10), sendo esse um resultado comumente obtido no processo de descompactação do solo. Apesar dos solos argilosos apresentarem elevada Pt, essa porosidade é composta principalmente por microporos, sendo o volume de macroporos normalmente deficitário, acarretando problemas de infiltração de água, trocas gasosas e redução do crescimento radicular (CINTRA et al., 1983). No presente estudo foi possível observar que no PP, os mecanismos ativos da enxada rotativa nos canteiros podem ter sido eficientes para o aumento da macroporosidade até a profundidade de 40 cm, pois deixa o solo mais pulverizado, diferindo dos canteiros do PC, os quais foram arados superficialmente. Segundo Lima et al. (2005), o manejo do solo com enxada rotativa promove alterações nos tipos de poros, o que interfere na qualidade do solo. A pulverização do solo pode ocasionar a movimentação de partículas finas do solo para camadas mais profundas do solo, podendo ocasionar o bloqueio de poros e redução da permeabilidade de sub-horizontes.

Cabe ressaltar que, em média, a proporção de macroporos em todos os tratamentos, encontra-se abaixo do limite crítico de 0,10 cm^3 cm^{-3}, preconizado para que não ocorra limitação na aeração do solo (JONG VAN LIER, 2010), o que pode afetar o adequado desenvolvimento da maioria das culturas, por restringir a difusão e as trocas gasosas. Souza et al. (2006), ao avaliar a micromorfologia do solo e sua relação com atributos físicos e hídricos, em um Latossolo Vermelho eutroférrico, verificaram que o cultivo intensivo da cultura de cana-de-açúcar reduz significativamente a porosidade do solo, com maior evidência na macroporosidade.

A medida que se aprofunda no perfil do solo, o efeito do preparo é menor e começa a se observar uma maior influência da aplicação do calcário em profundidade no PP. É provável que o efeito observado seja reflexo da melhor agregação proporcionada pela calagem.

Em relação a densidade do solo (Ds), observou-se que os diferentes manejos influenciaram somente até 40 cm de profundidade, onde em média, os menores valores foram encontrados no PP (Tabela 10). Esses resultados demonstram que os mecanismos de afrouxamento da estrutura do solo da enxada rotativa no PP foram mais eficientes para a redução da Ds, do que as grades aradoras do PC. Esses dados corroboram Spera et al. (2004), os quais afirmam que quanto maior o valor de porosidade total na camada superficial, menor é a densidade do solo. E em camadas mais profundas do perfil do solo as densidades do solo tendem a reduzir, uma vez que os efeitos da compactação do solo são mais superficiais, havendo assim um menor efeito dos tratamentos, tornando as médias das Ds semelhantes nos dois tipos de preparo.

Outro fator que influencia na densidade do solo é a MOS (OADES, 1984; CERRI et al., 1991). Observou-se no presente estudo que até a profundidade de 40 cm, em média, onde houve os menores conteúdos de COT as Ds foram maiores (Tabelas 7 e 10). O acúmulo de MO pode estar associado a dois efeitos contraditórios sobre a resistência do solo, que são o aumento da força de ligação entre as partículas minerais e a mudança no arranjo das partículas (porosidade e densidade do solo) (EKWUE, 1990; HORN e LEBERT, 1994; ZHANG, 1994; TRANNIN et al., 2008). O balanço entre esses dois efeitos que, por sua vez, depende da origem, do estado de decomposição e do status químico da MO, irá determinar o efeito sobre a resistência do solo. De fato, a MO pode aumentar ou reduzir a resistência do solo, dependendo do seu efeito conjunto sobre a densidade, os parâmetros de cisalhamento, a tensão capilar e o grau

de saturação de água (ZHANG et al., 1997). Quando predominam os efeitos de redução da densidade por aumento da porosidade, a resistência à compactação diminui.

Tabela 10 - Porosidade total (Pt), microporosidade (Micro), macroporosidade (Macro), densidade do solo (Ds), agregados maiores que 2 mm (Ag > 2), diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG) e índice de estabilidade de agregados (IEA), em um Nitossolo Vermelho, em função do tipo de preparo do solo, na presença ou ausência de aplicação de calcário, em coletas no canteiro de cana-de-açúcar, Macatuba, SP, 2017

Tratamentos	Pt	Micro	Macro	Ds	Ag>2	DMP	DMG	IEA
	---------- (cm^3 cm^{-3}) ----------			($g\ cm^{-3}$)	($kg\ kg^{-1}$)	------- (mm) -------		(%)
---------- Camada de 0 a 20 cm ----------								
PP com	0,43 ab	0,35 a	0,08 b	1,53 ab	0,69 ab	3,68 a	2,47 a	89,8 a
PP sem	0,44 a	0,30 b	0,13 a	1,39 c	0,61 b	3,33 a	1,95 b	90,6 a
PC com	0,40 b	0,36 a	0,04 c	1,59 a	0,47 c	2,76 b	1,58 b	91,2 a
PC sem	0,43 ab	0,35 a	0,08 b	1,44 bc	0,71 a	3,81 a	2,72 a	91,1 a
---------- Camada de 20 a 40 cm ----------								
PP com	0,44 a	0,33 b	0,10 a	1,43 b	0,36 b	2,48 a	1,52 a	88,5 ab
PP sem	0,45 a	0,35 ab	0,10 a	1,40 b	0,40 ab	2,73 a	1,67 a	83,3 b
PC com	0,40 b	0,36 a	0,04 b	1,58 a	0,48 a	2,78 a	0,90 b	89,4 a
PC sem	0,39 b	0,36 a	0,03 b	1,53 ab	0,48 a	2,78 a	1,53 a	87,7 ab
---------- Camada de 40 a 60 cm ----------								
PP com	0,44 a	0,38 a	0,05 a	1,45 a	0,35 b	2,21 ab	1,15 b	84,4 ab
PP sem	0,44 a	0,39 a	0,05 a	1,40 a	0,44 a	2,68 a	1,58 a	89,8 a
PC com	0,45 a	0,39 a	0,05 a	1,43 a	0,37 ab	2,36 ab	1,07 b	87,6 a
PC sem	0,44 a	0,38 a	0,06 a	1,43 a	0,32 b	2,07 b	1,00 b	80,8 b
---------- Camada de 60 a 80 cm ----------								
PP com	048 a	0,36 b	0,12 a	1,26 a	0,23 a	1,63 a	0,58 a	72,5 b
PP sem	0,47 a	0,39 a	0,07 b	1,39 a	0,26 a	1,72 a	0,76 ab	76,2 b
PC com	0,46 a	0,39 a	0,07 b	1,39 a	0,30 a	1,99 a	1,00 a	83,8 a
PC sem	0,46 a	0,37 ab	0,08 b	1,34 a	0,29 a	1,55 a	0,73 ab	836 a
---------- Camada de 80 a 100 cm ----------								
PP com	0,50 a	0,38 a	0,12 a	1,30 a	0,12 b	1,04 b	0,47 a	69,0 b
PP sem	0,48 ab	0,39 a	0,08 b	1,33 a	0,20 ab	1,38 ab	0,45 a	70,3 b
PC com	0,48 ab	0,38 a	0,10 ab	1,32 a	0,26 a	1,75 a	0,84 a	78,4 a
PC sem	0,47 b	0,37 a	0,09 ab	1,28 a	0,23 a	1,61 a	0,73 a	77,3 a

*Médias seguidas por letras distintas diferem estatisticamente pelo teste t ($p<0,05$) e comparam os manejos dentro de cada profundidade.

** PP com = Preparo Profundo em Faixa com haste Subsoladora e Enxada Rotativa, com aplicação de 10 Mg ha^{-1} de calcário apenas na faixa de preparo; PP sem = Preparo Profundo em Faixa com haste Subsoladora e Enxada Rotativa, sem aplicação de calcário; PC com = Preparo Convencional, com aplicação de 10 Mg ha^{-1} de calcário em área total; PC com = Preparo Convencional, sem aplicação de calcário em área total.

Observou-se também que até 40 cm de profundidade alguns tratamentos apresentaram valores de Ds superiores a 1,45 g cm^{-3} (Tabela 10), o que segundo Fernandes et al. (1983), pode dificultar as raízes de encontrar condições adequadas de suprir a demanda da planta por nutrientes e água. Costa et al. (2007) também encontraram densidades do solo desfavorável ao crescimento radicular de cana-de-açúcar na camada superficial de um Nitossolo Vermelho eutroférrico (1,47 g cm^{-3}). Porém, segundo Klein (2006), é importante destacar que os efeitos das alterações na estrutura do solo sobre as culturas são difíceis de serem mensurados, pois mesmo com aumento da Ds as culturas mantêm rendimento aceitáveis. Muitas vezes este efeito é resultante da redistribuição de poros do solo proporcionados pelos mecanismos de preparo do solo e ou das condições meteorológicas que permitem ou não quantidades adequadas de água no solo no momento necessário para as culturas.

Os efeitos do preparo de solo e da aplicação de calcário sobre a agregação do solo foram inconsistentes. A quantidade de agregados maiores que 2 mm (Ag>2), o diâmetro médio ponderado (DMP) e o diâmetro médio geométrico (DMG) reduziram no PC com aplicação de calcário, na camada mais superficial do solo (Tabela 10). Segundo Seta e Karathanasis (1996), a aplicação da corretivos de acidez pode promover prejuízos à estabilidade de agregados e a outros atributos físicos do solo, por modificar a composição química da solução do solo. As alterações no pH, na força iônica da solução e nos tipos de íons presentes podem causar tanto a dispersão como a floculação dos coloides, com consequências diretas na agregação das partículas do solo. Possivelmente esse efeito dispersante foi mais evidente no PC, pois nesse preparo toda a dose de calcário foi aplicada na superfície do solo e posteriormente incorporada, enquanto no PP ¾ da dose foram aplicadas na superfície e ¼ em profundidade.

Com relação ao IEA, ainda que não tenha sido observada diferença estatística em todas as profundidades analisadas, em média, o PC, independente da aplicação de calcário, foi o preparo que proporcionou os maiores valores de IEA (Tabela 10). O que pode ter sido fortemente influenciado pelo menor grau de perturbação do solo, pelo nível de adição de raízes e raízes da biomassa vegetal ao solo e pelo conteúdo de CO nesses tratamentos.

Era esperado que o PP do solo desagregasse mais o solo, devido os mecanismo de afrouxamento da enxada rotativa, porém isso só foi observado abaixo de 80 cm de

profundidade. É possível que, como as avaliações foram realizadas dois anos após o preparo do solo e por se tratar de um solo argiloso, já tenha havido tempo desse solo se reestruturar, e por isso os efeitos não foram tão visíveis.

4.1.3.2 Densidade do solo, macro e microporosidade e porosidade total do solo – tráfego

Em relação a porosidade do solo na linha de tráfego, não foi possível detectar se houve ou não influencia da aplicação de calcário, uma vez que os resultados foram inconsistentes. Nota-se que, na camada mais superficial do solo (0-20 cm), não houve influência dos manejos nos poros, porém nas camadas de 20-40 e 40-60 cm, o PC com aplicação de calcário foi o manejo que proporcionou aumento da Pt do solo e da Macro (Tabela 11). Com o rompimento da camada compactada, pode ocorrer uma melhora na infiltração de água e percolação de íons no perfil, o que alterará os processos de dispersão e floculação do solo. Possivelmente até 40 cm de profundidade, os melhores resultados de física e estruturação do solo observados no PC com aplicação de calcário, são devido a ação do preparo e sua descompactação, já os efeitos abaixo dessa camada precisam ser melhores estudados.

Na camada de 60-80 cm de profundidade, observou-se que o PP com aplicação de calcário reduziu a Pt e também a Micro (Tabela 11). A redução da Pt no PP do solo deve-se possivelmente ao intenso tráfego das máquinas para o preparo dos canteiros aliado ao não revolvimento do solo na zona de tráfego, o que provavelmente causou entupimento dos poros maiores pelas partículas finas de solo e, consequentemente resultou em maior compactação. Stone e Silveira (2001) observaram resultados semelhantes em solo sob plantio direto, em que o tráfego de máquinas somado ao não revolvimento do solo resultaram em aumento da densidade do solo e redução da Pt.

