



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

CHRISTTIANE FERNANDES OLIVEIRA

**ATRIBUTOS DE UM NEOSSOLO QUARTZARÊNICO E
CRESCIMENTO DE RAÍZES DA CANA-DE-AÇÚCAR
SOB DIFERENTES MANEJOS**

**ATTRIBUTES OF A ENTISOLS QUARTZIPSAMMENTS
AND GROWTH OF SUGARCANE ROOTS UNDER
DIFFERENT MANAGEMENTS**

CAMPINAS

2024

CHRISTTIANE FERNANDES OLIVEIRA

**ATRIBUTOS DE UM NEOSSOLO QUARTZARÊNICO E
CRESCIMENTO DE RAÍZES DA CANA-DE-AÇÚCAR
SOB DIFERENTES MANEJOS**

**ATTRIBUTES OF A ENTISOLS QUARTZIPSAMMENTS
AND GROWTH OF SUGARCANE ROOTS UNDER
DIFFERENT MANAGEMENTS**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola, na área de Água e Solo.

Orientador: Prof. Dr. Zigomar Menezes de Souza

Coorientador: Denizart Bolonhezi

ESTE TRABALHO CORRESPONDE
À VERSÃO FINAL DA TESE
DEFENDIDA PELA ALUNA
CHRISTTIANE FERNANDES
OLIVEIRA E ORIENTADA PELO
PROF. DR. ZIGOMAR MENEZES DE
SOUZA.

CAMPINAS

2024

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

OL4a Oliveira, Christiane Fernandes, 1989-
Atributos de um Neossolo Quartzarênico e crescimento de raízes da cana-de-açúcar sob diferentes manejos / Christiane Fernandes Oliveira. – Campinas, SP : [s.n.], 2023.

Orientador: Zigomar Menezes de Souza.
Coorientador: Denizart Bolonhezi.
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Qualidade do solo. 2. Sistema radicular. 3. Máquinas agrícolas. 4. Solos - Manejo. 5. Física do solo. 6. Cana-de-açúcar – Mecanização. I. Souza, Zigomar Menezes de, 1970-. II. Bolonhezi, Denizart. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. IV. Título.

Informações Complementares

Título em outro idioma: Attributes of a Entisols Quartzipsamments and growth of sugarcane roots under different managements

Palavras-chave em inglês:

Soil quality

Root system

Agricultural machinery

Soil - Management

Soil physics

Sugarcane - Mechanization

Área de concentração: Água e Solo

Titulação: Doutora em Engenharia Agrícola

Banca examinadora:

Zigomar Menezes de Souza [Orientador]

Oswaldo Julio Vischi Filho

Marlene Cristina Alves

Cácio Luiz Boechat

Edson Eiji Matsura

Data de defesa: 22-09-2023

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Agrícola

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0003-3250-8442>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/0970803327653153>

Este exemplar corresponde à redação final da **Tese de Doutorado** defendida por **Christtiane Fernandes Oliveira**, aprovada pela Comissão Julgadora em 22 de setembro de 2023, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.

Prof. Dr. Zigomar Menezes de Souza – Presidente e Orientador

Dr. Oswaldo Julio Vischi Filho – Membro Titular

Dr. Cácio Luiz Boechat – Membro Titular

Dr. Edson Eiji Matsura – Membro Titular

Dra. Marlene Cristina Alves – Membro Titular

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Maria e Ignácio, pelo amor incondicional, carinho, dedicação, pelos ensinamentos e todo apoio para conclusão desse doutorado.

Ao meu namorado e companheiro de vida, Diego, pelo apoio, incentivo, auxílio e compreensão durante todo esse caminho.

A minha avó, Messias “in memoriam”, pelo amor, e por ser uma inspiração em minha vida.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À **Deus**, fonte infinita de esperança, fé e consolação, mas especialmente por iluminar o meu caminhar com a chama da amizade e bondade dos amigos que me ajudaram nesta jornada.

Aos meus pais, por toda dedicação, carinho e incentivo, obrigada por todo o amor, vocês são os melhores pais que eu poderia ter!

Ao meu grande amor e namorado Diego Pereira, pela ajuda, incentivo, parceria, companheirismo, por todo o apoio nessa minha caminhada. Você foi incrível!

Ao meu orientador Prof. Dr. Zigomar Menezes de Souza pela paciência e segura orientação, pelos incentivos e valiosos ensinamentos ao longo deste período, por me ajudar a desenvolver esse projeto e especialmente, pela sua amizade e companheirismo.

Ao meu orientador do mestrado Prof. Dr. Alan Rodrigo Panosso pelo auxílio, ensinamentos, conversas, amizade, apoio dedicado e por sua disposição para ajudar desde minha entrada na Pós-Graduação.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Denizart Bolonhezi pela parceria e oportunidade para realização e condução desta pesquisa.

À Fazenda Agroterenas por ceder a área e o apoio.

À Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, pela estrutura física e oportunidade de realização deste trabalho.

Aos funcionários da LABSOL: Antonio Javarez Junior, Célia Panzarin e José Ricardo Lucarelli pela amizade e auxílio na realização das análises desta pesquisa.

Aos amigos de longa data: Jussara, Suzana, Wagner, Rafaela, Joyce, Lorena, Suany e Camila, pela amizade e companheirismo. Obrigada pelas conversas e amizade.

Aos amigos e colegas de laboratório: Mayara, Marina, Leila, Camila, Cecília, Diego, Aline, Jeison, Elizeu, Ítalo, Ingrid, Lenon e Vagner, pela amizade, ajuda e troca de conhecimentos para realização deste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Agradeço o financiamento desta pesquisa à Fundação AGRISUS - Agricultura Sustentável (Processo nº. 2059-17) e CAPES (Processo nº. 88882.434683/2019-01), pela concessão da bolsa durante todo o doutorado.

EPÍGRAFE

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito.”

MARTIN LUTHER KING

RESUMO

A cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) é caracterizada por ter um cultivo intensivo, com grande revolvimento do solo e tráfego de máquinas, resultando na compactação do solo e consequente alteração nos atributos físicos, com reflexos no desenvolvimento radicular e na produtividade da cultura. Com isso, o objetivo dessa pesquisa foi avaliar as alterações químicas e físicas do solo e o crescimento do sistema radicular da cana-de-açúcar em um Neossolo Quartzarênico quando submetido a sistemas conservacionistas e convencionais de manejo de solo na reforma do canavial. O estudo avaliou o primeiro e o segundo ciclo de cultivo da cana-de-açúcar onde houve o plantio de amendoim anterior à cana-de-açúcar, localizada na Fazenda Agroterenas, no município de Paraguaçu Paulista, Estado de São Paulo, Brasil. O experimento foi estabelecido em faixas, com quatro tratamentos de preparo de solo e três repetições, sendo: T1- preparo convencional; T2- Adubo verde com *Crotalaria ochroleuca*; T3- Preparo reduzido com *Rip Strip*®; T4- Plantio direto. Os seguintes atributos do solo foram avaliados: densidade do solo, teor de água no solo, porosidade (total, macro e microporosidade), resistência do solo à penetração, estoque de carbono e a biomassa seca radicular em cinco profundidades e três locais de amostragens. A análise estatística (contrastes ortogonais) registrou efeitos significativos entre os preparos convencionais e conservacionista do solo para as variáveis analisadas, principalmente para a microporosidade do solo no ciclo da primeira soca. Para o estoque de carbono, os efeitos significativos foram constatados somente no ciclo na cana planta. Os efeitos desses preparos do solo foram reiterados utilizando a análise multivariada, por meio da análise de componentes principais em que se observou a formação de dois grupos distintos, em que o manejo com adubo verde e plantio direto foram agrupados separadamente do manejo com plantio convencional.

Palavras-Chave: Qualidade do solo, sistema radicular, *Rip Strip*®, manejo conservacionista, *Saccharum* spp.