Tabela 11 - Porosidade total (Pt), microporosidade (Micro), macroporosidade (Macro), densidade do solo (Ds), agregados maiores que 2 mm (Ag > 2), diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG) e índice de estabilidade de agregados (IEA), nas profundidades de 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm, em um Nitossolo Vermelho, em função do tipo de preparo do solo, na presença ou ausência de aplicação de calcário, em coletas na área de tráfego, Macatuba, SP, 2017

Tratamentos	Pt	Micro	Macro	Ds	Ag>2	DMP	DMG	IEA
	---------- (cm^3 cm^{-3}) ----------			($g\ cm^{-3}$)	($kg\ kg^{-1}$)	------- (mm) -------		(%)
---------- Camada de 0 a 20 cm ----------								
PP com	0,36 a	0,35 a	0,01 a	1,79 a	0,29 c	1,95 c	1,06 b	85,8 b
PP sem	0,36 a	0,34 a	0,02 a	1,64 b	0,49 b	2,78 b	1,46 a	86,4 b
PC com	0,39 a	0,36 a	0,03 a	1,61 b	0,59 a	3,24 a	1,61 a	91,9 a
PC sem	0,38 a	0,35 a	0,02 a	1,70 ab	0,46 b	2,70 b	1,52 a	87,6 ab
---------- Camada de 20 a 40 cm ----------								
PP com	0,41 b	0,36 a	0,04 ab	1,68 a	0,31 b	2,01 b	1,01 c	84,7 b
PP sem	0,36 c	0,35 a	0,01 b	1,58 ab	0,41 a	2,62 a	1,50 ab	89,8 ab
PC com	0,44 a	0,37 a	0,07 a	1,46 b	0,48 a	2,82 a	1,72 a	94,4 a
PC sem	0,40 bc	0,37 a	0,02 b	1,65 a	0,41 a	2,47 a	1,33 bc	90,2 ab
---------- Camada de 40 a 60 cm ----------								
PP com	0,43 b	0,38 ab	0,05 b	1,41 a	0,26 b	1,86 a	0,98 a	85,7 a
PP sem	0,46 ab	0,39 a	0,06 b	1,40 a	0,28 ab	2,00 a	0,92 a	84,2 ab
PC com	0,48 a	0,38 ab	0,10 a	1,37 a	0,33 a	2,19 a	1,11 a	86,0 a
PC sem	0,38 c	0,35 b	0,03 b	1,44 a	0,21 b	1,40 b	0,81 a	79,4 b
---------- Camada de 60 a 80 cm ----------								
PP com	0,43 b	0,33 b	0,09 a	1,33 a	0,28 b	1,84 b	0,86 ab	83,3 ab
PP sem	0,48 a	0,38 a	0,09 a	1,32 a	0,23 b	1,63 b	0,73 b	78,9 bc
PC com	0,47 a	0,38 a	0,08 a	1,36 a	0,27 b	1,89 b	0,82 b	74,0 c
PC sem	0,45 ab	0,35 ab	0,09 a	1,31 a	0,36 a	2,26 a	1,19 a	86,1 a
---------- Camada de 80 a 100 cm ----------								
PP com	0,46 b	0,37 a	0,09 ab	1,31 a	0,30 a	1,97 a	0,96 a	79,7 a
PP sem	0,48 ab	0,36 a	0,11 a	1,32 a	0,31 a	2,00 a	0,71 a	80,9 a
PC com	0,50 a	0,39 a	0,11 a	1,31 a	0,30 a	1,94 a	0,91 a	79,5 a
PC sem	0,42 c	0,36 a	0,06 b	1,32 a	0,30 a	1,89 a	1,00 a	83,2 a

*Médias seguidas por letras distintas diferem estatisticamente pelo teste t ($p<0,05$) e comparam os manejos dentro de cada profundidade.

** PP com = Preparo Profundo em Faixa com haste Subsoladora e Enxada Rotativa, com aplicação de 10 Mg ha^{-1} de calcário apenas na faixa de preparo; PP sem = Preparo Profundo em Faixa com haste Subsoladora e Enxada Rotativa, sem aplicação de calcário; PC com = Preparo Convencional, com aplicação de 10 Mg ha^{-1} de calcário em área total; PC com = Preparo Convencional, sem aplicação de calcário em área total.

Ainda que o objetivo do trabalho não tenha sido comparar a área de canteiro com a zona de tráfego, observou-se que houve uma redução da Pt e da Macro nas zonas

de tráfego, independentemente do tipo de preparo do solo. Isso se deve, possivelmente, ao empacotamento das partículas do solo ocasionada pela compressão do solo em virtude do tráfego das máquinas. Dexter (2004a) afirma que a porosidade é alterada com a degradação da estrutura do solo, o que ocasiona redução do volume de macroporos e mudanças na continuidade e distribuição de poros. De acordo com Severiano et al. (2010), a cana-de-açúcar é uma das culturas mais afetadas pela alteração das condições físicas do solo, uma vez que, em decorrência do tráfego agrícola, a compactação pode promover reduções superiores a 50% no volume de macroporos do solo, comprometendo a sustentabilidade da atividade agrícola, pois essa classe de poros determina a taxa de movimentação de água no perfil.

Assim como no canteiro da cultura, na área de tráfego, a Ds só foi afetada pelo manejo do solo até 40 cm de profundidade, sendo os maiores valores observados no PP com aplicação de calcário (Tabela 11). Observou-se também que na camada mais superficial do solo houve um aumento da densidade, com densidades superiores a 1,45 g cm^{-3}, o que pode prejudicar à brotação das soqueiras, comprometendo a penetração das raízes nessa camada. Possivelmente, o maior adensamento da camada superficial do solo impediu a transmissão das pressões de contato dos rodados agrícolas às camadas inferiores, minimizando as alterações em profundidade.

Observou-se que até 60 cm de profundidade o PC com aplicação de calcário foi o manejo que apresentou maiores valores de agre>2mm, DMG, DMP e IEA (Tabela 11). Esse efeito pode ser atribuído ao maior desenvolvimento radicular, que promove aumento da pressão mecânica e o enovelamento das partículas organominerais, contribuindo para a manutenção da estabilidade de agregados e compensando o efeito dispersante desses corretivos.

4.1.3.3 Resistência do solo à penetração

Em relação a resistência do solo à penetração, nas distâncias correspondentes ao canteiro da cultura (D0, D15, D30 e D45), observou-se que até 40 cm de profundidade, o PP, independentemente da aplicação de calcário, apresentou menores valores de resistência à penetração do que o PC do solo (Tabela 12). Nota-se que até a

profundidade de 40 cm os canteiros do PP não possuem restrições ao crescimento radicular, com RP máxima equivalente a 1,93 MPa. Possivelmente, os mecanismos da enxada rotativa aliados ao subsolador profundo romperam a estrutura do solo e diminuíram os impedimentos físicos ao desenvolvimento da cultura por reduzir a densidade do solo, aumentar macroporosidade (Tabela 10) e, por conseguinte, minimizar a RP. Tomaz (2013) também observaram resistência do solo à penetração não impeditiva (abaixo de 2 MPa) ao desenvolvimento radicular em preparo profundo do solo na cultura da cana-de-açúcar.

Em contrapartida, em algumas distâncias, o PC apresentou impedimentos físicos à penetração das raízes já nos primeiros 20 cm do solo. Possivelmente a aplicação de cargas sobre o solo após o seu afrouxamento pelo preparo com grades para o cultivo aumentou a compactação do solo. A pressão externa sobre o solo imposta por veículos agrícolas nas atividades de cultivo tem sido enfatizada na literatura como a principal causa da compactação (SOANE et al., 1981; MARSILI et al.,1998).

Já nas distâncias correspondentes a área de tráfego (D60 a D120), local com maior movimentação dos veículos agrícolas, os valores de resistência à penetração foram superiores aos do canteiro (Tabela 12), o que é coerente com o maior tráfego de máquinas e a maior densidade do solo (Tabela 11), e corrobora estudos de Streck et al. (2004). Silva e Cabeda (2006a), também associaram o aumento do grau de compactação nas áreas com cana-de-açúcar ao tráfego de máquinas agrícolas nas atividades de cultivo.

Porém ao se analisar os efeitos do preparo de solo e da aplicação de calcário, nota-se que os resultados foram inconsistentes.

Foi possível observar, no entanto, que na área de tráfego, ambos os preparos permaneceram com condições inadequadas à penetração das raízes de cana-de-açúcar. Sendo assim, espera-se menor desenvolvimento radicular nessa zona, visto que o trânsito agrícola está depauperando a estrutura do solo. Alguns trabalhos mostraram efeitos da compactação do solo pelo tráfego de máquinas nas linhas de cana, interferindo no crescimento radicular, uma vez que essas não encontram boas condições para suprir a parte aérea das plantas com níveis satisfatórios de nutrientes (VASCONCELOS, 2002; FARONI, 2004).

Tabela 12 - Resistência do solo à penetração nas distâncias 0 (D0), 15 (D15), 30 (D30), 45 (D45), 60 (D60), 75 (D75), 90 (D90), 105 (D105) e 120 (D120) cm do centro da linha da cultura, em um Nitossolo Vermelho, em função do tipo de preparo do solo, na presença ou ausência de aplicação de calcário, Macatuba, SP, 2017

Tratamentos	D0	D15	D30	D45	D60	D75	D90	D105	D120
					RP (MPa)				
Prof 0-20 cm									
PP com	0,63 c	0,56 c	0,61 b	0,82 a	1,55 a	2,12 ab	2,58 b	2,65 a	2,21bc
PP sem	0,63 c	0,56 c	0,69 b	0,80 a	1,63 a	2,51 a	2,79 ab	2,79 a	2,98 a
PC com	2,44 a	1,64 b	0,85 ab	0,58 a	1,69 a	1,76 b	2,50 b	2,25 a	1,97 c
PC sem	1,09 b	2,12 a	1,14 a	0,77 a	1,63 a	1,75 b	3,39 a	2,81 a	2,79 ab
Prof 20-40 cm									
PP com	1,16 c	1,15 c	1,55 b	1,67 c	2,50 b	3,99 a	4,15 a	3,11 bc	3,56 a
PP sem	0,96 c	1,29 c	1,28 b	1,93 bc	3,01 ab	3,53 ab	3,15 b	3,78 ab	3,61 a
PC com	3,06 a	3,36 a	2,42 a	2,17 ab	2,65 b	3,30 b	3,69 ab	3,04 c	3,48 a
PC sem	2,08 b	2,93 b	2,51 a	2,46 a	3,21 a	2,30 c	3,70 ab	4,24 a	3,29 a
Prof 40-60 cm									
PP com	1,11 c	1,66 b	1,52 b	2,50 a	2,94 ab	2,95 a	4,37 a	2,75 a	3,20 a
PP sem	1,22 c	1,63 b	2,02 a	1,94 b	3,15 a	2,77 a	2,79 c	3,32 a	3,10 ab
PC com	3,01 a	2,56 a	2,36 a	2,57 a	2,68 ab	2,62 a	3,51 b	2,70 a	3,23 a
PC sem	2,70 b	2,56 a	2,36 a	2,46 a	2,59 b	2,50 a	2,79 c	2,76 a	2,55 b
Prof 60-80 cm									
PP com	2,37 b	2,74 a	2,70 b	2,53 ab	3,30 a	2,86 a	3,55 a	3,02 a	3,64 b
PP sem	1,73 c	2,82 a	2,66 b	2,83 a	2,65 b	3,18 a	2,43 b	2,78 a	2,85 c
PC com	3,09 a	2,82 a	3,62 a	2,82 a	2,72 b	3,15 a	2,99 ab	3,25 a	4,84 a
PC sem	2,22 b	2,47 a	2,68 b	2,41 b	2,62 b	3,15 a	3,11 a	3,14 a	2,42 c

*Médias seguidas por letras distintas diferem estatisticamente pelo teste t ($p<0,05$) e comparam os manejos dentro de cada profundidade.

**D0 = centro do canteiro de cana-de-açúcar; D15 = 15 cm do ponto 0, D30 = 30 cm do ponto 0; D45 = 45 cm do ponto 0; D60 = 60 cm do ponto 0; D75 = 75 cm do ponto 0; D90 = 90 cm do ponto 0; D105 = 105 cm do ponto 0 e D120 = 120 cm do ponto 0 (no centro na área de tráfego).

*** PP com = Preparo Profundo em Faixa com haste Subsoladora e Enxada Rotativa, com aplicação de 10 Mg ha^{-1} de calcário apenas na faixa de preparo; PP sem = Preparo Profundo em Faixa com haste Subsoladora e Enxada Rotativa, sem aplicação de calcário; PC com = Preparo Convencional, com aplicação de 10 Mg ha^{-1} de calcário em área total; PC com = Preparo Convencional, sem aplicação de calcário em área total.

4.1.4 Produtividade de colmos

Quanto a produtividade de colmos (TCH) observou-se que tanto na primeira quanto na segunda colheita, os manejos com aplicação de calcário, independentemente do tipo de preparo do solo, foram os que apresentaram os maiores valores de produtividade, sendo em média 23 e 15% superior ao manejo sem

calagem, na primeira e na segunda colheita respectivamente (Tabela 13). Observou-se também que em todos os tratamentos, houve decréscimo da cana planta para a cana soca, que no caso é considerada normal, pelo fato do gasto de energia ocasionado na rebrota.

As produtividades de colmos não apresentaram diferença estatística entre os diferentes preparos do solo mesmo sendo constatada uma melhora na qualidade física do solo no preparo profundo do solo, dada pela redução da densidade e aumento da macroporosidade até 40 cm de profundidade (Tabela 10). Segundo Moraes et al. (2016), normalmente em trabalhos com preparos de solo na cultura da cana-de-açúcar não são detectadas diferenças entre os tratamentos para produtividade, como por exemplo em Tavares et al. (2010) e Paulino et al. (2004), devido ao regime hídrico. Embora no presente estudo a cultura tenha passado por momentos de estresse hídrico (Figura 2), é possível que o preparo profundo não tenha se destacado com maiores produtividades, devido a incorporação do calcário em ambos os tratamentos, o que pode ter favorecido o crescimento das raízes em profundidade, uma vez que a disponibilidade de cálcio interfere na distribuição do sistema radicular, atuando como sinal no processo de gravitropismo (POOVAIAH et al. 2002). Para Quaggio et al.(1993), o calcário, quando bem incorporado ao solo, pode melhorar rapidamente também as camadas do subsolo, com efeito duradouro.

Segundo Prado et al. (2002), as respostas positivas da cana planta e da cana soca ao calcário estão diretamente atreladas às alterações na disponibilidade dos nutrientes no solo em decorrência da correção. Em pesquisa realizada por Prado et al. (2002), utilizando calcário e escória da siderurgia como materiais para correção do solo, os pesquisadores verificaram que na medida em que as doses de calcário e de escória eram aumentadas, as plantas de cana planta e cana soca respondiam de forma positiva com incremento de produção, ressaltando-se que não havia diferenças entre os tipos de materiais corretivos.

Estudando os efeitos da calagem e da adubação potássica na cultura da cana-de-açúcar, em diversos locais do estado de São Paulo, Rosseto et al. (2004) também reportaram que houve respostas da cultura à calagem.