ABSTRACT

Sugarcane (*Saccharum officinarum*) cultivation is characterized by intensive cultivation, with extensive soil disturbance and machine traffic, resulting in soil compaction and consequent changes in physical attributes, with impacts on root development and productivity. of culture. Therefore, the objective of this thesis was to evaluate the chemical and physical changes in the soil and the growth of the sugarcane root system in a Entisols Quartzipsamments when subjected to conservation and conventional soil management systems in the sugarcane field renovation. The study evaluated the first and second sugarcane cultivation cycle where peanuts were planted before sugarcane, located at Fazenda Agroterenas, in the municipality of Paraguaçu Paulista, State of São Paulo, Brazil. The experiment was established in strips, with four soil preparation treatments and three replications, as follows: T1 - conventional tillage; T2- Green manure with *Crotalaria ochroleuca*; T3- Reduced preparation with Rip Strip®; T4- Direct planting. The following soil attributes were evaluated: soil density, soil water content, porosity (total, macro and microporosity), soil resistance to penetration, carbon stock and root dry biomass at five depths and three sampling locations. Statistical analysis (orthogonal contrasts) recorded significant effects between conventional and conservation soil preparations for the analyzed variables, mainly for soil microporosity in the first ratoon cycle. For carbon stock, significant effects were only found in the cycle in the sugarcane plant. The effects of these soil preparations were reiterated using multivariate analysis, through the analysis of main components in which the formation of two distinct groups was observed, in which management with green manure and direct planting were grouped separately from management with conventional planting.

Keywords: Soil quality, root system, *Rip Strip*®, conservation management, *Saccharum ssp.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representação do sistema radicular da cana-de-açúcar. A – Raízes dos toletes e perfilhos; B – Raízes superficiais, de fixação e raízes-cordão. Fonte: Adaptado de Smith <i>et al.</i> (2005).....	27
Figura 2. Distribuição do sistema radicular da cana planta (C) comparada à distribuição em cana soca (D). Fonte: Vasconcelos e Garcia (2005).....	28
Figura 3. Localização da área experimental de cana-de-açúcar em Paraguaçu Paulista, São Paulo, Brasil.....	31
Figura 4. Tratamentos de manejo utilizados na área experimental em Paraguaçu Paulista, São Paulo, Brasil. A = Faixas com amendoim na semeadura direta aos 120 dias; B = Amendoim cultivado no sistema <i>Rip Strip</i> ® ao lado da faixa com <i>Crotalaria ochroleuca</i> (direita); C = <i>Crotalaria ochroleuca</i> ao lado do plantio convencional (direita). Fonte: Denizart Bolonhezi.	32
Figura 5. Linha do tempo dos eventos que ocorreram na área de estudo da Fazenda Agroterenas, em Paraguaçu Paulista, São Paulo, Brasil.....	34
Figura 6. Equipamento <i>Rip Strip</i> ® que foi utilizado na área experimental em Paraguaçu Paulista, São Paulo, Brasil. Fonte: Denizart Bolonhezi.	35
Figura 7. Local de amostragem de solo nos tratamentos da área experimental em Paraguaçu Paulista, São Paulo, Brasil. LP = linha de plantio, C = canteiro, EL = entrelinha da cultura.	36
Figura 8. Esquema de amostragem para avaliação das raízes pelo método da sonda na área experimental em Paraguaçu Paulista, São Paulo, Brasil.....	39
Figura 9. Localização da área experimental de cana-de-açúcar em Paraguaçu Paulista, São Paulo, Brasil.....	44
Figura 10. Linha do tempo dos eventos que ocorreram na área de estudo da Fazenda Agroterenas, em Paraguaçu Paulista, São Paulo, Brasil.....	46
Figura 11. Local de amostragem de solo nos tratamentos da área experimental em Paraguaçu Paulista, Estado de São Paulo, Brasil. LP = linha de plantio, C = canteiro, EL = entrelinha das culturas.	47
Figura 12. Esquema de amostragem para avaliação das raízes pelo método da sonda na área experimental em Paraguaçu Paulista, São Paulo, Brasil.....	50
Figura 13. Localização da área experimental de cana-de-açúcar em Paraguaçu Paulista, São Paulo, Brasil.....	68

Figura 14. Linha do tempo dos eventos que ocorreram na área de estudo da Fazenda Agrotezenas em Paraguaçu Paulista, Estado de São Paulo, Brasil.	70
Figura 15. Local de amostragem de solo nos tratamentos da área experimental localizada em Paraguaçu Paulista, São Paulo, Brasil. LP = linha de plantio, C = canteiro, EL = entrelinha das culturas.	71
Figura 16. Esquema de amostragem para avaliação das raízes pelo método da sonda na área experimental em Paraguaçu Paulista, São Paulo, Brasil.	74
Figura 17. Matriz de correlação linear entre os atributos do solo analisados na área experimental em Paraguaçu Paulista, São Paulo, Brasil.	75
Figura 18. Gráfico de variância explicada do conjunto de variáveis para cada componente principal (CP).	76
Figura 19. Gráfico biplot dos componentes principais CP1 e CP2 com todas as observações avaliadas.	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Produtividade média da cana-de-açúcar de acordo com a idade (quantidade de cortes) de cada talhão.	20
Tabela 2. Caracterização granulométrica e química da área experimental de cana-de-açúcar em Paraguaçu Paulista, São Paulo, Brasil.	33
Tabela 3. Descrição dos tratamentos avaliados na área de estudo em Paraguaçu Paulista, São Paulo, Brasil.	35
Tabela 4. Caracterização granulométrica e química da área experimental de cana-de-açúcar em Paraguaçu Paulista, São Paulo, Brasil.	45
Tabela 5. Descrição dos tratamentos avaliados na área de estudo, em Paraguaçu Paulista, São Paulo, Brasil.	47
Tabela 6. Contrastes ortogonais entre os grupos de tratamento C1 x C2 para densidade do solo (kg dm^{-3}) realizada ao final do primeiro e segundo ciclo da cana-de-açúcar em Paraguaçu Paulista, São Paulo, Brasil.	51
Tabela 7. Contrastes ortogonais entre os grupos de tratamento C1 x C2 para a macroporosidade ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) realizada ao final do primeiro e segundo ciclo da cana-de-açúcar em Paraguaçu Paulista, São Paulo, Brasil.	52
Tabela 8. Contrastes ortogonais entre os grupos de tratamento C1 x C2 para microporosidade ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) realizada ao final do primeiro e segundo ciclo da cana-de-açúcar em Paraguaçu Paulista, São Paulo, Brasil.	53
Tabela 9. Contrastes ortogonais entre os grupos de tratamento C1 x C2 para porosidade total ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) realizada ao final do primeiro e segundo ciclo da cana-de-açúcar em Paraguaçu Paulista, São Paulo, Brasil.	54
Tabela 10. Contrastes ortogonais entre os grupos de tratamento C1 x C2 para resistência do solo à penetração (MPa) realizada ao final do primeiro e segundo ciclo da cana-de-açúcar em Paraguaçu Paulista, São Paulo, Brasil.	55
Tabela 11. Contrastes ortogonais entre os grupos de tratamento C1 x C2 para o teor de água no solo (kg kg^{-1}) realizada ao final do primeiro e segundo ciclo da cana-de-açúcar em Paraguaçu Paulista, São Paulo, Brasil.	56
Tabela 12. Contrastes ortogonais entre os grupos de tratamento C1 x C2 para o estoque de carbono no solo (Mg ha^{-1}) realizada ao final do primeiro e segundo ciclo da cana-de-açúcar em Paraguaçu Paulista, São Paulo, Brasil.	57

Tabela 13. Contrastes ortogonais entre os grupos de tratamento C1 x C2 para a distribuição da biomassa seca radicular (kg ha^{-1}) realizada ao final do primeiro e segundo ciclo da cultura em Paraguaçu Paulista, São Paulo, Brasil.....	58
Tabela 14. Caracterização granulométrica e química da área experimental de cana-de-açúcar em Paraguaçu Paulista, São Paulo, Brasil.	69
Tabela 15. Descrição dos tratamentos avaliados na área de estudo em Paraguaçu Paulista, São Paulo, Brasil.....	70
Tabela 16. Componentes principais (CP1, CP2, CP3, CP4, CP5, CP6, CP7, CP8 e CP9) da análise multivariada dos atributos físico-químicos, biomassa radicular e estoque de carbono de um Neossolo Quartzarênico, cultivado com cana de açúcar.....	76
Tabela 17. Correlações entre os atributos físico-químicos do solo e biomassa radicular da cana-de-açúcar, nos três primeiros componentes principais da PCA.	77