Tabela 13 - Produtividade de colmos da primeira (TCH/16) e da segunda colheita (TCH/17) em função dos tipos de preparo do solo e aplicação de calcário, em um Nitossolo Vermelho e probabilidade de F

Tratamentos	TCH/16	TCH/17
	---------- (Mg ha^{-1}) ----------	
PP com	133,09 a	119,22 a
PP sem	107,48 b	103,50 b
PC com	128,13 a	117,40 a
PC sem	103,80 b	102,21 b
Pr > Fc	0,0021	0,0025
CV%	7,37	4,94

*Médias seguidas por letras distintas diferem estatisticamente pelo teste t (p<0,05) e comparam os manejos dentro de cada profundidade.
** PP com = Preparo Profundo em Faixa com haste Subsoladora e Enxada Rotativa, com aplicação de 10 Mg ha^{-1} de calcário apenas na faixa de preparo; PP sem = Preparo Profundo em Faixa com haste Subsoladora e Enxada Rotativa, sem aplicação de calcário; PC com = Preparo Convencional, com aplicação de 10 Mg ha^{-1} de calcário em área total; PC com = Preparo Convencional, sem aplicação de calcário em área total.

4.2 EXPERIMENTO 2 – LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO – TEXTURA FRANCO-ARENOSA

4.2.1 Fracionamento físico da MOS

4.2.1.1 – Canteiro

Dentre as variáveis analisadas, houve efeito dos tratamentos para COT até a profundidade de 40 cm, sendo os maiores teores observados no PC do solo. Na camada de 0-20 cm o maior teor foi no PC sem calagem (Tabela 14), observando-se redução do COT nos tratamentos com PP, como já mencionado no experimento 1, onde o revolvimento do solo foi mais intenso, resultando em aumento da mineralização e oxidação da MOS.

Na camada de 20-40 cm de profundidade o maior teor de COT foi observado no PC com calagem, porém nota-se que nos diferentes preparos do solo, onde houve a aplicação de calcário houve aumento dos teores de COT (Tabela 14). Evidenciando mais uma vez que a incorporação do calcário pode ter proporcionado melhores condições químicas do solo e consequentemente melhor desenvolvimento radicular, o que pode ter aumentado os teores de COT.

Cabe ressaltar que os baixos teores de COT encontrados (variando de 2,20 a 4,56 g kg^{-1}), podem estar relacionados com o elevado teor de areia desse solo, o que confere menor ligação dos compostos orgânicos com os constituintes coloidais

minerais, e, portanto, menor proteção física, facilitando sua decomposição microbiana (BAYER et al., 2000).

Observando os teores de COP, nota-se que a maior quantidade de C na fração particulada da MOS foi verificada na camada superficial, em todos os manejos. O PC, independente da aplicação de calcário, foi o preparo que proporcionou os maiores teores (Tabela 14). Como o COP é uma fração da MOS mais sensível ao manejo e que pode ser rapidamente decomposta, onde houve uma menor perturbação do solo, no caso do presente estudo no PC do solo, é onde se espera maiores teores. A maior sensibilidade da fração particulada da MOS, em comparação à fração associada aos minerais, em exibir os efeitos dos sistemas de manejo sobre a dinâmica do carbono no solo pode ser observada nos estoques de C nas frações da MOS. É desejável que o solo apresente quantidade adequada de COP, pois, assim, garante-se o fluxo de C para o solo e a manutenção da atividade biológica. Caso o solo não disponha de matéria orgânica lábil em quantidade suficiente para suprir suas necessidades, os processos de oxidação da MOS resultarão em redução do estoque de C, o que dá início ao processo de perda de qualidade e degradação do solo (SALTON et al., 2005).

Além disso, segundo Rossi et al. (2011), sistemas de manejo que proporcionam maior aporte de C aumentam os teores de COP, visto que grande parte deste compartimento é formado por partículas derivadas de resíduos de plantas. Sendo assim, os tratamentos que aportaram mais carbono e degradaram menos, foi onde houve aumento dessa fração, conforme observado no PC do solo (Tabela 14).

Em relação ao COAM, nota-se que os resultados observados para COT refletiram no COAM, onde este alterou de forma semelhante ao COT até a profundidade de 40 cm (Tabela 14). A maior parte do COT esteve ligada aos minerais, com valores de COAM entre 69 e 95%. Dessa forma, se existe elevada participação do COAM no COT, significa que na área pode estar ocorrendo grande estabilização do C e provavelmente diminuição da emissão de C. Contudo, é desejável que o solo apresente adequada quantidade de COP, pois desta forma estará garantindo fluxo de C para o solo e assim mantendo sua atividade biológica.

Tabela 14 - Carbono orgânico total (COT), carbono orgânico particulado (COP), carbono orgânico associado aos minerais (COAM) e labilidade (LAB) nas profundidades 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm, em um Latossolo Vermelho-Amarelo, em função do tipo de preparo do solo, na presença ou ausência de aplicação de calcário, em coletas no canteiro de cana-de-açúcar, Borebi, SP, 2017

Tratamentos	COT	COP	COAM	LAB
	---------- (g kg^{-1}) ----------			(%)
---------- Camada de 0 a 20 cm ----------				
PP com	2,20 c	0,45 c	1,74 b	20,79 b
PP sem	2,76 b	0,60 b	2,15 b	21,87 b
PC com	2,55 bc	0,77 a	1,77 b	30,86 a
PC sem	4,56 a	0,81 a	3,74 a	18,02 b
---------- Camada de 20 a 40 cm ----------				
PP com	3,55 ab	0,24 a	3,30 ab	7,13 a
PP sem	3,35 bc	0,25 a	3,10 bc	7,28 a
PC com	3,93 a	0,22 a	3,70 a	5,82 a
PC sem	2,86 c	0,23 a	2,63 c	8,09 a
---------- Camada de 40 a 60 cm ----------				
PP com	3,26 a	0,20 a	3,06 a	6,07 a
PP sem	3,01 a	0,23 a	2,77 a	7,94 a
PC com	3,19 a	0,23 a	2,96 a	7,36 a
PC sem	3,33 a	0,19 a	3,14 a	5,86 a
---------- Camada de 60 a 80 cm ----------				
PP com	2,63 a	0,16 a	2,47 a	6,17 a
PP sem	2,86 a	0,22 a	2,63 a	8,07 a
PC com	3,01 a	0,14 a	2,86 a	4,78 a
PC sem	2,74 a	0,16 a	2,58 a	5,70 a
---------- Camada de 80 a 100 cm ----------				
PP com	2,53 a	0,12 a	2,41 a	4,52 a
PP sem	2,63 a	0,18 a	2,45 a	7,15 a
PC com	2,71 a	0,16 a	2,55 a	5,93 a
PC sem	2,41 a	0,17 a	2,23 a	7,62 a

*Médias seguidas por letras distintas diferem estatisticamente pelo teste t ($p<0,05$) e comparam os manejos dentro de cada profundidade.

** PP com = Preparo Profundo em Faixa com haste Subsoladora e Enxada Rotativa, com aplicação de 3 Mg ha^{-1} de calcário apenas na faixa de preparo; PP sem = Preparo Profundo em Faixa com haste Subsoladora e Enxada Rotativa, sem aplicação de calcário; PC com = Preparo Convencional, com aplicação de 3 Mg ha^{-1} de calcário em área total; PC com = Preparo Convencional, sem aplicação de calcário em área total.

Observou-se que na camada superficial (0-20 cm), a LAB do C no PC com aplicação de calcário, representou 30,86% do COT (Tabela 14). Os sistemas de manejo, ao aportarem diferentes quantidades de C ao solo, alteram a labilidade da MOS, ou seja, a proporção de MOS lábil em relação à não lábil. Sendo assim, onde

houve um maior aporte de C lábil e uma menor incorporação de C aos minerais, foi onde se observou a maior labilidade.

4.2.1.2 Área de tráfego

Analisando a zona de tráfego, na camada de 0-20 cm de profundidade, o PC com aplicação de calcário proporcionou o maior teor de COT (Tabela 15). Evidenciando mais uma vez que os efeitos da calagem, proporcionando melhores condições químicas no solo, melhorando o desenvolvimento radicular, podem ter se sobreposto o efeito negativo do preparo do solo, aumentando assim os teores de COT. Observa-se ainda que esse resultado refletiu diretamente no COAM, que alterou de forma semelhante ao COT. Mais uma vez nota-se que a maior parte do COT esteve ligada aos minerais (até 81%), evidenciando uma perda de MOS lábil na camada mais superficial, o que pode levar a redução no estoque de C no solo.

Já na camada de 20-40 cm observou-se que o PC, independentemente da calagem, reduziu os teores de COT, refletindo no COAM, que alterou de forma semelhante. Apesar do COAM ser uma fração que leva um maior tempo para ser alterada, com manejo mecânico do solo, associado a uma textura muito arenosa, essa alteração acaba sendo mais rápida, e possivelmente foi o que ocorreu no presente estudo. Como no PC a zona de tráfego foi preparada, o revolvimento do solo, ocasionou a redução da fração de C associada aos minerais, reduzindo consequentemente o COT.

O COP diferiu apenas na camada mais superficial (0-20 cm), sendo o maior valor observado no PC com calagem (Tabela 15). Possivelmente pelo fato do calcário ter proporcionado melhores condições para o crescimento radicular e pelo fato do manejo do solo ter proporcionado uma menor decomposição da MOS quando comparado aos demais tratamentos.

Em relação a labilidade, nota-se que esta variou de 4 a 34 % (Tabela 15), comprovando mais uma vez que a maior parte do COT esteve ligada aos minerais, o que evidencia estar havendo uma perda da MO mais lábil.

Tabela 15 - Carbono orgânico total (COT), carbono orgânico particulado (COP), carbono orgânico associado aos minerais (COAM) e labilidade (LAB) nas profundidades 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm, em um Latossolo Vermelho-Amarelo, em função do tipo de preparo do solo, na presença ou ausência de aplicação de calcário, em coletas na área de tráfego, Borebi, SP, 2017

Tratamentos	COT	COP	COAM	LAB
	---------- (g kg^{-1}) ----------			(%)
---------- Camada de 0 a 20 cm ----------				
PP com	3,05 c	0,98 b	2,07 b	34,64 a
PP sem	2,69 c	0,91 b	1,78 b	33,69 a
PC com	5,58 a	1,70 a	3,88 a	30,71 a
PC sem	5,01 b	0,94 b	4,06 a	18,90 b
---------- Camada de 20 a 40 cm ----------				
PP com	5,13 a	0,20 a	4,92 a	4,04 a
PP sem	4,69 a	0,32 a	4,37 a	6,81 a
PC com	3,37 b	0,25 a	3,11 b	7,53 a
PC sem	3,00 b	0,23 a	2,76 b	7,86 a
---------- Camada de 40 a 60 cm ----------				
PP com	2,93 a	0,21 a	2,71 a	7,49 a
PP sem	3,01 a	0,14 a	2,87 a	4,84 a
PC com	2,97 a	0,25 a	2,72 a	8,50 a
PC sem	3,13 a	0,22 a	2,91 a	7,01 a
---------- Camada de 60 a 80 cm ----------				
PP com	2,55 b	0,15 a	2,40 b	5,98 a
PP sem	2,66 ab	0,17 a	2,49 ab	6,87 a
PC com	2,37 b	0,18 a	2,18 b	7,84 a
PC sem	3,17 a	0,16 a	3,01 a	5,11 a
---------- Camada de 80 a 100 cm ----------				
PP com	2,41 a	0,21 a	2,20 a	8,77 a
PP sem	2,44 a	0,16 a	2,28 a	6,44 a
PC com	2,46 a	0,23 a	2,23 a	9,48 a
PC sem	2,49 a	0,14 a	2,35 a	5,89 a

*Médias seguidas por letras distintas diferem estatisticamente pelo teste t ($p<0,05$) e comparam os manejos dentro de cada profundidade.

** PP com = Preparo Profundo em Faixa com haste Subsoladora e Enxada Rotativa, com aplicação de 3 Mg ha^{-1} de calcário apenas na faixa de preparo; PP sem = Preparo Profundo em Faixa com haste Subsoladora e Enxada Rotativa, sem aplicação de calcário; PC com = Preparo Convencional, com aplicação de 3 Mg ha^{-1} de calcário em área total; PC com = Preparo Convencional, sem aplicação de calcário em área total.

4.2.2 Biomassa microbiana

Observa-se na Tabela 16 que o Cmic e o qMIC apresentaram valores mais elevados no sistema de PC do solo, e dentro desse sistema, nota-se que os maiores

valores foram onde não houve a aplicação de calcário no solo. Pelo fato dessa relação (Cmic/COT = qMIC) indicar a eficiência dos micro-organismos em imobilizar C em sua biomassa, mais uma vez fica evidente que a capacidade de imobilização de C pela biomassa microbiana do solo foi inversamente proporcional à intensidade de manejo do solo e que a aplicação de calcário pode ter elevado o pH do solo a uma faixa acima do pH ótimo para a atividade dos micro-organismos. Cabe ressaltar que segundo Gama-Rodrigues (2008) um solo é considerado equilibrado em termos de qMIC quando apresenta essa relação em torno de 2 a 5%, e no presente estudo, somente o tratamento com PP com aplicação de calcário apresentou valores inferior a 2%, sugerindo estar havendo algum problema físico e/ou químico do solo, ou ainda algum problema relacionado ao manejo do solo.

Tabela 16 - Carbono da biomassa microbiana (Cmic), quociente microbiano (qMIC), quociente metabólico (qCO_2), respiração basal do solo (RESP) e desidrogenase, na profundidade de 0-20 cm, em função dos tipos de preparo do solo e aplicação de calcário, em um Latossolo Vermelho-Amarelo e probabilidade de F

Tratamentos	*Cmic	qMIC	RESP	qCO_2	Desidrogenase
PP com	73,64 c	1,62 c	5,40 a	0,73 a	4,57 a
PP sem	89,41 bc	3,58 b	5,14 a	0,58 ab	4,64 a
PC com	95,73 b	3,48 b	4,70 a	0,49 b	3,69 c
PC sem	115,44 a	5,27 a	2,43 b	0,21 c	4,33 b
Pr > Fc	0,0030	0,0001	0,0001	0,0003	0,0001
CV%	11,61	17,86	11,11	19,44	2,71

*Unidades**:** Cmic = mg kg^{-1}; qMic = %; RESP = mg C-CO_2 kg^{-1} dia^{-1}; qCO_2 = mg C-CO_2 g^{-1} $Cmic^{-1}$ h^{-1}; Desidrogenase = ug TTF g^{-1} $24h^{-1}$.

**Médias seguidas de letras distintas na coluna diferem estatisticamente pelo teste t ($p<0,05$).

***PC sem = Preparo Convencional, sem aplicação de calcário em área total; PC com = Preparo Convencional, com aplicação de 3 Mg ha^{-1} de calcário em área total; PP sem = Preparo Profundo em Faixa com haste Subsoladora e Enxada Rotativa, sem aplicação de calcário; PP com = Preparo Profundo em Faixa com haste Subsoladora e Enxada Rotativa, com aplicação de 3 Mg ha^{-1} de calcário apenas na faixa de preparo.

A RESP, o qCO_2 e a enzima desidrogenase apresentaram comportamento inverso aos observados no Cmic e no qMIC, sendo o PP do solo o sistema que apresentou os maiores valores, independentemente da aplicação de calcário (Tabela 16). O que mais uma vez demonstrou que onde houve um manejo mais intenso do solo, foi onde houve aumento no qCO_2, com uma biomassa microbiana menos eficiente na utilização dos compostos orgânicos, liberando assim mais C na forma de CO_2 e incorporando menos C aos tecidos microbianos. Segundo Krämer; Green (2000) as enzimas no solo são

produzidas a partir de micro-organismos, e, geralmente, a multiplicação do número de micro-organismos implica em maior atividade enzimática.

4.2.3 Atributos físicos do solo

4.2.3.1 Densidade do solo, macro e microporosidade e porosidade total do solo – canteiro

Em relação aos poros do solo, só houve diferença estatística na camada de 20-40 cm de profundidade. Observou-se um aumento na Macro do solo no PP sem a aplicação de calcário, o que refletiu diretamente na Pt, que aumentou de forma semelhante e refletindo também na Ds, reduzindo-a (Tabela 17). Apesar de constatada diferença na camada de 20-40 cm, é possível que nas demais profundidades não tenha havido diferenças estatísticas devido a textura muito arenosa desse solo e o período entre o preparo do solo e a avaliação (após 2 anos), o que pode ter resultado numa menor persistência dos efeitos da mobilização do solo. Isso ocorre, em função do fenômeno da reconsolidação do solo, que pode advir em função de fenômenos naturais, como por exemplo, as chuvas, os ciclos de umedecimentos e secagem, ou por ações do tráfego de máquinas e implementos (BUSSCHER et al., 2002; REICHERT et al., 2007).

Sendo assim, cabe ressaltar que conforme os valores de densidade do solo mencionados por Humbert (1974) como restritivos ao crescimento de raízes de cana-de-açúcar, a elevada densidade do solo em todas as camadas, tanto no canteiro (Tabela 17) como na linha de tráfego (Tabela 18), pode causar deformação ou restrições na distribuição de raízes de cana-de-açúcar, sendo danos nas radicelas (Ds >1,25 g cm^{-3}), redução na quantidade de raízes e distorção das radicelas (Ds >1,36 g cm^{-3}) e comprometimento da penetração das raízes (Ds >1,46 g cm^{-3}).

Diferente de solos argilosos, nos solos arenosos se busca aumentar a microporosidade, possibilitando assim um maior armazenamento de água nesses solos. Porém, no presente estudo não foi observada diferença na quantidade de microporos entre os tratamentos em nenhuma das profundidades analisadas, corroborando Silva; Kay (1997) que relataram serem os microporos menos influenciados pelo manejo do solo do que os macroporos. Observou-se, no entanto, na camada de 20-40 cm de profundidade uma redução na Macro no PC, independente

da aplicação de calcário, indicando que os macroporos estavam mais sujeitos a mudanças impostas pelo manejo do que os microporos.

Tabela 17 - Porosidade total (Pt), microporosidade (Micro), macroporosidade (Macro), densidade do solo (Ds), agregados maiores que 2 mm (Ag > 2), diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG) e índice de estabilidade de agregados (IEA), nas profundidades de 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm, em um Latossolo Vermelho-Amarelo, em função do tipo de preparo do solo, na presença ou ausência de aplicação de calcário, em coletas no canteiro de cana-de-açúcar, Borebi, SP, 2017

Tratamentos	Pt	Micro	Macro	Ds	Ag>2	DMP	DMG	IEA
	---------- (cm^3 cm^{-3}) ----------			($g\ cm^{-3}$)	($kg\ kg^{-1}$)	------- (mm) -------		(%)
---------- Camada de 0 a 20 cm ----------								
PP com	0,40 a	0,20 a	0,20 a	1,50 a	0,32 a	1,85 a	0,71 b	67,20 a
PP sem	0,39 a	0,19 a	0,20 a	1,49 a	0,29 a	1,72 a	0,64 b	65,77 a
PC com	0,39 a	0,19 a	0,20 a	1,51 a	0,41 a	2,28 a	1,03 ab	70,18 a
PC sem	0,38 a	0,18 a	0,20 a	1,51 a	0,44 a	2,42 a	1,15 a	72,16 a
---------- Camada de 20 a 40 cm ----------								
PP com	0,36 ab	0,20 a	0,16 ab	1,54 ab	0,12 b	0,94 b	0,42 a	64,11 a
PP sem	0,38 a	0,20 a	0,17 a	1,47 b	0,10 b	0,81 b	0,34 a	54,06 a
PC com	0,35 ab	0,21 a	0,13 ab	1,58 ab	0,31 a	1,78 a	0,64 a	63,07 a
PC sem	0,33 b	0,21 a	0,12 b	1,64 a	0,23 ab	1,44 ab	0,56 a	62,46 a
---------- Camada de 40 a 60 cm ----------								
PP com	0,36 a	0,22 a	0,14 a	1,55 a	0,09 b	0,73 b	0,31 b	51,60 b
PP sem	0,37 a	0,22 a	0,14 a	1,56 a	0,14 ab	1,02 ab	0,40 ab	57,10 ab
PC com	0,36 a	0,22 a	0,14 a	1,52 a	0,30 a	1,77 a	0,75 a	65,17 a
PC sem	0,35 a	0,22 a	0,12 a	1,58 a	0,17 ab	1,17 ab	0,46 ab	63,49 ab
---------- Camada de 60 a 80 cm ----------								
PP com	0,35 a	0,23 a	0,11 a	1,53 a	0,12 a	0,90 a	0,35 a	53,49 a
PP sem	0,36 a	0,23 a	0,12 a	1,52 a	0,10 a	0,81 a	0,34 a	53,07 a
PC com	0,34 a	0,22 a	0,12 a	1,49 a	0,13 a	0,99 a	0,39 a	55,78 a
PC sem	0,36 a	0,22 a	0,13 a	1,50 a	0,12 a	0,92 a	0,40 a	60,66 a
---------- Camada de 80 a 100 cm ----------								
PP com	0,35 a	0,25 a	0,25 a	1,51 a	0,08 a	0,72 a	0,31 a	50,82 a
PP sem	0,37 a	0,26 a	0,26 a	1,48 a	0,10 a	0,82 a	0,34 a	54,60 a
PC com	0,36 a	0,25 a	0,25 a	1,50 a	0,09 a	0,74 a	0,31 a	50,63 a
PC sem	0,37 a	0,24 a	0,24 a	1,47 a	0,20 a	1,28 a	0,57 a	58,80 a

*Médias seguidas de letras distintas na coluna diferem estatisticamente pelo teste t ($p<0,05$).

**PC sem = Preparo Convencional, sem aplicação de calcário em área total; PC com = Preparo Convencional, com aplicação de 3 Mg ha^{-1} de calcário em área total; PP sem = Preparo Profundo em Faixa com haste Subsoladora e Enxada Rotativa, sem aplicação de calcário; PP com = Preparo Profundo em Faixa com haste Subsoladora e Enxada Rotativa, com aplicação de 3 Mg ha^{-1} de calcário apenas na faixa de preparo.

Conforme já era esperado, por ser um solo arenoso, a proporção de macroporos em todos os tratamentos encontra-se acima do limite crítico de 0,10 cm^3 cm^{-3}, preconizado para que não ocorra limitação na aeração do solo (JONG VAN LIER, 2010), embora esse valor limite dependa do tipo de planta e do nível de atividade biológica do solo (GUPTA et al., 1989), entre outros fatores.

Em relação a agregação do solo, na camada mais superficial do solo (0-20 cm) observou-se um aumento do diâmetro médio dos agregados no PC sem aplicação de calcário (Tabela 17). Possivelmente essa melhor agregação na camada mais superficial do solo é reflexo do maior conteúdo de COT nesse tratamento (Tabela 14). Muitos pesquisadores consideram a MOS como o principal agente de estabilização dos agregados do solo (TISDALL e OADES, 1982; CASTRO FILHO et al., 1998; GANG LU et al. 1998), sendo uma alta correlação entre essa e a agregação do solo um resultado esperado em tratamentos que apresentem diferenças no teor de carbono orgânico. Ainda que não tenha sido observada diferença estatística em todas as profundidades, observa-se que em média, até 60 cm de profundidade, o PC do solo apresentou valores mais elevados de Agre > 2mm, DMP, DMG e IEA do que no PP, independente da aplicação de calcário (Tabela 17). Possivelmente isso se deva ao fato de o PP, devido a presença da enxada rotativa, desagregar mais o solo do que no PC.

Com relação ao IEA, observou-se que ainda que não tenha sido observada diferença estatística em todas as profundidades analisadas, em média, o PC independente da aplicação de calcário foi o preparo que proporcionou os maiores valores de IEA (Tabela 17), o que pode ter sido fortemente influenciado pelo grau de perturbação do solo, pelo nível de adição de raízes e raízes da biomassa vegetal ao solo e pelo conteúdo de CO nesses tratamentos.

4.2.3.2 Densidade do solo, macro e microporosidade e porosidade total do solo – Área de tráfego

Analisando a porosidade do solo na zona de tráfego, observou-se que houve um aumento da Micro no PC, independentemente da aplicação de calcário, até a profundidade de 40 cm, refletindo de forma semelhante na Pt do solo (Tabela 18).

Tabela 18 - Porosidade total (Pt), microporosidade (Micro), macroporosidade (Macro), densidade do solo (Ds), agregados maiores que 2 mm (Ag > 2), diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG) e índice de estabilidade de agregados (IEA), nas profundidades de 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm, em um Latossolo Vermelho-Amarelo, em função do tipo de preparo do solo, na presença ou ausência de aplicação de calcário, em coletas na área de tráfego, Borebi, SP, 2017

Tratamentos	Pt	Micro	Macro	Ds	Ag>2	DMP	DMG	IEA
	---------- (cm^3 cm^{-3}) ----------			(g cm^{-3})	(kg kg^{-1})	------- (mm) -------		(%)
---------- Camada de 0 a 20 cm ----------								
PP com	0,30 b	0,23 b	0,06 ab	1,74 a	0,19 b	1,24 b	0,46 c	56,54 b
PP sem	0,30 b	0,21 b	0,08 a	1,72 a	0,40 a	2,24 a	0,88 bc	71,68 a
PC com	0,34 a	0,28 a	0,06 ab	1,71 a	0,52 a	2,80 a	1,49 a	79,54 a
PC sem	0,32 ab	0,28 a	0,04 b	1,72 a	0,50 a	2,67 a	1,28 ab	72,35 a
---------- Camada de 20 a 40 cm ----------								
PP com	0,30 b	0,21 bc	0,09 a	1,70 a	0,11 ab	0,84 ab	0,36 ab	53,13 b
PP sem	0,30 b	0,20 c	0,09 a	1,71 a	0,07 b	0,67 b	0,32 b	53,49 b
PC com	0,34 a	0,24 a	0,10 a	1,65 a	0,26 a	1,59 a	0,59 ab	64,17 a
PC sem	0,30 b	0,23 ab	0,06 a	1,74 a	0,27 a	1,60 a	0,86 a	63,80 a
---------- Camada de 40 a 60 cm ----------								
PP com	0,33 ab	0,23 a	0,09 ab	1,58 a	0,09 a	0,79 a	0,34 a	54,45 a
PP sem	0,33 ab	0,21 a	0,11 ab	1,55 a	0,06 a	0,64 a	0,30 a	51,90 a
PC com	0,35 a	0,22 a	0,12 a	1,56 a	0,21 a	1,34 a	0,50 a	60,30 a
PC sem	0,31 b	0,23 a	0,08 b	1,62 a	0,11 a	0,85 a	0,37 a	56,98 a
---------- Camada de 60 a 80 cm ----------								
PP com	0,35 a	0,23 a	0,12 a	1,50 a	0,11 a	0,87 a	0,34 a	51,82 a
PP sem	0,35 a	0,22 a	0,12 a	1,50 a	0,10 a	0,82 a	0,35 a	54,58 a
PC com	0,36 a	0,22 a	0,13 a	1,45 a	0,18 a	1,20 a	0,45 a	59,66 a
PC sem	0,34 a	0,24 a	0,10 a	1,53 a	0,12 a	0,89 a	0,37 a	56,90 a
---------- Camada de 80 a 100 cm ----------								
PP com	0,36 a	0,25 a	0,11 a	1,49 a	0,12 a	0,89 a	0,35 a	52,34 a
PP sem	0,36 a	0,21 b	0,14 a	1,45 a	0,08 a	0,73 a	0,33 a	55,19 a
PC com	0,35 a	0,24 a	0,10 a	1,49 a	0,13 a	0,99 a	0,38 a	57,03 a
PC sem	0,36 a	0,25 a	0,11 a	1,48 a	0,09 a	0,76 a	0,32 a	51,41 a

*Médias seguidas de letras distintas na coluna diferem estatisticamente pelo teste t ($p<0,05$).
**PC sem = Preparo Convencional, sem aplicação de calcário em área total; PC com = Preparo Convencional, com aplicação de 3 Mg ha^{-1} de calcário em área total; PP sem = Preparo Profundo em Faixa com haste Subsoladora e Enxada Rotativa, sem aplicação de calcário; PP com = Preparo Profundo em Faixa com haste Subsoladora e Enxada Rotativa, com aplicação de 3 Mg ha^{-1} de calcário apenas na faixa de preparo.