SUMÁRIO

1.	CONSIDERAÇÕES GERAIS	16
1.1	ORGANIZAÇÃO DA TESE.....	16
1.2	INTRODUÇÃO.....	16
1.3	HIPÓTESE	18
1.4	OBJETIVO	19
1.4.1	Objetivo Geral	19
1.4.2	Objetivos Específicos	19
1.5	REVISÃO DE LITERATURA	19
1.5.1	Importância da cana-de-açúcar.....	19
1.5.2	Sistemas de preparo e qualidade física do solo	22
1.5.3	Sistema radicular da cana-de-açúcar	26
1.6	METODOLOGIA GERAL	31
1.6.1	Área experimental e histórico.....	31
1.6.2	Delineamento experimental e tratamentos	35
1.6.3	Coleta de solo para determinação dos atributos físicos do solo	36
1.6.4	Atributos físicos do solo	36
1.6.5	Atributos químicos do solo.....	37
1.6.6	Estoque de carbono no solo	38
1.6.7	Avaliação do sistema radicular.....	38
1.6.8	Análise estatística	39
1.6.9	Análise de componentes principais (PCA).....	39
2.	ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E SISTEMA RADICULAR DA CANA-DE-AÇÚCAR SOB SISTEMAS DE MANEJO DE SOLO NA REFORMA DO CANAVIAL	41
2.1	INTRODUÇÃO.....	42
2.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	43
2.2.1	Área experimental e histórico.....	43
2.2.2	Delineamento experimental e tratamentos	47
2.2.3	Coleta de solo para determinação dos atributos físicos do solo	47
2.2.4	Atributos físicos do solo	48
2.2.5	Avaliação do sistema radicular.....	49
2.2.6	Estoque de carbono no solo	49
2.2.7	Análises dos resultados.....	50
2.3	RESULTADOS	50

2.3.1	Atributos físicos do solo	50
2.3.2	Estoque de carbono orgânico no solo	56
2.3.3	Biomassa seca radicular.....	57
2.4	DISCUSSÃO	58
2.4.1	Atributos físicos do solo	58
2.4.2	Estoque de carbono e Sistema radicular	60
2.5	CONCLUSÕES	62
3.	QUALIDADE DO SOLO NO CULTIVO DA CANA-DE-AÇÚCAR EM MANEJOS CONSERVACIONISTA E CONVENCIONAL DO SOLO	64
3.1	INTRODUÇÃO.....	65
3.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	67
3.2.1	Área experimental e histórico.....	67
3.2.2	Delineamento experimental e tratamentos	70
3.2.3	Coleta de solo para determinação dos atributos físicos do solo	70
3.2.4	Atributos físicos do solo	71
3.2.5	Atributos químicos do solo.....	72
3.2.6	Estoque de carbono no solo	72
3.2.7	Avaliação do sistema radicular.....	73
3.2.8	Análises dos resultados.....	74
3.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	74
3.3.1	Correlação entre as variáveis e análise de componentes principais (PCA).74	
3.4	CONCLUSÕES	80
4.0	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81

1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

1.1 ORGANIZAÇÃO DA TESE

Esta tese está organizada na forma de três capítulos, o primeiro capítulo é uma apresentação da introdução e justificativa do projeto, objetivo geral e específico, revisão bibliográfica e a metodologia geral do projeto. Os outros capítulos representam dois artigos realizados a partir dos dados obtidos durante o estudo.

O segundo capítulo avalia os efeitos dos diferentes preparos do solo nos atributos físicos, estoque de carbono no solo e crescimento radicular da cultura da cana-de-açúcar durante os dois ciclos avaliados. O terceiro avalia o comportamento dos atributos físicos e químicos, estoque de carbono do solo e biomassa seca radicular ao longo do primeiro ciclo da cana-de-açúcar (cana planta).

1.2 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é uma das culturas comerciais mais importantes que fornece subprodutos essenciais, como açúcar, etanol, melaço e bagaço (SIPAÚBA-TAVARES *et al.*, 2020). Os dez maiores países produtores de cana-de-açúcar do mundo incluem Brasil, Índia, China, Tailândia, Paquistão, México, Colômbia, Indonésia, Filipinas e Estados Unidos (IBGE, 2022). Um dos principais impulsionadores da degradação do solo é a mudança no uso da terra (CHERUBIN *et al.*, 2021a), um exemplo comum de mudança do uso da terra no Brasil e a conversão das pastagens em áreas de cana-de-açúcar (CHERUBIN *et al.*, 2021a). De acordo com Adami *et al.* (2012) a expansão da cana-de-açúcar tem pouco ou nenhum papel como impulsionador do desmatamento direto no Brasil. A plantação total de cana-de-açúcar cobre apenas 3,6% das terras agrícolas brasileiras (agricultura + pastagem) e 15,7% das terras agrícolas totais do país (MAPBIOMAS, 2020).

Porém, a mudança de uso da terra é uma das maiores ameaças à qualidade do solo (BONILLA-BEDOYA *et al.*, 2017; CANISARES *et al.*, 2020; CHERUBIN *et al.*, 2021a), pois pode ter impactos significativos na biodiversidade do solo (FRANCO *et al.*, 2016), armazenamento de carbono (MELLO *et al.*, 2014) e serviços ecossistêmicos (FOLEY *et al.*, 2011). Mas no Brasil a expansão da cana-de-açúcar vem ocorrendo em áreas de pastagens extensas e degradadas (ADAMI *et al.*, 2012; STRASSBURG *et al.*, 2014). Então o processo de diminuição da qualidade estrutural do solo em áreas de cana-de-açúcar está associado ao manejo intensivo do solo (ESTEBAN *et al.*, 2019; CHERUBIN *et al.*, 2021a).

No entanto, a mecanização intensiva utilizada nos canaviais, incluindo preparo do solo por aração e gradagem e tráfego de máquinas pesadas durante a colheita mecânica, degrada a estrutura do solo, afetando múltiplos processos e funções nesses solos (CHERUBIN *et al.*, 2016; RABOT *et al.*, 2018; GUIMARÃES JÚNNYOR *et al.*, 2019a; AWE *et al.*, 2020; LOVERA *et al.*, 2021; LUZ *et al.*, 2022). O tráfego intensivo no campo aumenta a compactação do solo, diminui a porosidade e restringe o movimento do ar e da água, afetando assim o crescimento das raízes e o rendimento das culturas (ESTEBAN *et al.*, 2019; GUIMARÃES JÚNNYOR *et al.*, 2019b; LOVERA *et al.*, 2021; LUZ *et al.*, 2022; OLIVEIRA *et al.*, 2022).

Associado ao intenso uso da terra, a maior parte das áreas atualmente cultivadas com cana-de-açúcar são manejadas sob sistemas convencionais de manejo do solo e monocultura (MARTÍNI *et al.*, 2020; LIMA *et al.*, 2022). No entanto, esse manejo tem sido motivo de preocupação, pois promove a degradação da qualidade do solo, incluindo a qualidade física (CHERUBIN *et al.*, 2017; SCARPARE *et al.*, 2019; AWE *et al.*, 2020; CANISARES *et al.*, 2020), química (CURY *et al.*, 2014; CHERUBIN *et al.*, 2016) e degradação da qualidade biológica do solo (CHERUBIN *et al.*, 2016; FRANCO *et al.*, 2017). Buscando amenizar a degradação dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo tem-se buscado a implantação de sistemas conservacionistas como o plantio direto e cultivo reduzido em áreas de cana-de-açúcar (BOLONHEZI, 2013; MORAES *et al.*, 2019; SANDHU *et al.*, 2019; TENELLI *et al.*, 2019; AWE *et al.*, 2020).

Aliado aos sistemas conservacionistas recomenda-se o uso de plantas de cobertura e leguminosas na renovação dos canaviais (FARHATE *et al.*, 2022). O crescimento na implementação de plantas de cobertura tem sido proposta para manter a qualidade química e física do solo e recuperar áreas degradadas cultivadas com cana-de-açúcar (POEPLAU; DON, 2015; SALAZAR *et al.*, 2022), dado que protegem o solo da excessiva evaporação de água e da radiação solar, controlam eficientemente as plantas espontâneas e favorecem a infiltração da água no solo, diminuindo o escoamento superficial e consequentemente a erosão, especialmente em áreas com maior inclinação (SOUZA *et al.*, 2020; THOMAZ *et al.*, 2022). Dentre as espécies mais estudadas e cultivadas como plantas de cobertura estão a crotalária, milheto e o sorgo, que apresentam como característica a elevada produção de biomassa, contudo a quantidade pode variar de acordo com as condições edafoclimáticas locais (OTTO *et al.*, 2020; WHITE JUNIOR *et al.*, 2020; FARHATE *et al.*, 2022).

Destaca-se que o alto custo da implementação do canavial somado a crise do setor sucroalcooleiro fez com que novos equipamentos fossem implementados no manejo, dentre eles o *Rip Strip*® (Kelley Manufacturing Co.). Esse equipamento vem sendo testado há três anos para a cultura do amendoim em reforma de canaviais com resultados favoráveis em termos de produtividade, redução da compactação na linha de semeadura e melhoria na uniformidade de emergência (BOLONHEZI *et al.*, 2017; NORONHA, 2018; OLIVEIRA *et al.*, 2022). O *Rip Strip*® realiza preparo em faixas entre 0,20 e 0,46 m de largura por meio de quatro discos corrugados posicionados na vertical e entre 0,25 e 0,45 m de profundidade, por meio de uma haste subsoladora, na linha de plantio.

Em adição, as plantas de cobertura, o entendimento das culturas que substituem o pousio durante o período de entressafra é importante, pois muitas vezes são cultivadas como adubos verdes antes do cultivo da cultura principal (POEPLAU *et al.*, 2015). Sistemas de base conservacionista usam frequentemente a cultura da soja e amendoim devido a sua importância econômica (FILASSI; OLIVEIRA, 2022; PANG *et al.*, 2022). Por isso, em áreas de cultivo da cana-de-açúcar, o uso de um cultivo de soja ou amendoim, no período de reforma do canavial, é prática comum (SILVA; FERNANDES, 2014; SOARES *et al.*, 2017). Portanto, estudos sobre a avaliação da qualidade do solo e o reflexo na produtividade do canavial, por meio dos atributos físicos e químicos do solo e crescimento radicular da cultura em áreas como diferentes preparo do solo e sucessão com o amendoim na reforma do canavial, pode contribuir para melhoria na produtividade e maior sustentabilidade do sistema.

1.3 HIPÓTESE

Propõe-se para essa pesquisa a seguinte hipótese: a adoção de sistemas de manejo do solo, como o plantio direto e preparo reduzido (*Rip Strip*®) para a cultura do amendoim e *Crotalaria ochroleuca* na reforma do canavial, favorecem a qualidade estrutural do solo e crescimento radicular das soqueiras de cana-de-açúcar plantada sem preparo em sucessão, para as condições de Neossolo Quartzarênico.

1.4 OBJETIVO

1.4.1 Objetivo Geral

A pesquisa visa dar continuidade ao estudo iniciado em 2017 para quantificar os efeitos dos sistemas de manejos do solo utilizados para cultivo de amendoim e *Crotalaria ochroleuca* antecedendo à cana-de-açúcar, sobre o crescimento radicular de soqueiras da cana-de-açúcar e avaliar as alterações de atributos físicos e químicos de um Neossolo Quartzarênico.

1.4.2 Objetivos Específicos

- i. Avaliar os efeitos de manejos conservacionistas e convencionais do solo nos atributos físicos e químicos em área de cana-de-açúcar com sucessão ao amendoim.
- ii. Mensurar o sistema radicular das soqueiras de cana-de-açúcar em um Neossolo Quartzarênico com manejos conservacionistas e convencionais do solo.
- iii. Avaliar estoque de carbono no solo em área de cana-de-açúcar com diferentes manejos do solo.

1.5 REVISÃO DE LITERATURA

1.5.1 Importância da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum* ssp.) é uma cultura monocotiledônea, semiperene, pertencente à família Poaceae, que teve sua origem na ilha de Nova Guiné, sudoeste do Oceano Pacífico, e junto com a migração humana foi se espalhando pelo mundo. No Brasil, a cana-de-açúcar foi introduzida pelos portugueses no início do século XVI visando a produção de matéria prima para os engenhos de açúcar, se tornando um dos mais importantes cultivos desenvolvidos no Brasil (UNICA, 2015).

O ciclo produtivo da cana-de-açúcar possui, em média, seis anos com cinco cortes e é caracterizado por quatro estádios principais: brotação ou emergência, perfilhamento, alongação do colmo e maturação (MANHÃES *et al.*, 2015). Após o primeiro corte (cana planta), o canavial é colhido em média mais quatro vezes (cana soca) a partir da rebrota da cana cortada (soqueira), mas vai perdendo seu vigor e produtividade no decorrer do tempo (Tabela 1). Ainda conforme Manhães *et al.* (2015), trata-se de uma planta cultivada comercialmente por propagação vegetativa e pode ser considerada rústica, pois consegue se desenvolver mesmo em condições adversas.

Durante o ciclo da cana-de-açúcar, ocorrem as fases de preparo do solo, espaçamento da cultura, época de plantio, tratos culturais e colheita nas quais são transportados fertilizantes, defensivos químicos, mudas, palhico e colmos para moagem, em ordem crescente de intensidade de tráfego pela quantidade de massa movimentada (KELLER *et al.*, 2019). O tráfego de tratores, colhedoras, implementos e veículos de transporte utilizados nas referidas fases contribuem para a compactação do solo, tornando necessárias operações pesadas como subsolagem, aração ou gradagem para sua desagregação (SILVA *et al.*, 2016; ESTEBAN *et al.*, 2019; GUIMARÃES JÚNNYOR *et al.*, 2019b).

Tabela 1. Produtividade média da cana-de-açúcar de acordo com a idade (quantidade de cortes) de cada talhão.

Corte	Produtividade (t ha ⁻¹)
Cana planta	-
1º corte	120
2º corte	100
3º corte	92
4º corte	81
5º corte	73
Demais cortes	66

Fonte: Santos e Borém (2016).

Do ponto de vista econômico, a cultura da cana-de-açúcar apresenta uma significativa importância na economia dos países que a produzem, passando a ser o foco das atenções mundiais por ser matéria-prima na produção de açúcar, bioeletricidade e etanol, sendo este último uma opção de combustível menos poluente que os combustíveis fósseis, além de ser renovável (BORDONAL *et al.*, 2018; BRINKMAN *et al.*, 2018; WIESBERG *et al.*, 2021). O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar com uma produção de 633 milhões de toneladas na safra de 2017/18, seguido pela Índia, China, Tailândia, Paquistão, México e Colômbia (SIPAÚBA-TAVARES *et al.*, 2020; IBGE, 2022).

Desde que foi introduzida no Brasil, pelo português Martim Afonso de Souza que trouxe mudas originárias da Ilha das Madeiras, construindo as Capitâneas Hereditárias de São Vicente (São Paulo) que foi o primeiro engenho do Brasil (FIGUEIREDO, 2008),

a cultura canavieira tem impulsionado a economia nacional. Nogueira e Garcia (2013) afirmam que o sistema agroindustrial da cana-de-açúcar é um dos mais tradicionais do Brasil, se constituindo na mais antiga atividade econômica do país. Atualmente, a cultura é responsável por aproximadamente 1,8% do PIB nacional, apresentado significativos aumentos de produtividade com ganhos de até 35%, além de ser um dos setores que mais gera empregos diretos e indiretos no país (LANDELL *et al.*, 2016; CONAB, 2022; IBGE, 2022).

A produção de cana no Brasil cresceu de forma acelerada após criação do Programa Nacional do Alcool (Proálcool), em novembro de 1975, que visava substituir a gasolina pelo álcool etílico carburante, passando de um patamar de pouco menos de 100 milhões de toneladas por ano para 598,3 milhões de toneladas por ano, em 2022/23. Em 2003, foram lançados no mercado nacional os veículos flex fuel, o qual também impulsionou a produção de cana-de-açúcar, para atender ao aumento da demanda de álcool hidratado, fazendo com que houvesse um significativo aumento no número de usinas produtoras de etanol (destilarias), principalmente no oeste do estado de São Paulo e seu entorno (CONAB, 2022).

Entretanto, em 2016 e 2017, o setor sucroenergético passou por uma crise econômica que abalou a indústria do açúcar e etanol, quando os canaviais deixaram de passar pelos tratos culturais adequados para o bom desenvolvimento da lavoura juntamente com a crise política iniciada a partir de 2014 e 2015. Nesse mesmo ano-safra, a produção sofreu as consequências da seca que prejudicou a rebrota da cana, porém, melhores regimes de chuvas do ano de 2016 e 2017 favoreceram o cenário que, já se esperava como negativo, onde algumas usinas até projetavam postergar o início da safra de 2016 (TREVISAN; MOSCHINI, 2018).