Em relação a Macro, observou-se que na camada de 0-20 cm, o maior valor foi no PP sem aplicação de calcário, porém esse comportamento não refletiu na Pt do solo.

Já na camada de 40-60 cm de profundidade observou-se que o PC com calagem aumentou os macroporos do solo e isso refletiu na Pt, que também aumentou (Tabela 18). A pressão externa sobre o solo imposta por veículos e implementos agrícolas nas atividades de cultivo tem sido enfatizada na literatura como a principal causa da compactação (SOANE et al., 1981; MARSILI et al., 1998). É possível que a aplicação de cargas sobre o solo após o seu afrouxamento pelo preparo com grades no PC aumentou a compactação do solo.

Observou-se que até 40 cm de profundidade, em média o PP, independentemente da aplicação de calcário, apresentou os menores valores de Agre> 2mm, DMP, DMG e IEA (Tabela 18). Isto pode ser explicado pelo menor teor de COT, principalmente na camada mais superficial (Tabela 15), pois segundo Tisdall e Oades (1980) o CO é um dos principais fatores de formação e estabilização dos agregados, sendo comum encontrar-se correlação positiva entre essas duas variáveis. Dessa forma, em solos onde a MOS é o principal agente de formação e estabilização dos agregados, um nível superior de agregação somente pode ser alcançado e mantido pelo fluxo constante de energia e matéria no sistema (VEZZANI, 2001), que possibilita a manutenção dos agentes ligante (TISDALL e OADES, 1982).

4.2.3.3 Resistência do solo à penetração

Analisando a resistência do solo à penetração das raízes, observa-se que na camada mais superficial do solo (0-20 cm) até a D45, zona correspondente ao canteiro da cultura, ainda que não tenha diferido estatisticamente em todas as distâncias, o PC do solo apresentou em média menores valores que o PP (Tabela 19). Possivelmente, no PC o preparo realizado rompeu a estrutura do solo, reduzindo a densidade e a resistência, apenas na camada superficial. Já nas distâncias correspondentes a zona de tráfego, observou-se que quanto mais próximo ao centro da linha de tráfego (D90, D105 e D120), os maiores valores de RP foram no PC sem aplicação de calcário (Tabela 19).

Já nas camada de 20-40 cm e 40 a 60 cm, nas distâncias correspondentes ao canteiro da cultura (D0, D15, D30 e D45), observou-se que independentemente da aplicação de calcário, em média, o PC apresentou valores de RP superiores ao PP do solo (Tabela 19), sendo esses valores considerados críticos (>2,0 MPa) à penetração das raízes de cana-de-açúcar (TAYLOR et al., 1966), podendo afetar a disponibilidade

hídrica e, consequentemente, propiciar queda de produtividade em toneladas de colmos por hectare (REINERT et al., 2008;TAVARES et al., 2010; AQUINO; MEDINA, 2014, 2015; COSTA et al., 2014). O que tornou evidente a alteração da qualidade física, com possível impacto no crescimento de raízes nos canteiros do PC. No PP, os mecanismos da enxada rotativa aliados ao subsolador profundo romperam a estrutura do solo e diminuíram os impedimentos físicos ao desenvolvimento da cultura e, por conseguinte, minimizaram a RP.

Nas distâncias correspondentes a zona de tráfego (D60, D75, D90, D105 e D120), em média, os maiores valores de RP foram observados no PP do solo. Porém, cabe ressaltar que ambos os preparos permaneceram com condições inadequadas à penetração das raízes de cana-de-açúcar (Tabela 19). Sendo assim, espera-se menor desenvolvimento radicular na zona de tráfego, visto que o trânsito das máquinas está depauperando a estrutura do solo. A maior resistência mecânica do solo à penetração na zona de tráfego, deve-se ao não revolvimento do solo, que ano após ano vem acumulando pressões pelo tráfego de máquinas e, ainda, pela acomodação natural das partículas (CARVALHO JÚNIOR et al., 1998).

Não foi observada diferença estatística entre os tratamentos na camada mais profunda do solo (60-80 cm) (Tabela 19).

A pressão externa sobre o solo imposta por veículos e implementos agrícolas nas atividades de cultivo tem sido enfatizada na literatura como a principal causa da compactação (SOANE et al., 1981; MARSILI et al.,1998). Segundo Arshad et al. (1996), valores entre 2,0 e 4,0 MPa, em sistema de plantio direto, dificultam o desenvolvimento radicular das culturas. Dexter (1987) afirmou que a compactação do solo é mais prejudicial em solo seco, e que em condições de maior conteúdo de água pode haver crescimento radicular em valores de resistência do solo à penetração superiores a 4,0 MPa.

Em todos os tratamentos estudados, houve aumento da resistência do solo à penetração da linha de plantio para o rodado (Tabela 19), com valores considerados restritivos ao desenvolvimento radicular, o que também foi obtido por Lima et al. (2005), que avaliaram o tráfego de máquinas agrícolas em área cultivada com citros. A resistência do solo à penetração foi superior nos locais com maior movimentação dos veículos agrícolas, o que é coerente com o maior tráfego de máquinas e a maior densidade do solo, e corrobora estudos de Streck et al. (2004).

Tabela 19 - Resistência do solo à penetração nas distâncias 0 (D0), 15 (D15), 30 (D30), 45 (D45), 60 (D60), 75 (D75), 90 (D90), 105 (D105) e 120 (D120) cm do centro da linha da cultura, em Latossolo Vermelho-Amarelo, em função do tipo de preparo do solo, na presença ou ausência de aplicação de calcário

Tratamentos	D0	D15	D30	D45	D60	D75	D90	D105	D120
					RP (MPa)				
Prof 0-20 cm									
PP com	1,09 a	2,42 a	1,79 a	2,74 a	2,40 a	3,38 a	4,57 a	3,66 ab	3,46 b
PP sem	0,77 ab	1,17 b	1,98 a	2,20 b	2,56 a	3,00 a	3,19 b	3,93 ab	4,82 a
PC com	0,64 ab	0,96 b	0,92 b	1,56 c	2,48 a	3,09 a	3,48 b	3,48 b	3,18 b
PC sem	0,63 b	0,69 b	1,74 a	1,11 c	1,49 b	2,95 a	4,22 a	4,21 a	5,33 a
Prof 20-40 cm									
PP com	1,28 bc	1,68 b	2,24 c	3,88 a	4,23 a	4,57 a	5,07 a	5,75 a	5,28 ab
PP sem	1,05 c	1,47 b	2,40 bc	2,38 b	2,96 b	3,80 b	4,22 b	4,56 b	4,30 c
PC com	2,73 a	2,65 a	2,77 b	2,45 b	2,65 b	4,17 ab	3,74 c	4,15 b	4,73 bc
PC sem	1,67 b	2,69 a	4,76 a	2,48 b	2,64 b	3,87 b	4,74 a	4,24 b	5,60 a
Prof 40-60 cm									
PP com	1,41 b	1,87 b	2,47 b	3,61 a	3,97 a	3,59 a	3,57 a	3,66 a	4,33 a
PP sem	0,93 c	1,83 b	2,56 b	2,89 b	3,08 b	2,73 c	3,20 a	2,89 b	3,28 b
PC com	3,71 a	3,35 a	3,45 a	3,47 a	3,13 b	3,03 bc	2,52 b	3,32 ab	3,37 b
PC sem	3,47 a	3,79 a	3,42 a	3,51 a	3,38 b	3,34 ab	3,30 a	3,56 a	3,24 b
Prof 60-80 cm									
PP com	2,61 a	2,99 a	3,02 a	3,33 a	3,02 a	2,93 a	3,00 a	2,73 a	2,94 a
PP sem	2,91 a	3,02 a	2,96 a	3,05 a	2,90 a	2,90 a	2,70 ab	2,97 a	2,85 a
PC com	2,96 a	3,33 a	3,01 a	2,93 a	2,45 a	2,70 a	2,86 ab	2,68 a	2,88 a
PC sem	2,90 a	2,85 a	2,93 a	3,06 a	2,88 a	2,58 a	2,45 b	2,62 a	2,81 a

*Médias seguidas por letras distintas diferem estatisticamente pelo teste t ($p<0,05$) e comparam os manejos dentro de cada profundidade.

**D0 = centro do canteiro de cana-de-açúcar; D15 = 15 cm do ponto 0, D30 = 30 cm do ponto 0; D45 = 45 cm do ponto 0; D60 = 60 cm do ponto 0; D75 = 75 cm do ponto 0; D90 = 90 cm do ponto 0; D105 = 105 cm do ponto 0 e D120 = 120 cm do ponto 0 (no centro na área de tráfego).

*** PP com = Preparo Profundo em Faixa com haste Subsoladora e Enxada Rotativa, com aplicação de 3 Mg ha^{-1} de calcário apenas na faixa de preparo; PP sem = Preparo Profundo em Faixa com haste Subsoladora e Enxada Rotativa, sem aplicação de calcário; PC com = Preparo Convencional, com aplicação de 3 Mg ha^{-1} de calcário em área total; PC com = Preparo Convencional, sem aplicação de calcário em área total.

Entretanto, na literatura parece não haver consenso quanto ao valor de resistência mecânica à penetração limitante da cana-de-açúcar. Gonçalves et al. (2014) utilizaram 2,5 MPa, enquanto Cavalieri et al. (2011) e Souza et al. (2015) utilizaram 3,0 MPa. Veen e Boone (1990) advertem que a resistência oferecida pelo solo à haste do penetrômetro tende a ser maior do que a efetivamente exercida sobre as raízes, conforme também observado por Van Lier e Gubiani (2015). Contudo, Tavares Filho et al. (2001) afirmam que, se houverem condições químicas e umidade favorável, e

se a porosidade do solo permitir que ocorra difusão de oxigênio, as raízes podem sofrer deformações morfológicas e crescer através de pontos de menor resistência, mesmo em solo com valores elevados de resistência mecânica à penetração. Esse crescimento pode acontecer, sobretudo, por meio de macroporos e canais formados após a senescência de antigas raízes (UNGER e KASPAR, 1994).

4.2.4 Produtividade de colmos

Devido a ocorrência de geada, a primeira colheita foi antecipada, fazendo com que a cana-de-açúcar fosse colhida aos 7 meses após o plantio, o que ocasionou uma baixa produtividade de colmos (TCH/16). Já na segunda colheita, observou-se que os manejos com aplicação de calcário aumentaram os valores de produtividade de colmos (TCH/17), sendo os valores 14% e 21% superiores no PP e no PC, respectivamente (Tabela 20). Cabe ressaltar ainda que a maior produtividade foi verificada no PC com calagem. Sendo assim, pode-se inferir que o aumento da produção da cultura possui relação com a correção do solo, pela influência sobre as características do solo, de modo a proporcionar melhorias nas condições do ambiente de cultivo (AMARAL, 2002; GATIBONI et al., 2003; ALLEONI et al., 2005; KAMINSKI et al., 2005).

Tabela 20 - Produtividade de colmos da primeira (TCH/16) e da segunda colheita (TCH/17) em função dos tipos de preparo do solo e aplicação de calcário, em um Latossolo Vermelho-Amarelo e probabilidade de F

Tratamentos	TCH/16	TCH/17
	---------- (Mg ha^{-1}) ----------	
PP com	71,50 a	113,97 ab
PP sem	67,50 a	99,70 b
PC com	71,25 a	134,94 a
PC sem	66,00 a	111,13 b
Pr > Fc	0,8460	0,0403
CV%	15,30	12,44

*Médias seguidas por letras distintas diferem estatisticamente pelo teste t (p<0,05) e comparam os manejos dentro de cada profundidade.

** PP com = Preparo Profundo em Faixa com haste Subsoladora e Enxada Rotativa, com aplicação de 2 vezes a dose recomendada de calcário (3 Mg ha^{-1}) apenas na faixa de preparo; PP sem = Preparo Profundo em Faixa com haste Subsoladora e Enxada Rotativa, sem aplicação de calcário; PC com = Preparo Convencional, com aplicação de 2 vezes a dose recomendada de calcário (3 Mg ha^{-1}) em área total; PC com = Preparo Convencional, sem aplicação de calcário em área total.

5 CONCLUSÃO

O preparo profundo do solo, independentemente da aplicação de calcário, reduziu os teores de carbono na área de canteiro, na camada mais superficial do solo, tanto no solo argiloso quanto no arenoso.

O preparo profundo do solo, independentemente da aplicação de calcário, reduziu o conteúdo de Cmic, porém aumentou a atividade desses microrganismos nos solos argiloso e arenoso.

O preparo profundo do solo, independentemente da aplicação de calcário, foi mais eficiente na descompactação do solo até 40 cm de profundidade na área de canteiro, principalmente no solo argiloso.

A aplicação de calcário aumentou a produtividade de colmos de cana-de-açúcar, independentemente do tipo de preparo em solo argiloso. E em solo arenoso a calagem aumentou a produtividade de colmos, principalmente com o preparo convencional do solo.