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, respondendo por 36% da produção global e da área colhida, é também o maior produtor e exportador de açúcar e o segundo maior produtor de etanol ficando atrás somente dos Estados Unidos (FAO, 2023). Na safra 2022/2023, a área colhida no país foi de 8,31 milhões de hectares, com produção de 598,35 milhões de Mg de cana-de-açúcar e produtividade de 72,03 Mg ha⁻¹ (CONAB, 2022).

Na atualidade o sistema de produção tem eliminado a queima antecessora à colheita e os problemas ambientais tomam novos rumos. A cana-de-açúcar é mecanizada em todas as etapas da cultura, desde o estágio de plantio até a colheita da cana crua (DE MARIA *et al.*, 2016; AWE *et al.*, 2020), com mais de 30 operações mecanizadas em um

mesmo talhão ao longo de ciclo de produção (DE MARIA *et al.*, 2016). Contudo, essa intensa mecanização tem levado ao aumento da compactação, pisoteio das soqueiras, surgimento de novas pragas e a estagnação na produtividade de colmos (ESTEBAN *et al.*, 2019; GUIMARÃES JÚNNYOR *et al.*, 2019a; CHERUBIN *et al.*, 2021b). Neste cenário, há um crescente interesse na cultura canavieira, de adoção de sistemas de manejo que reduzam as alterações estruturais ocasionadas pela compactação do solo, minimizando o processo de degradação e que contribuam para aumentar a produtividade da cultura.

1.5.2 Sistemas de preparo e qualidade física do solo

O sistema de produção da cana-de-açúcar envolve diversas operações e atividades que são realizadas desde a sistematização inicial do terreno até a última colheita que antecede a reforma do canavial (JUNQUEIRA; MORABITO, 2019). Atualmente, a cana-de-açúcar se constitui como uma cultura totalmente mecanizada, desde o plantio até a colheita, passando pelas fases intermediárias de tratos culturais e demais operações, onde prevê-se que mais de 30 operações ocorram num mesmo talhão ao longo de cinco cortes (DE MARIA *et al.*, 2016).

Durante muito tempo o cultivo da cana-de-açúcar foi caracterizado pela queima e corte manual, com uma média de três a quatro cortes. Entretanto, no início da década de 80, o número de cortes do canavial aumentou, devido principalmente ao surgimento de variedades melhoradas e a expansão do plantio de cana-de-açúcar, além da exigência ambiental para a eliminação das queimadas, fazendo com que a colheita mecanizada fosse uma realidade cada vez mais presente. Foi então que na década de 90 a cana passou a ser colhida de forma mecanizada e sem utilização de fogo (BORDONAL *et al.*, 2018).

Posteriormente, em 19 de setembro de 2002, a Lei Estadual Paulista nº 11.241 determinou prazos para a eliminação gradativa da queima da palhada da cana-de-açúcar em áreas mecanizáveis, com declividade até 12%, tendo início em 2002 com 20% de eliminação da queima, até 2021 com a eliminação total da queima; e em áreas não mecanizáveis, com declividade superior a 12%, tendo início em 2011 com 20% de eliminação da queima, até 2031 com a eliminação total da queima (SILVA *et al.*, 2012).

O emprego de maquinários facilita as operações em campo, aumentando os rendimentos e a longo prazo reduz os custos de produção (JUNQUEIRA; MORABITO, 2019). Porém, o uso constante desses implementos agrícolas e em condições não

favoráveis acabam refletindo negativamente sobre a qualidade física do solo, levando a problemas relacionados com a degradação dos atributos físicos do solo e, consequentemente, uma diminuição na produtividade e longevidade da cultura (SOUZA *et al.*, 2015; SILVA *et al.*, 2016; ESTEBAN *et al.*, 2019; GUIMARÃES JÚNNYOR *et al.*, 2019a; ZHAO *et al.*, 2019; LIMA *et al.*, 2022). Problemas relacionados a compactação do solo são cada vez mais recorrentes em áreas de canavial, uma vez que o intenso tráfego de máquinas no campo e em condições de umidade inadequada torna-se um fator desfavorável na estrutura do solo (CHERUBIN *et al.*, 2016; SIVARAJAN *et al.*, 2018; CAVALCANTI *et al.*, 2019).

O preparo de solo que ainda prevalece no cultivo da cana-de-açúcar no Brasil é o convencional (CERRI *et al.*, 2011; MARTÍNI *et al.*, 2020; LIMA *et al.*, 2022). Esse tipo de preparo caracteriza-se pelo uso intensivo de mecanização, bem como o uso de arados, grades e subsoladores, com o objetivo de eliminar ou atenuar problemas físicos, químicos e/ou biológicos e restos vegetais da cultura (DE MARIA *et al.*, 2016; TELLES *et al.*, 2018; SHUKLA *et al.*, 2021). Porém, esse sistema de produção promove modificações nos atributos físicos do solo, resultando em diminuição da porosidade, aumento da densidade do solo e da resistência do solo à penetração devido a compactação que é crescente ao longo das safras (CASTIONI *et al.*, 2021; CHERUBIN *et al.*, 2021b; JIMENEZ *et al.*, 2021; OLIVEIRA *et al.*, 2022).

Essa compactação, além de limitar o crescimento das raízes, reduz a infiltração de água no solo, permitindo com isso o aumento do processo erosivo (LOVERA *et al.*, 2021; BEZERRA *et al.*, 2020; THOMAZ *et al.*, 2022). Sabe-se que quanto maior for o volume de água infiltrado no solo, menor será o volume de enxurrada a ser escoado sobre a superfície. Nesse contexto, o preparo do solo deve visar entre outras coisas, melhorar as condições de infiltração da água no solo e, como consequência, diminuir o escoamento da enxurrada (SOUZA *et al.*, 2014; MARASCA *et al.*, 2015; DE MARIA *et al.*, 2016; GOMES *et al.*, 2019).

Para aliviar os impactos deletérios do intenso tráfego de máquinas, o preparo convencional com intensa mobilização do solo tem sido adotado uma vez a cada 5-6 anos durante a reforma do canavial. No entanto, o preparo convencional induz a perda de macroagregados ricos em carbono (SIX *et al.*, 2000) e reduz a capacidade de suporte do solo (MORAES *et al.*, 2019), tornando-o assim mais suscetível à recompactação sob o tráfego subsequente de máquinas (SILVA *et al.*, 2016; GUIMARÃES JÚNNYOR *et al.*, 2019b). Segundo Barbosa *et al.* (2019), a eficácia do preparo convencional na promoção

de melhores condições físicas do solo não dura mais do que o segundo ano de cultivo da cana-de-açúcar, e então a compactação do solo sob solos arados atinge níveis semelhantes aos observados anteriormente às práticas de preparo, principalmente nas áreas trafegadas nas entrelinhas.

As condições do solo apresentam influência direta nas reações químicas e biológicas que ocorrem no sistema solo-planta e, por esse motivo, é fundamental a busca de alternativas, dentre práticas e manejos, que minimizem os riscos de compactação e os danos na estrutura do solo, o que prejudica a absorção de água e nutrientes e promove decréscimos no rendimento da produção de cana-de-açúcar (SOUZA *et al.*, 2014; TENELLI *et al.*, 2019; AWE *et al.*, 2020; LUZ *et al.*, 2022). Desta forma, manejos ditos conservacionistas se constituem como uma alternativa contra a degradação do solo como, por exemplo, o cultivo mínimo e o plantio direto. O cultivo mínimo pode ser definido como aquele que proporciona menor número de operações que o preparo convencional, com menor mobilização do solo e redução das perdas de solo e água (NAGAHAMA *et al.*, 2016; AWE *et al.*, 2020).

Segundo Buhler (1995), o cultivo mínimo proporciona boa preservação dos recursos ambientais, mantendo no mínimo 30% da superfície do solo coberta com palha, entre o período compreendido da colheita da cultura anterior e a implantação da próxima cultura. Nagahama *et al.* (2016) consideram o preparo mínimo por meio da escarificação um dos manejos que menos altera a estrutura do solo, contribuindo para a redução de problemas relacionados à compactação de forma mais localizada e ainda favorece o aumento da porosidade e a diminuição da densidade do solo. Shukla *et al.* (2020) estudando a produtividade da cana-de-açúcar utilizando a tecnologia de cultivo mínimo por meio da subsolagem, verificaram que o preparo mínimo por subsolagem melhorou significativamente a produtividade da cana-de-açúcar (96,32 Mg ha⁻¹) e do açúcar (12,14 Mg ha⁻¹) em relação ao preparo convencional com arado de aiveca.

Em meio a toda discussão à cerca de sistemas conservacionistas do solo e a constante busca por inovações, um implemento que vem sendo muito utilizado nos Estados Unidos, tem despertado grande atenção no Brasil. O *Rip Strip*® é um equipamento de preparo do solo que promove, em uma única passada, o preparo localizado da linha de semeadura sobre a palhada (com espaçamento entre hastes regulável entre 0,76 m e 1,02 m) por meio do corte simultâneo dos restos da cultura anterior e, o revolvimento do solo mediante escarificação. O equipamento é composto por seis diferentes componentes, sendo cada um deles responsável por uma função específica:

(1) disco de corte - responsável por cortar a palhada da cultura anterior; (2) discos dentados - remove a palhada da linha para posterior semeadura; (3) haste/ponteira - função de mobilização do solo; (4) discos corrugados - trabalham na área do solo mobilizado pela haste; (5) discos ondulados - quebra dos torrões formados pela haste; e (6) rolo destorreador/nivelador - nivelamento da faixa preparada (FURLANI *et al.*, 2015).

Ainda conforme Furlani *et al.* (2015), este equipamento pode ser utilizado para o preparo da área na implantação de várias culturas, sendo apenas necessárias algumas regulagens em seus componentes. Com isso, a utilização deste implemento no preparo do solo torna-se viável em diversos aspectos, trazendo benefícios tanto ao produtor quanto ao solo, como redução do número de operações e consequente diminuição de custos, proporcionando proteção contra erosão e perda de umidade, dentre outras vantagens.

O sistema plantio direto (SPD) é considerado como um conjunto de técnicas conservacionistas que revolucionaram a agricultura brasileira, além de ser um sistema com capacidade para melhorar a sustentabilidade do meio ambiente agrícola (DERPSCH *et al.*, 2014; FUENTES-LLANILLO *et al.*, 2021). Esse sistema de cultivo apresenta como vantagens a redução da erosão do solo, ciclagem de nutrientes, armazenamento de água, melhorias das condições fitossanitárias da cultura e qualidade física, química e microbiológica do solo (MATEUS *et al.*, 2016; TELLES *et al.*, 2018; AWE *et al.*, 2020). De acordo com Cassol *et al.* (2007) e Almeida *et al.* (2016), o SPD em grãos é constituído por práticas que envolvem a rotação de culturas, mobilização mínima do solo exclusivamente na linha de semeadura e cobertura permanente do solo, resultando na melhoria e aumento da biodiversidade do solo, decomposição de espécies vegetais, conservação do solo e aumento da capacidade produtiva do solo sob as culturas.

Entretanto, devido a cana-de-açúcar se tratar de uma cultura semiperene, onde ocorre o cultivo de sucessivos ciclos (socas) na mesma área de produção (monocultura), o qual está associado ao tráfego de máquinas pesadas durante a colheita da cana-de-açúcar, são atingidos elevados níveis de compactação do solo no momento da renovação do canavial que restringem a adoção do plantio direto em áreas de cana-de-açúcar (ARRUDA *et al.*, 2016; BORDONAL *et al.*, 2018). Em concordância, Arruda *et al.* (2016), avaliaram a influência do preparo do solo na densidade e porosidade do solo e, verificaram que independentemente do sistema de preparo do solo, há uma redução no volume total de poros e macroporosidade do solo durante o ciclo de produção da cana

soca, além de aumento da densidade do solo na camada de 0,40-0,60 m, sendo indícios de compactação.

Outro fator que dificulta a adoção do plantio direto em lavouras de cana-de-açúcar está relacionado ao tamanho do sulco de plantio, o qual perturba aproximadamente 30% da superfície do solo (0,00-0,30 m) dificultando a adoção do princípio relacionado a ausência de revolvimento do solo em sua totalidade (BORDONAL *et al.*, 2018; MAZARON *et al.*, 2022). Por outro lado, estudos recentes mostram que a adoção de um sistema plantio direto em um canavial aumenta os estoques de carbono do solo em comparação com o preparo convencional (BORDONAL *et al.*, 2018; TENELLI *et al.*, 2019), que oferece vários benefícios para a saúde do solo e o crescimento das culturas. Apesar disso, a compactação do solo causada pelo intenso tráfego de máquinas reduz esses benefícios associados à adoção do sistema plantio direto (BARBOSA *et al.*, 2021).

Diante do que foi exposto, a adoção de manejos do solo menos intensivo e mais conservacionistas como é o caso do cultivo mínimo e plantio direto, aliados a planta de cobertura e rotação de cultura, traz benefícios para a qualidade estrutural e manutenção do teor de água no solo, criando condições favoráveis para o crescimento do sistema radicular da cultura, tendo como resultado plantas saudáveis, produtivas e a sustentabilidade do sistema.

1.5.3 Sistema radicular da cana-de-açúcar

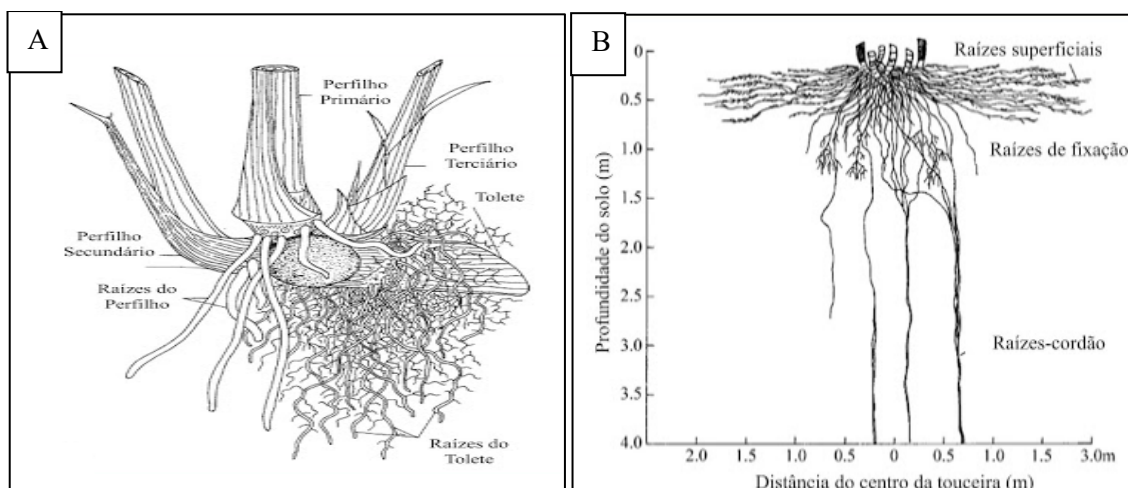
Conforme Smith *et al.* (2005), é de fundamental importância o conhecimento da distribuição do sistema radicular, para assim entender os processos de absorção de água e nutrientes pela planta e com isso aplicar o adequado manejo agrônomo para a cultura. Dentre as funções do sistema radicular, destacam-se: a sustentação da planta, absorção e transporte de água e nutrientes, manutenção de reservas e resistência a estresses.

A forma como a planta distribui o seu sistema radicular pelo perfil do solo e a interação do genótipo e do ambiente têm influência direta com alguns mecanismos, como: a tolerância a seca, capacidade de germinação e/ou brotação, porte da planta (ereto ou decumbente), tolerância à movimentação de máquinas, eficiência na absorção dos nutrientes do solo, tolerância a problemas fitossanitários etc. (LIRA *et al.*, 2019). A produtividade final, por sua vez, depende destes mecanismos (VASCONCELOS; CASAGRANDE, 2008). De acordo com Medina *et al.* (2002), Bengough *et al.* (2011) e

Moraes *et al.* (2019) quanto maior for o enraizamento da planta, maior será a capacidade dela de explorar o solo e assim absorver nutrientes, oxigênio e água.