REFERÊNCIAS

ABREU, M. L.; SILVA, M. A.; TEODORO, L.; HOLANDA, L.A.; SAMPAIO NETO, G. D. Crescimento e produtividade de cana-de-açúcar em função da disponibilidade hídrica dos Tabuleiros Costeiros de Alagoas. **Bragantia**, Campinas, v.72, p. 262–270, 2013.

ACIEGO PIETRI, J. C.; BROOKES, P.C. Substrate inputs and pH as factors controlling microbial biomass, activity and community structure in an arable soil. **Soil Biology and Biochememistry**, Oxford, v. 41, p. 1396–1405, 2009.

ALBUQUERQUE, A. C. S. E 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.

ALEF, K.; NANNIPIERI, P. **Methods in applied soil microbiology and biochemistry**. London: Academic Press, p. 576, 1995.

ALLEONI, L. R. F.; CAMBRI, M. A.; CAIRES, E. F. Atributos químicos de um Latossolo de cerrado sob plantio direto, de acordo com doses e formas de aplicação de calcário. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 6, p. 923-934, 2005.

AMARAL, A. S. **Mecanismos de correção da acidez do solo no sistema plantio direto com aplicação de calcário na superfície.** 2002. 107 f. (Tese). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

ANDERSON, J. P. E.; DOMSCH, K. H. The metabolic quotient of CO2 (q CO2) as a specific activity paramenter to assess the effects of environmental condition, such as pH, on the microbial of forest soil. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 25, n. 3, p. 393-395, 1993.

ANDERSON, T. H.; DOMSCH, K. H. Ratios of microbial biomass carbon to total organic carbon in arable soils. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 21, p. 471-479, 1989.

ANDERSSON, S.; NILSSON, S. I. Influence of pH and temperature on microbial activity, substrate availability of soil-solution bacteria and leaching of dissolved organic carbon in a mor humus. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 33, p. 1181-1191, 2001.

ANDRADE, C. D.; ALCÂNTARA, F. A.; MADEIRA, N. R.; MACÊDO, R. H.; FERNANDES, R. Erosão hídrica em Latossolo Vermelho cultivado com hortaliças sob diferentes sistemas de manejo. Fortaleza: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, **Anais**... XXXII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 2009.

AQUINO, G. S. de; MEDINA, C. de C.; PORTEIRA JUNIOR, A. L.; SANTOS, L. O.; CUNHA, A. C. B.; KUSSABA, D. A. O.; SANTOS JÚNIOR, J. H. dos; ALMEIDA, L. F., SANTIAGO, A. D. Sistema radicular e produtividade de soqueiras de cana-de-açúcar

sob diferentes quantidades de palhada. **Pesquisa agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 50, n. 12, p. 1150-1159, 2015.

AQUINO, G. S. de; MEDINA, C. de C. Produtividade e índices biométricos e fisiológicos de cana-de-açúcar cultivada sob diferentes quantidades de palhada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 49, n. 3, p. 173-180, 2014.

ARSHAD, M. A.; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J. W.; JONES, A. J. (Ed.). Methods for assessing soil quality. Madison: **Soil Science Society of America Journal**, Madison, p. 123-141. (SSSA special publication, 49), 1996.

AZEVEDO, D. F.; BOSANELLO, J.; MANHÃE M. S.; WEBER, H. Doses de calcário, gesso, mistura de calcário/gesso, interação calcário x fósforo e calcário x potássio em cana-de-açúcar. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL, v. 6, 1996. Maceió. **Anais**. Piracicaba: Stab, 1996. p. 477-483.

BALESDENT, J., BESNARD, E., ARROUAYS, D.; CHENU, C. The dynamics of carbon in particle-size fractions of soil in a forest-cultivation sequence. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 201, p. 49-57, 1998.

BANGITA, B.; RAO, B. K. R. Impacts of compaction relief treatments on soil physical properties and performance of sugarcane (Saccharum spp.) under zonal tillage system. **Geoderma**, Amsterdam, v. 189-190, p. 351-356, 2012.

BAQUERO, J. E.; RALISCH, R.; MEDINA, C. C.; TAVARES FILHO, J.; GUIMARÃES, M. F. Soil physical properties and sugarcane root growth in a red oxisoil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, p. 63-70, 2012.

BARROS, F. F.; MILAN, M. Qualidade operacional do plantio de cana-de-açúcar. **Bragantia**, Campinas, v. 69, p. 221-229, 2010.

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A. Armazenamento de carbono em frações lábeis da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 7, p. 677-683, 2004.

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

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; MARTIN-NETO, L. Efeito de sistemas de preparo e de cultura na dinâmica da matéria orgânica e na mitigação das emissões de CO_2. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 599-607, 2000.

BERNOUX, M.; CERRI, C. C.; VOLKOFF, B.; CARVALHO, M. C. S.; FELLER, C.; ESCHENBRENNER, V.; PICCOLO, M. C.; FEIGL, B. Gases do efeito estufa e estoques de carbono nos solos: inventário do Brasil. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, Brasília, v. 22, n. 1. p. 235-246, 2005.

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk Density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis: Physical and Mineralogical Methods**. Part 1. Madison: American Society of Agronomy, p. 363-375, 1986.

BÖHME, L.; BÖHME, F. Soil microbiological and biochemical properties affected by plant growth and different long-term fertilization. **European Journal of Soil Biology**, Montrouge, v. 42, p. 1-12, 2006.

BRASSIOLI, F. B.; PRADO, R. de 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.

BRAUNACK, M. V.; ARVIDSON, J.; HAKANSSON, I. Effect of harvest traffic position on soil conditions and sugarcane (Saccharum officinarum) response to environmental conditions in Queensland, Australia. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 89, p. 103-121, 2006.

BRIEDIS, C; SÁ, J. C. M.; CAIRES, E. F.; NAVARRO, J. F.; INAGAKI, T. M.; BOER, A.; QUADROS NETO, C.; FERREIRA, A.O.; CANALLI, L. B.; SANTOS, J. B. Soil organic matter pools and carbonprotection mechanisms in aggregate classes influenced by surface liming in a notill system. **Geoderma**, Amsterdam, v. 170: p. 8088, 2012.

BUSSCHER, W. J.; BAUER, P. J.; FREDERICK, J. R. Recompaction of a coastal loamy sand after deep tillage as a function of subsequente cumulative rainfall. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 68, n. 1, p. 49-57, 2002.

BUYANOVSKY, G. A.; ASLAM, M.; WAGNER, G. H. Carbon turnover in soil physical fractions. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, p. 1167-1173, 1994.

CAIEIRO, J. T.; PANOBIANCO, M.; BESPALHOK FILHO, J. C.; OHLSON, O. C. Physical purity and germination of sugarcane seeds (Caryopses) (Saccharum spp.). **Revista Brasileira de Sementes**, Londrina, v. 32, n. 2, p. 140-145, 2010.

CAIRES, E. F. Correção da acidez do solo em sistemas de plantio direto. **Informações Agronômicas** – INPI, Piracicaba, n. 147, p. 1-13, 2013.

CAIRES, E. F.; GARBUIO, F. J.; CHURKA, S.; JORIS, H. A. W. Use of gypsum for crop grain production under a subtropical no-till cropping system. **Agronomy Journal**, Madison, v. 103, n. 6, p. 1804-1814, 2011.

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

CARMO, F. F. do; FIGUEIREDO, C. C. de; RAMOS, M. L. G.; VIVALDI, L. J.; ARAÚJO, L. G. Frações granulométricas da matéria orgânica em Latossolo sob plantio direto com gramíneas. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 28, p. 420-431, 2012.

CARPENEDO, V.; MIELNICZUK, J. Estado de agregação e qualidade de agregados de Latossolos Roxos, submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 14, p. 99-105, 1990.

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

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

CASTRO, G. S. A.; CRUSCIOL, C. A. C. Effects of superficial liming and silicate application on soil fertility and crop yield under rotatio. **Geoderma**, Amsterdam, v. 195-196, p. 234-242, 2013.

CAVALIERI, K. M. V.; CARVALHO, L. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L.; TORMENA, C. A. Qualidade física de três solos sob colheita mecanizada de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 1541-1549, 2011.

CEDDIA, M. B.; ANJOS, L. H. C.; LIMA, E.; RAVELLI NETO, A.; SILVA, L. A. Sistemas de colheita da cana-de-açúcar e alterações nas propriedades físicas de um solo Podzólico Amarelo no estado do Espírito Santo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n.8, p. 1467-1473, 1999.

CERRI, C. C.; FELLER, C.; CHAUVEL, A. Evolução das principais propriedades de um Latossolo Vermelho-Escuro após desmatamento e cultivo por doze e cinquenta anos com cana-de-açúcar. **Cahiers Orstom**, Séria Pédologie, Bondy, v. 26, p. 37-50, 1991.

CHERUBIN, M. R.; KARLEN, D. L.; CERRI, C. E. P.; FRANCO, A. L. C.; TORMENA, C. A.; DAVIES, C. A.; CERRI, C. C. Soil quality indexing strategies for evaluating sugarcane expansion in Brazil. **Plos One**, São Francisco, v. 11, p. 1–26, 2016.

CHRISTENSEN, B. T. Organic matter in soil-structure, function and turn over. DIAS Report No. 30 **Plant Production**, Tjele, p. 95, 2000.

CHU, H.; LIN, X.; FUJII, T.; MORIMOTO, S.; YAGI, K.; HU, J.; ZHANG, J. Soil microbial biomass, dehydrogenase activity, bacterial community structure in response to long-term fertilizer management. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 39, p. 2971-2976, 2007.

CINTRA, F. L. D.; MIELNICZUK, J.; SCOPEL, I. Caracterização do impedimento mecânico em um Latossolo Roxo do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 7. P. 323-327, 1983.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Levantamento da safra 2018/19**. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>. Acesso em: 15 maio. 2019.

CORRÊA, J. C. et al. Alteração de atributos físicos em Latossolo com aplicação superficial de escória de aciaria, lama cal, lodos de esgoto e calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 263-272, 2009.

CORTEZ, J. W.; ALVES, A. D. S.; DE MOURA, M. R. D.; OLSZEVSKI, N.; NAGAHAMA, H. J. Atributos físicos do Argissolo Amarelo do semiárido nordestino sob sistemas de preparo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 1207–1216, 2011.

COSTA, L. G.; MARIN, F. R.; NASSIF, D. S. P.; PINTO, H. M. S.; LOPES-ASSAD, M. L. R. C. Simulação do efeito do manejo da palha e do nitrogênio na produtividade da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, p. 469-474, 2014.

COSTA, M. C. G.; MAZZA, J. A.; VITTI, G. C.; JORGE, L. A. C. Distribuição radicular, estado nutricional e produção de colmos e de açúcar em soqueiras de dois cultivares de cana-de-açúcar em solos distintos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31 p.1503-1514, 2007.

CUNHA, A. R.; MARTINS, D.; RICARTE, R. M. Classificação climática para o município de Botucatu, SP, segundo Köppen. In: Simpósio em Energia na Agricultura, 1, 1999, Botucatu. **Anais**... Botucatu: Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, 1999. p. 487-491.

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

DEXTER, A. R. Mechanics of root growth. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 98, p. 303-312, 1987.

DEXTER, A. R. Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, p. 201-214, 2004a.

DIECKOW, J.; BAYER, C.; CONCEIÇÃO, P. C.; ZANATTA, J.A.; MARTIN-NETO, L.; MILORI, D. M. B. P.; SALTON, J. C.; MACEDO, M. C. M.; MIELNICZUK, J.; HERNANI, L. C. Land use, tillage, texture and organic matter stock and composition in tropical and subtropical Brazilian soils. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 60: p. 240-249, 2009.

DOOREMBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979. 193p. Irrigation and Drainage Paper 33.

EKWUE, E. I. Organic matter effects on soil strength properties. **Soil and Tillage Research**, Madison, v. 16, n. 33, p. 289-297, 1990.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p. (Documentos, 1).

FARONI, C. E. **Sistema radicular de cana-de-açúcar e identificação de raízes metabolicamente ativas**. 2004. 86f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz-ESALQ, Piracicaba, 2004.

FERNANDES, J.; RIPOLI, T. C.; MILLAN, M. A. A compactação do solo e a brotação das soqueiras. **Informativo Álcool & Açúcar**, v. 3, n. 12, p. 12-17, 1983.

FERREIRA, A. S.; CAMARGO, F. A. O.; VIDOR, C. Utilização de micro ondas na avaliação da biomassa microbiana do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.2 3, n. 4, p. 991-996, 1999.

FERREIRA, D. F. SISVAR: a program for statistical analysis and teaching. **Revista Symposium**, Recife, v. 6, p. 36-41, 2008.

FRANZLUEBBERS, A. J.; HONS, F. M.; ZUBERER, D. A. Seasonal changes in soil microbial biomass and mineralizable C and N in wheat management systems. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 26, p. 1469-1475, 1994.

FREITAS, G. R. Preparo do solo. In: PARANHOS, S. B. (Ed.). **Cana-de-açúcar**. Cultivo e utilização. 4. Campinas, SP: Fundação CARGILL, v.1, 1987. cap. III – Técnicas culturais básicas, p. 271-283.

FRIGHETTO, R. T. S. **Análise da biomassa microbiana em carbono: método defumigação-extração**, 2000.

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

GAMA-RODRIGUES, E. F.; GAMA-RODRIGUES, A. C. Biomassa microbiana e ciclagem de nutrientes. In: SANTOS, G. A. et al. (Ed.) **Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2.ed. Porto Alegre, Metrópole, 2008. cap. 11. p. 159-170.

GANG, L.U.; SAKAGAMI, K.; TANAKA, H.; HAMADA, R. Role of soil organic matter in stabilization of water-stable aggregates in soils under different types of land use. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tóquio, 44:147-155, 1998.