O sistema radicular da cana-de-açúcar pode ser classificado em raízes dos toletes e raízes dos perfilhos (Figura 1A). As raízes do tolete são as primeiras a se desenvolverem, normalmente entre 15 a 30 dias após o plantio, com a função de promover o crescimento inicial das plantas, principalmente a formação dos perfilhos. Após isso, essas raízes perdem sua função e senescem (entre 60 e 90 dias). Estas então são substituídas pelas raízes dos perfilhos que serão as responsáveis por absorver água e nutrientes para as plantas até o final do ciclo da cultura. Cada perfilho possui o seu próprio sistema radicular (SMITH *et al.*, 2005).

Figura 1. Representação do sistema radicular da cana-de-açúcar. A – Raízes dos toletes e perfilhos; B – Raízes superficiais, de fixação e raízes-cordão. Fonte: Adaptado de Smith *et al.* (2005).

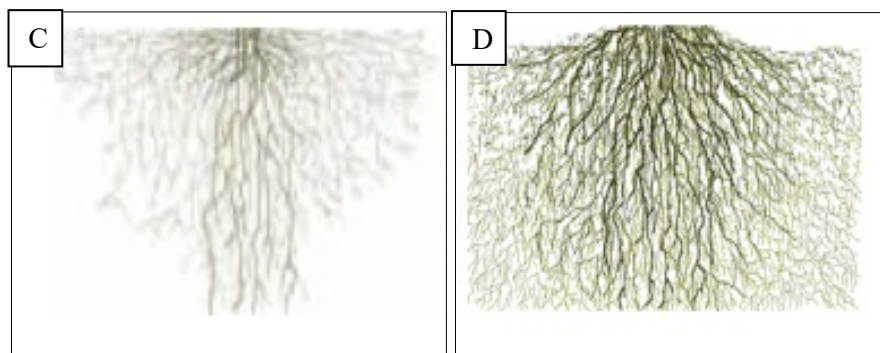


Ainda conforme Smith *et al.* (2005), as raízes dos perfilhos são divididas em raízes superficiais, raízes de fixação e raízes-cordão (Figura 1B). As raízes superficiais são responsáveis por fornecer água e nutrientes para a planta nas camadas mais superficiais do solo e podem ser encontradas até 0,75 m de profundidade. As raízes de fixação auxiliam principalmente na ancoragem dos colmos ao solo, podendo ser encontradas até a profundidade de 1,5 m. Já as raízes-cordão, tem por função fornecer água para as plantas das camadas mais profundas do solo, podendo atingir até 4,0 m de profundidade.

Segundo Vasconcelos e Garcia (2005), a arquitetura do sistema radicular também sofre alterações de acordo com a idade da planta, tanto entre ciclos (cortes) como

dentro de um mesmo ciclo (meses de desenvolvimento). O sistema radicular da cana planta explora mais intensamente as camadas mais superficiais do solo, se comparada à soqueira, que apresenta um incremento na exploração de subsuperfície (Figuras 2C e 2D). Embora a cana planta apresente menor quantidade de raízes que as soqueiras, sua eficiência de absorção por unidade de superfície é maior, pois apresenta um conjunto de raízes mais novas e mais tenras que as soqueiras, que têm um sistema com uma proporção maior de raízes mais velhas e lignificadas e cuja manutenção compete mais com a parte aérea por energia. Isso pode ser uma das causas relacionadas com a queda que ocorre na produtividade do canavial no decorrer dos cortes.

Figura 2. Distribuição do sistema radicular da cana planta (C) comparada à distribuição em cana soca (D). Fonte: Vasconcelos e Garcia (2005).



Quando o solo se encontra em condições desfavoráveis, que são restritivas ao bom desenvolvimento de raízes, a cultura não consegue expressar todo seu potencial, acarretando baixas produtividades (LOVERA *et al.*, 2021). Essa condição do solo pode ter interferência de três fatores: biológico, químico e físico (COSTA *et al.*, 2007). Nesse sentido, as raízes da cana-de-açúcar têm diferentes demandas para seu pleno crescimento, tais como: o teor de nutrientes, qualidade dos atributos físicos e umidade do solo, que podem influenciar no crescimento radicular da planta. Entretanto, verifica-se poucos trabalhos em que a variação do crescimento radicular da cana-de-açúcar é avaliada, motivado principalmente, pela dificuldade de avaliação e a variabilidade dos resultados obtidos em condição de campo (OTTO *et al.*, 2009).

A exemplo dos atributos físicos, a densidade do solo é um dos atributos que mais interferem no desenvolvimento radicular. Segundo Veihmeyer e Hendrickson (1948), a densidade que possibilita a penetração de raízes é de $1,46 \text{ kg dm}^{-3}$ em solo argiloso e $1,75 \text{ kg dm}^{-3}$ em solo arenoso. O aumento na densidade ocorre à medida que

diminui a macroporosidade, aeração e condutividade hidráulica do solo. Como consequência ocorre o aumento na resistência do solo à penetração, inibindo o crescimento de raízes e limitando assim a absorção de nutrientes pelas plantas (VASCONCELOS; GARCIA, 2005; LOVERA *et al.*, 2021).

Prova disso, é o estudo realizado por Barbosa *et al.* (2018) que ao avaliar a distribuição das raízes e produção de cana-de-açúcar em áreas sob solo de textura arenosa e argilosa, observaram que o crescimento radicular da cultura foi limitado por valores de resistência do solo à penetração a partir de 2,5 MPa e densidade do solo de 1,25 kg m⁻³ para o solo de textura argilosa, enquanto que para o solo de textura arenosa, os valores limites para o crescimento radicular foram de 1,5 MPa e 1,70 kg m⁻³, para resistência do solo à penetração e densidade do solo, respectivamente.

Segundo Sampaio *et al.* (1987), nos primeiros 0,20 m da superfície do solo, concentram-se aproximadamente 75% das raízes da cana-de-açúcar. Para compreender melhor o sistema radicular da cana-de-açúcar, é importante estudar o que ocorre além da parte aérea, levando em consideração a área de subsuperfície do solo. A inibição do desenvolvimento radicular causada por compactação e eventual degradação do solo, é relatada em diversos estudos como prejudicial para crescimento da planta (CASTIONI *et al.*, 2018; BARBOSA *et al.*, 2019; ESTEBAN *et al.*, 2019; GUIMARÃES JÚNNYOR *et al.*, 2019a; AWE *et al.*, 2020).

Em um Latossolo Vermelho distrófico típico, Otto *et al.* (2009) estudando a cultivar SP 81-3250, verificaram 65% das raízes concentradas nos primeiros 0,20 m de profundidade e 80% distribuídas no volume compreendido nos 0,60 m centrais da linha de plantio (0,30 m de cada lado) até uma profundidade de 0,60 m. Nas mesmas condições de estudo, Otto *et al.* (2011) avaliando o efeito da compactação do solo na distribuição de raízes em área com colheita mecanizada, observaram que a densidade do sistema radicular da cana-de-açúcar decresce exponencialmente com a profundidade e distanciamento da planta. O crescimento das raízes não foi afetado por valores de resistência do solo à penetração até 0,75 MPa, entretanto, para valores de 0,75 a 2,0 MPa ocorreram diminuição no desenvolvimento das raízes e restrição severa a partir de 2,0 MPa.

Avaliando a distribuição do sistema radicular das variedades SP70-1143, SP71-799, SP 71-6163, NA 56-79 e RB 72-5828 em cana planta e soca, em um Latossolo Vermelho Amarelo álico, Korndörfer *et al.* (1989), verificaram 89 a 92% das raízes nos primeiros 0,30 m de profundidade para cana planta e, 85 a 92% das raízes nos primeiros 0,40 m em cana soca e, não observaram diferença entre as variedades. Souza *et al.* (2012)

avaliaram o desenvolvimento radicular de cana-de-açúcar do cultivar RB 85-5453 com espaçamentos simples, em um Latossolo Vermelho distrófico típico álico e, observaram maior densidade radicular quando a cultura foi manejada com colheita mecanizada com controle de tráfego, piloto automático e ajuste de bitola em relação ao manejo sem controle de tráfego.

Além do mais, a pressão exercida pelo tráfego contínuo de máquinas na área aumenta a resistência do solo à penetração, afetando negativamente o crescimento radicular da cana-de-açúcar (MARASCA *et al.*, 2015). Esteban *et al.* (2019), trabalhando com controle de tráfego em área cultivada com cana-de-açúcar sob condições de um Latossolo, observaram que os tratamentos usando o controle de tráfego apresentaram menor resistência do solo à penetração e densidade do solo, promovendo um desenvolvimento adicional do sistema radicular, permitindo ganhos no rendimento da cana-de-açúcar.