GASCHO, G. J.; SHIH, S. F. Sugarcane. In: TEARE, I. D.; PEET, M. M. (Ed.). **Crop-water relations.** New York: Wiley-Interscience, 1993. P. 445-479.

GATIBONI, L. C.; SAGGIN, A.; BRUNETTO, G.; HORN, D.; FLORES, J. P. C.; KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D. S. Alterações nos atributos químicos de solo arenoso pela calagem superficial no sistema plantio direto consolidado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, p. 282-290, 2003.

GÓES, G. B.; GREGGIO, T. C.; CENTURION, J. F.; AMAURI, N. B.; ANDRIOLI, I. Efeito do cultivo da cana-de-açúcar na estabilidade de agregados e na condutividade hidráulica do solo. **Revista Irriga**, Botucatu v. 10, n. 2, p. 116-122, 2005.

GONÇALVES, W. G.; SEVERIANO, E. C.; SILVA, F. G.; COSTA, K. A. P.; GUIMARÃES JUNNYOR, W. S.; MELO, G. B. 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.

GONZALES-ERICO, E.; KAMPRATH, E. J.; NADERMAN, G. C.; SOARES, W. V. Effect of depth of lime incorporation on the growth of corn na Oxisol of Central Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 43, p. 1115-1158, 1979.

GRIÈVE, I. C.; DAVIDSON, D. A.; BRUNEAU, P. M. C. Effects of liming on void space and aggregation in an upland grassland soil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 125, p. 39-48, 2005.

GUPTA, S. C.; HADAS, A.; SHAFER, R. L. Modeling soil mechanical behavior during compacttion. In: LARSON, W. E.; BLACK, G. R.; ALLMARAS, R. R.; VOORHEES, W. B.; GUPTA, S. C. **Mechanical and related process in structured agricultural soils**. The Netherlands, Kluwer Academic, 1989. p. 137-152.

GUPTA, V.; RAGHUVANSHI, S.; GUPTA, A.; SAINI, N.; GAUR, A.; KHAN, M.N.; GUPTA, R. S.; SINGH, J.; DUTTAMAJUMDER, S.K.; SUMAN, A.; KHURANA, J. P.; KAPUR, R.; TYAGI, A. K.The water-deficit stress- and red-rot-related genes in sugarcane. **Functional Integrative Genomics**, Berlim, v. 10, n. 2, p. 207-214, 2010.

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.

HORN, R.; LEBERT, M. Soil compactability and compressibility. In: SOANE, B. D.; OUWERKERK, C. VAN. (Edi.) **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. 662 p.

HUMBERT, R. P. **El cultivo de la caña de azucar**. México, Continental, 1974. 719p.

INSAM, H.; MITCHELL, C. C.; DORMAAR, J. F. Relationship of soil microbial biomass and activity with fertilization practice and crop yield of three ultisols. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 23: p. 459-464, 1991.

JONG VAN LIER, Q. Gases no solo. In: JONG VAN LIER, Q., org. **Física do solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 1. p. 153-176, 2010.

KAMINSKY, J.; SANTOS, D. R. dos; CATIBONI, L. C.; BRUNETTO, G.; SILVA, L. S. da. Eficiência da calagem superficial e incorporada precedendo o sistema plantio direto em um argissolo sob pastagem natural. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, Campinas, v. 29, p. 573-580, 2005.

KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C. A.; EVANS, D. D.; WHITE, J. L.; ENSMINGE, L. E.; CLARK, F. E. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: ASA, 1965. p. 499 – 510.

KINGWELL, R.; FUCHSBICHLER, A. The whole-farm benefits of controlled traffic farming: an Australian appraisal. **Agricultural Systems**, v. 104, p. 513-521, 2011.

KLEIN, V. A. Densidade relativa - um indicador da qualidade física de um Latossolo vermelho. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 5, p. 26-32, 2006.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: Klute, A. (ed.). **Methods of soil analysis**. 2.ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. Part. 1, p. 635-662.

KLUTHCOUSKI, J.; COBUCCI, T.; AIDAR, H.; YOKOYAMA, L. P.; OLIVEIRA, I. P. D.; COSTA, J. L. D. S; SILVA, J. G. D.; VILELA, L.; BARCELLOS, A. D. O., MAGNABOSCO, C. D. U. Sistema Santa Fé: tecnologia Embrapa: Integração lavoura pecuária pelo consórcio de culturas anuais com forrageiras, em áreas de lavoura, nos sistemas direto e convencional. Santo Antonio de Goiás, GO: Embrapa Arroz e Feijão, 2000. 28 p. (Circular Técnica, 38).

KRÄMER, S.; GREEN, D. M. Acid and alkaline phosphatase dynamics and their relationship to soil microclimate in a semiarid woodland. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 32, p. 179-188, 2000.

LAL, R.; KIMBLE, J.; STEWART, B. A. Word soils as a source or sink for radiatively-active gases. In: LAL, R.; KIMBLE, J.; LEVINE, E.; STEWART, B. A., eds. **Soil management and greenhouse effect**. Boca Raton, Advances in Soil Science, CCR Lewis Publishers, 1995. p. 1-7.

LANA, R. M. Q.; DOMINGUES, L. A. S.; TORRES, J. L. R.; MAGESTE, J. G.; DE MORAES, E. R. Soil physical attributes and productivity of sugarcane under different cropping systems in the savannah goiano. **Australian Journal of Crop Science**, v. 11, p. 149–155, 2017.

LECO CORPORATION. TruSpec CHN/CHNS Carbon/Hydrogen/Nitrogen/Sulfur Determinators: Instruction Manual. 1. Ed. St JOSEPH, 2011. 532p.

LEITE, G. M. V.; ANDRADE, L. A. de B.; GARCIA, J. C.; ANJOS, I. A. dos. Efeito de fontes e doses de silicato de cálcio no rendimento agrícola e na qualidade tecnológica da cana-de-açúcar, cultivar SP80-18161. **Ciênc. Agrotec**., Lavras, v. 32, n. 4, p. 1120-1125, 2008.

LICHT, M. A.; AL-KAISI, M. Strip-tillage effect on seedbed soil temperature and other soil physical properties. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 80, p. 233-249, 2005.

LIMA, C. C. **Canteirização com preparo convencional e profundo do solo para cana-de-açúcar: atributos físicos e sistema radicular**. 2016. 150p. Dissertação (Mestrado). Instituto Agronômico de Campinas, Campinas, 2016.

LIMA, H. V.; LIMA, C. L. R.; LEÃO, T. P.; COOPER, M.; SILVA, A.P.; ROMERO, R. S. Tráfego de máquinas agrícolas e alterações de bioporos em área sob pomar de laranja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 5, p. 677-684, 2005.

LIMA, R. P. D.; SILVA, A. P. D.; GIAROLA, N. F. B.; SILVA, A. R. D.; ROLIM, M. M. Changes in soil compaction indicators in response to agricultural field traffic. **Biosystems Engineering**, v. 162, p. 1–10, 2017.

LOMBARDI NETO, F.; DRUGOWICH, M**. Manual técnico de manejo e conservação de solo e água.** Campinas: CATI, v. 2, p. 168, 1994.

MACHADO, E. C. **Um modelo matemático-fisiológico para simular o acúmulo de matéria seca na cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.).** Campinas: UNICAMP, 1981. 115p. (Mestrado – Instituto de Biologia).

MAFES. Manual Técnico Penta Hidro-3, 2014.

MARASCA, I. **Avaliação dos atributos físicos de um argissolo cultivado com cana-de-açúcar em área com adequação de relevo, utilizando equipamento de preparo profundo e canteirizado do solo**. 2014. 76p. Tese (Doutorado). Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Botucatu, 2014.

MARINHO, M. L.; ALBUUERQUE, G. A. C.; ARAUJO, J. T. Efeitos da calagem em solo argiloso fortemente ácido em Alagoas. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO, 14., 1980, Cuiabá, **Anais**. Campinas, 1980. p. 14-19.

MARSCHENER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2 ed. London: Academic Press, 2002.

MARSILI, A.; SERVADIO, P.; PAGLIAI, M.; VIGNOZZI, N. Changes of some physical properties of a clay soil following passage of rubber-and metal-tracked tractors. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 49, p. 185-199, 1998.

MARTINS FILHO, M. V.; SIQUEIRA, D. S.; MARQUES JÚNIOR, J. Preparo dos Solos Tropicais. P. 149-176. In: BELARDO, G. de C.; CASSIA, M. T.; SILVA, R. P. da. (Ed.) **Processos Agrícolas e Mecanização da cana-de-açúcar**. Jaboticabal: SBEA, 2015. 608p.

MOLERO, S.; LÓPEZ-GARRIDO, R.; MURILLO, J. M. MORENO, F. Conservation tillage: Short- and long-term effects on soil carbon fractions and enzymatic activities under Mediterranean conditions. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 104, p. 292-298, 2009.

MORAES, E. R. de.; DOMINGUES, L. A. S.; MEDEIROS, M. H.; PEIXOTO, J. V. M.; LANA, R. M. Q. Produtividade e características agronômicas da cana-de-açúcar em diferentes sistemas de preparo do solo. **Revista de Agricultura Neotropical,** Cassilândia, v. 3, n. 1, p. 27-32, 2016.

MOREIRA. F. M. S.; SIOUEIRA. J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras: UFLA. 2006. 729 p.

MORELLI, J. L.; DALBEN, A. E.; ALMEIDA, J. O. C.; DEMATTÊ, J. L. I. Calcário e gesso na produtividade da cana-de-açúcar e nas características químicas de um

latossolo de textura média álico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 16, p. 187-194, 1992.

MORELLI, J. L. DEMATTÊ, J. L. I., NELLI, E. J.; DALBEN, A. E. Efeito do gesso e do calcário nas propriedades químicas de solos arenosos álicos e na produção da cana-de-açúcar. **Stab Açúcar, álcool e subprodutos**, Piracicaba, v. 6, p. 24-31, 1987.

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

MÜLLER, M. M. L. **Influência do monocultivo na cana-de-açúcar e nas propriedades físicas e químicas de um Nitossolo Vermelho e um Neossolo Quartzarênico**. Botucatu, 2002, 120 f. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2002.

MUNEER, M.; OADES, J. M. The role of Ca-organic interactions in soil aggregate stability. III. Mechanismis and models. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 27, p. 411-423, 1989.

NICOLODI, M.; ANGHINONI, I.; GIANELLO, C. Indicadores da acidez do solo para a recomendação da calagem no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 237-247, 2008.

OADES, J. M. Soil organic and structural stability: Mechanisms and implications for management. **Plant Soil**, Netherlands, v. 76, p. 319-337, 1984.

ORLANDO FILHO, J.; SILVA, L. C. F.; MANOEL, L. A. Fontes de calcário aplicadas em área total e sulco de plantio em cana-de-açúcar. **Stab, Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracibaba, v. 8, n. 1, p. 11-16, 1990.

ORLANDO FILHO, J.; ZAMBELLO, E. J. Distribuição e conservação dos solos com cana-de-açúcar no Brasil. In: ORLANDO FILHO, J. (Ed.). Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil. Piracicaba: IAA/Planalsucar, v. 2, p. 41-73, 1983.

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

PARFITT, R. L.; THENG, B. K. G.; WHITTON, J. S.; SHEPHERD, T. G. Effects of clay minerals and land use on organic matter pools. **Geoderma**, Amsterdam, v. 75, p. 1-12, 1997.

PARTELLI, F. L.; VIEIRA, H. D.; FERREIRA, E. P. B.; VIANA, A. P.; MARTINS, M. A.; URQUIAGA, S. Chemical and microbiological soil characteristics under conventional and organic coffee production systems. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 43, n. 2, p. 847-864, 2012.

PAUL, E. A., CLARCK, F. E. Reduction and transport of nitrate. In: **Soil Microbiology and Biochemistry**, v. 9. Academic press, New York, NY, p. 81–85, 1989.

PAULINO, A. F.; MEDINA, C. C.; AZEVEDO, M. C. B.; SILVEIRA, K. R. P.; TREVISAN, A. A.; MURATA, I. M. Escarificação de um latossolo vermelho na pós-colheita de soqueira de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28. p. 911-917, 2004.

PAVAN, M. A.; BINGHAM, F. T.; PRATT, P. F. Toxicity of aluminum to coffee (Coffea Arabica L.) in Ultisols and Oxisols amended with amended with $CaCO_3$, $MgCO_3$ and $CaSO_4.2H_2O$. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 46, p. 1201-1207, 1982.

PENATTI, C. P.; FORTI, J. A. **Calcário e gesso em cana-de-açúcar**. Relatório de projeto. Piracicaba: Copersucar, 1993. 80 p.

PERSSON, T., RUDEBECK, A., WIREN, A. Pools and fluxes of carbon and nitrogen in 40-year-old forest liming experiments in southern Sweden. **Water Air Soil Pollution,** v. 85, p. 901–906, 1995.

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. de M.; FERNANDES, F. M. **Amostragem do solo em área com cana-de-açúcar após calagem. Relação de alguns atributos químicos do solo e a produção de colmos.** STAB, Piracicaba, v. 19, n. 3, 2001.

PRADO, R. de 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.

PRADO, R. de M.; FERNANDES, F. M.; NATALE, W. Efeito residual da escória de siderurgia como corretivo de acidez do solo na soqueira de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 287-296, 2003.

QUAGGIO, J. A. **Acidez e calagem em solos tropicais**. Campinas, Instituto Agronômico, 2000. 111p.

QUAGGIO, J. A.; RAIJ, B. van. Cálcio, magnésio e correção da acidez do solo. p. 313-321. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. (Ed.) **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agronômico, 2008. 882 p.

QUAGGIO, J. A.; RAIJ, B. van; GALLO, P. B. & MASCARENHAS, H.A.A. Respostas da soja à aplicação de calcário e gesso e lixiviação de íons no perfil do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 28(3), p. 375-383, 1993.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas: Instituto Agronômico, 2001. 285p.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 12, p. 211-216, 1988.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do Solo em Sistemas Agropecuários e Florestais: Identificação, Efeitos, Limites Críticos e Mitigação. **Tópicos em Ciência do Solo**, p. 49-134, 2007.

REINERT, D. J. ALBUQUERQUE, J. A.; REICHERT, J. M.; AITA, C.; ANDRADA, M. M. C. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 32, p. 1805-1816, 2008.

RITCHEY, K. D. et al. Calcium leaching to increase rooting depth in a Brazilian Savannah Oxisol. **Agronomy Journal**, Madison, v. 72, p. 40-44, 1980.

RITCHEY, K. D.; SILVA, J. E.; SOUZA, D. M. G. Relação entre teor de cálcio no solo e desenvolvimento de raízes avaliado por um método biológico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 7, p. 269-275, 1983.

RODELLA, A. A.; SABOYA, L. V. Calibrations for conductimetric determination of carbon dioxide. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 31, n. 14, p.2059-2060, 1999.

ROSA, D. P.; REICHERT, J.M., MENTGES, M. I.; BARROS, C. A .P.; REINERT, D. J.; VIEIRA, D. A. Cultivo mínimo: efeito da compactação e deformação abaixo da atuação da ponteira do subsolador. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,** Campina Grande, v. 15, p. 1199– 1205, 2011.

ROSS, D. J. Soil microbial biomass estimated by the fumigation-incubation procedure: Seasonal fluctuations and influence of soil moisture contente. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 19, p. 397-404, 1987.

ROSSETTO, R.; DIAS, F. L. F.; VITTI, A. C.; CANTARELLA, H.; LANDELL, M. G. A. Manejo conservacionista e reciclagem de nutrientes em cana-de-açúcar tendo em vista a colheita mecânica. **Informações Agronômicas**, v. 124, p. 8-13, 2008.

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

ROSSETTO, R.; SANTIAGO, A. D. Árvore do conhecimento: cana-de-açúcar. Cultivo mínimo. Agência Embrapa de Informação Tecnológica. Brasília: Embrapa, 2017. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-deacucar/arvore/CONTAG0 1_85_22122006154841.html>. Acesso em: 10 maio 2019.

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

ROSSETTO, R.; SPIRONELLO, A.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. Calagem para cana-de-açúcar e sua interação com a adubação potássica. **Bragantia**, Campinas, v. 63, p. 105-119, 2004.

ROSSI, C. Q.; PEREIRA, M. G.; GIÁCOMO, S. G.; BETTA, M.; POLIDORO, J. C. Frações húmicas da matéria orgânica do solo cultivado com soja sobre palhada de braquiária e sorgo. **Bragantia**, Campinas, v. 70, n. 3, p. 622-630, 2011.

ROUSK, J.; BROOKES, P. C.; BÅÅTH, E. *Contrasting soil pH effects on fungal and bacterial growth suggests functional redundancy in carbon mineralisation*. **Applied Environmental Microbiology**, Washington, v. 75: p. 1589–1596, 2009.

SALTON. J. C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; FABRICIO, A. C.; MACEDO, M.C.M.; BROCH, D. L.; BOENI, M.; CONCEIÇÃO, P. C. **Matéria orgânica do solo na interação lavoura-pecuária em Mato Grosso do Sul**. Dourados, Embrapa Agropecuária Oeste, 2005. 58p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 29).

SANTIAGO, A. D.; ROSSETTO, R. Preparo convencional. Brasília, DF, 2007.

SANTOS, M. A. C.; SOBRALI, A. F.; MEDEIROS, A. P.; PEREIRA, J. M. A. Effect of liming on the production of sugarcane and the fertility of the soil in the state of Pernambuco. In: CONGRESS OF THE ISSCT-INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGARCANE TECHNOLOGISTS, 17, Manila, 1980. **Proceedings**. Manila: ISSCT, 1980. p. 58-62.

SETA, A. K. KARATHANASIS, A. D. Water dispersible colloids and factors influencing their dispersibility from soil aggregates. **Geoderma**, Amsterdam, v. 74, p. 255-266, 1996.

SEVERIANO, E. C.; OLIVEIRA, G. C.; CURI, M.; DIAS JUNIOR, M. S. Potencial de uso e qualidade estrutural de dois solos cultivados com cana-de-açúcar em Goianésia (GO). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 159-168, 2009.

SEVERIANO, E. C.; OLIVEIRA, G. C.; DIAS JÚNIOR, M. S.; CASTRO, M. B.; OLIVEIRA, L. C.; COSTA, K. A. P. Compactação de solos cultivados com cana-de-açúcar: I - modelagem e quantificação da compactação adicional após as operações de colheita. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 3, p. 404-413, 2010.

SILVA, A. J. N. da; CABEDA, M. S. V. Compactação e compressibilidade do solo sob sistemas de manejo e níveis de umidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 921-930, 2006.

SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Management versus inherent soil properties effects on bulk density and relative compaction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 44, p. 81-93, 1997.

SILVA, I. R.; MENDONÇA, E. S. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R. F. et al. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 275-374, 2007.

SILVA, J. M.; ALBURQUERQUE, L. S. D.; SANTOS, T. M. C. D.; OLIVEIRA, J. U. L. D.; GUEDES, E. L. F. Mineralização de vermicompostos estimada pela respiração microbiana. **Revista Verde**, Pombal, v. 8, n. 4, p. 132-135, 2013.

SILVA, J. N.; RIBEIRO, M. R. Caracterização de Latossolo Amarelo sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar no estado de alagoas: atributos morfológicos e físicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, p. 677-684, 1997.

SILVA JUNIOR, C. A.; CARVALHO, L. A. Alterações nos atributos físicos do solo relacionados a diferentes métodos de preparo no plantio da cana-de-açúcar. **Revista Alcoolbrás**, v. 129, n. 1, p. 42-45. 2010.

SILVA, R. P.; FERNANDES, C. Soil uses during the sugarcane fallow period: influence on soil chemical and physical properties and on sugarcane productivity. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, p. 575-584, 2014.

SILVA, R. R. D.; SILVA, M. L. N.; CARDOSO, E. L.; MOREIRA, F. M. D. S.; CURI, N.; ALIVISI, A. M. T. Biomassa e atividade microbiana em solos sob diferentes sistemas de manejo na região fisiográfica campos das vertentes - MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 1585-1592, 2010.

SILVA, R. R.; SILVA, M. L. N.; FERREIRA, M. M. Atributos físicos indicadores da qualidade do solo sob sistemas de manejo na Bacia Alto do Rio Grande-MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 29, n. 4, p. 719-730, 2005.

SIX, J., BOSSUYT, H., De GRYZE, S., DENEF, K. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 79, p. 7–31, 2004.

SOANE, B. D.; BLACKWELL, P. S.; DICKSON, J. W.; PAINER, D. J. Compaction by agricultural vehicles: A review. I – soil and wheel characteristics. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 16, p. 207-237, 1981.

SOARES, M. R.; ALLEONI, L. R. F.; VIDAL-TORRADO, P.; COOPER, M. Mineralogy and ion Exchange properties of the particle size fractions of some Brazilian soils in tropical humid áreas. **Geoderma**, Amsterdam, v. 125, n. 3-4, p. 355-367, 2005.

SOUZA, F. C. A. **Atributos físicos de solos submetidos à escarificação na linha de plantio e em área total para cultivo da cana-de-açúcar**. 2016. 33 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2016.

SOUZA, G. S. de; SOUZA, Z. M. de; COOPER, M.; TORMENA, C. A. Controlled traffic and soil physical quality of an Oxisol under sugarcane cultivation. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 72, p. 270-277, 2015.

SOUZA, G. S. de; SOUZA, Z. M. de; SILVA, R. B. da; BARBOSA, R. S.; ARAÚJO, F. S. Effects of traffic control on the soil physical quality and the cultivation of sugarcane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, p. 135-146, 2014.

SOUZA, L. C.; FERNANDES, C.; NOGUEIRA, D. C. S.; MOITINHO, M. R.; BICALHO, E. S.; LA SCALA, N. Can partial cultivation of only the sugarcane row reduce carbon dioxide emissions in an oxisol and ultisol? **Agronomy Journal**, Madison, v. 109, p. 1113–1121, 2017.

SOUZA, Z. M.; BEUTLER, A. N.; PRADO, R. M.; BENTO, M. J. C. Efeito de sistemas de colheita de cana-de-açúcar nos atributos físicos de um Latossolo Vermelho. **Científica**, Jaboticabal, v. 34, n. 1, p. 31-38, 2008.

SOUZA, Z. M.; CAMPOS, M. C. C.; CAVALCANTE, Í. H. L.; MARQUES JÚNIOR, J.; CESARIN, L. G.; SOUZA, S. R. Dependência espacial da resistência do solo à penetração e teor de água do solo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 1, p. 128-134, 2006.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em diferentes formas de relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 3, p. 937-944, 2004.

SPERA, S. T.; SANTOS, H. P. dos; FONTANELI, R. S.; TOMM, G. O. Avaliações de alguns atributos físicos de solo em sistemas de produção de grãos, envolvendo pastagens sob plantio direto. **Revista Ciência Rural**, Santa Maria, v. 9, p. 23-31, 2004.

SPIRONELLO, A.; RAIJ, B. van; PENATTI, C. P.; CANTARELLA, H.; MORELLI, J. L.; ORLANDO FILHO, J.; LANDELL, M. G. A.; ROSSETTO, R. **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. (Boletim Técnico n. 100).

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

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

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 395-401, 2001.

STORINO, M.; PECHE FILHO, A.; KURACHI, S. A. H. Aspectos operacionais do preparo do solo. p. 547-572. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. (Ed) **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agronômico, 2008. 882p.

STRECK, C. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego de um trator em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 3, p. 755-760, 2004.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 3ª edição. Porto Alegre: Artmed, 2004.

TAVARES, A. C. S. **Sensibilidade da cana-de-açúcar (Saccharum spp.) ao excesso de água no solo**. 2009. 220 p. Tese (Doutorado). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2009.

TAVARES FILHO, J.; BARBOSA, G. M. C.; GUIMARÃES, M. F.; FONSECA, I. C. B. 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.

TAVARES FILHO, J. et al. Método do Perfil Cultural para avaliação do estado físico de solos em condições tropicais. **Revista. Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 393-399, 1999.

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, p.61-68, 2010.

TAYLOR, H. M; ROBERSON, G. M.; PARKER, J.J. Soil strength-root penetration relations to coarse textured materials. **Soil Science**, Madison, v. 102, p. 18-22, 1966.

TIM CHAMEN, W.C.; MOXEY, A. P.; TOWERS, W.; BALANA, B.; HALLETT, P. D. Mitigating arable soil compaction: a review and analysis of available cost and benefit data. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 146, p. 10–25, 2015.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science**, Madison, v. 33, p. 141-163, 1982.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. The effect of crop rotation on aggregation in a red-brown earth. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 18, p. 423-434, 1980.

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

TRANNIN, I. C. B.; SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S. Atributos químicos e físicos de um solo tratado com biossólido industrial e cultivado com milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, p. 223-230, 2008.

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

VAN LIER, Q. de 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.

VAN OS, G. J.; GINKEL, J. H. Suppression of Pythium root rot in bulbous Iris in relation to biomass and activity of the soil microflora. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 33, n. 11, p. 1447-1454, 2001.

VASCONCELOS, A. C. M. **Desenvolvimento do sistema radicular da parte aérea de socas de cana-de-açúcar sob dois sistemas de colheita: crua mecanizada e queimada manual.** 2002. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias-UNESP, Jaboticabal, 2002.

VEZZANI, F. **Qualidade do sistema solo na produção agrícola.** 2001. 184 p. (Tese de Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

VISCHI FILHO, O.J.; SOUZA, Z.M.; SOUZA, G.S.; SILVA, R.B.; TORRES, J.L.R.; LIMA, M.E.; TAVARES, R.L.M. Physical attributes and limiting water range as soil quality indicators after mechanical harvesting of sugarcane. **Australian Journal of Crop Science**, v. 11, p.169– 176, 2017.

VITTI, G. C. Enxofre no solo. In: SIMPOSIO SOBRE INTERPRETAÇÃO DE ANÁLISE QUÍMICA DE SOLO E PLANTA PARA FINS DE ADUBAÇÃO, 1., Botucatu, 1988. Anais. Botucatu, FCA-UNESP/FEPAF/ANDA/POTAFOS, 1988. 39p.

VITTI, G. C.; MAZZA, J. A. Planejamento, estratégias de manejo e nutrição da cultura de cana-de-açúcar. **Informações Agronômicas**, v. 97: p. 1-16. (2002).

WEBER, O. L. D. S.; CHITOLINA, J. C.; ANTONIO DE CAMARGO, O.; ALLEONI, L. R. F. Cargas elétricas estruturais e variáveis de solos tropicais altamente intemperizados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 6, p. 867-873, 2005.

WUTKE, A. C. P.; ALVAREZ, R. Restauração do solo para a cultura da cana-de-açúcar. **Bragantia**, Campinas, v. 27, n. 18, p. 201-217, 1968.

YODER, R. E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. **Journal of American Society of Agronomy**, v. 28, p. 337-351, 1936.

ZHANG, H.; HARTGE, K. H.; RINGE, H. Effectiveness og organic matter incorporation in reducing soil compactability. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, p. 239-245, 1997.

ZHANG, H. Organic matter incorporation affects mechanical properties of soil aggregates. **Soil and Tillage Research**, Madison, v. 31, p. 263-275, 1994.