A disponibilidade hídrica do solo tem relação direta com a morte ou renovação do sistema radicular da cana-de-açúcar, em caso de renovação, as raízes se mantêm em atividade após um tempo de corte da cana planta, e durante esse período, de forma lenta e gradual, são substituídos por novas raízes (FARONI; TRIVELIN, 2006). O estudo do sistema radicular é importante para adequar o manejo e proporcionar à cultura, uma estabilidade de desenvolvimento durante todo o seu ciclo, com disponibilidade hídrica e de nutrientes necessária (SINGELS *et al.*, 2019; MAZAREI *et al.*, 2020; YUGUDA *et al.*, 2020).

Estudando a influência de diferentes manejos sob os atributos físicos do solo e no crescimento radicular associado à disponibilidade de água para cana-de-açúcar, Scarpate *et al.* (2019), verificaram que a maior densidade radicular da cana-de-açúcar foi observada na camada superficial do solo, podendo ser um mecanismo utilizado pelas plantas que se desenvolvem em solo com umidade baixa, para que dessa forma seja possível a absorção da água da chuva por elas.

Nesse sentido, a porosidade, densidade e resistência do solo à penetração são importantes atributos utilizados para avaliar o crescimento radicular da cultura, e o manejo de implantação do canavial também deve ser levado em consideração nesse estudo. Se o preparo do solo é realizado de maneira adequada, proporcionando melhorias nos atributos do solo, o crescimento e desenvolvimento das raízes é beneficiado de forma a trazer longevidade aos canaviais, favorecendo a produtividade (BARBOSA *et al.*, 2018; ARCOVERDE *et al.*, 2019; AWE *et al.*, 2020; LIMA *et al.*, 2022).

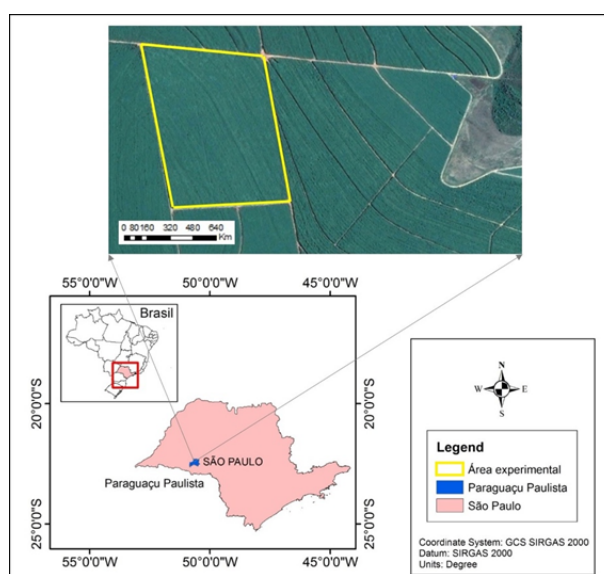
1.6 METODOLOGIA GERAL

O estudo teve início em 2017, instalado e coordenado pelo IAC por meio de financiamento da Fundação AGRISUS e do CNPq, onde ocorreram o plantio e colheita do amendoim e, plantio de cana-de-açúcar, visando avaliar respostas referentes à cultura da cana-de-açúcar por dois ciclos, tendo em vista a influência do plantio de amendoim ano após ano. Todas as coletas aqui descritas foram realizadas em parceria com a fazenda Agroterenas (Paraguaçu Paulista-SP).

1.6.1 Área experimental e histórico

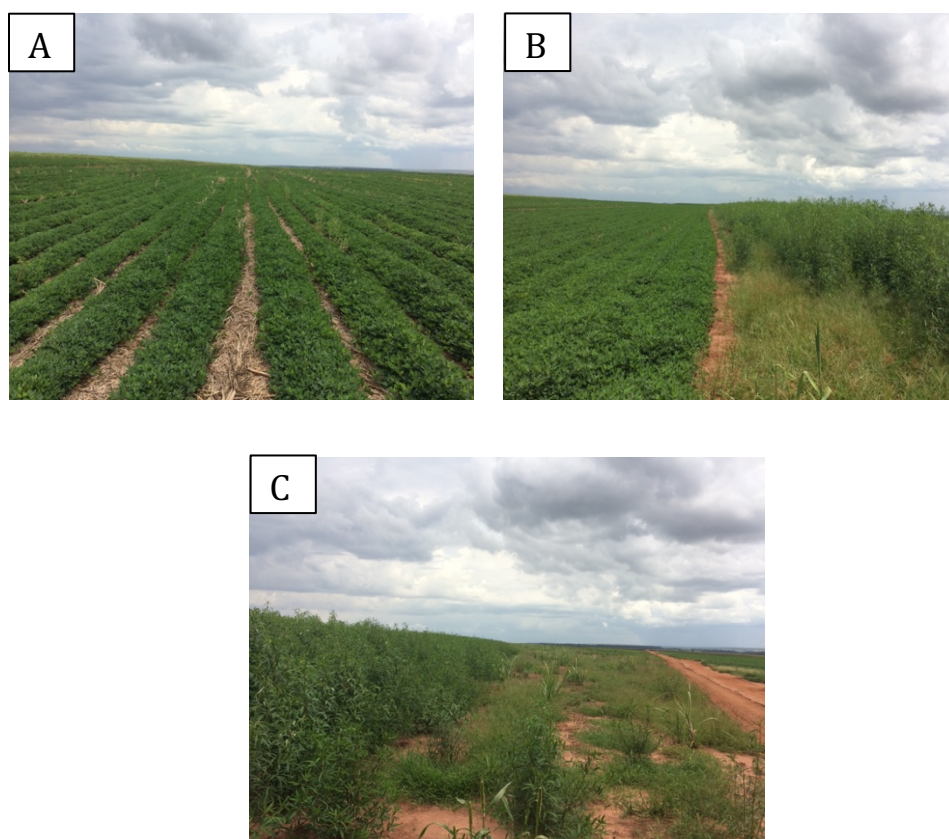
O estudo foi conduzido nas dependências da Fazenda Agroterenas, localizada no município de Paraguaçu Paulista, Estado de São Paulo, Brasil, nas seguintes coordenadas geográficas: 22°24'53" de latitude sul e 50°34'35" de longitude oeste com 420 m de altitude (Figura 3). O clima da região é classificado, segundo Köppen, como Cwa, temperado úmido com inverno seco e verão quente, e apresenta precipitação anual entre 1.430 e 1.517 mm e temperatura média anual de 22 °C (ALVARES *et al.*, 2013). O solo da área foi classificado como Neossolo Quartzarênico órtico típico, álico, textura arenosa, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SBCS) (SANTOS *et al.*, 2018) ou, como Entisols Quartzipsamments de acordo com o Soil Taxonomy System (SOIL SURVEY STAFF, 2014).

Figura 3. Localização da área experimental de cana-de-açúcar em Paraguaçu Paulista, São Paulo, Brasil.



A área experimental consiste em um canavial de 10,0 ha com histórico de 7 cortes mecanizados e sem queima. Anteriormente ao plantio da cana-de-açúcar, a área foi cultivada com amendoim em semeadura direta sobre palhiço, adubo verde e uma faixa deixada em pousio desde dezembro de 2016. Como práticas corretivas, foram aplicados 1,7 Mg ha⁻¹ de calcário dolomítico (PRNT 85%), 1,0 Mg ha⁻¹ de gesso agrícola e 350 Mg ha⁻¹ de fosfato, os quais foram incorporados nos sistemas de manejo de solo convencional e deixados sobre palhada nos sistemas conservacionistas.

Figura 4. Tratamentos de manejo utilizados na área experimental em Paraguaçu Paulista, São Paulo, Brasil. A = Faixas com amendoim na semeadura direta aos 120 dias; B = Amendoim cultivado no sistema *Rip Strip*® ao lado da faixa com *Crotalaria ochroleuca* (direita); C = *Crotalaria ochroleuca* ao lado do plantio convencional (direita). Fonte: Denizart Bolonhezi.



Após, foram instalados os tratamentos de preparo do solo: T1- preparo convencional com grade aradora, subsolagem e pousio; T2- adubo verde com semeadura de *Crotalaria ochroleuca*; T3- preparo reduzido com *Rip Strip*® e semeadura de amendoim; T4- semeadura direta de amendoim. É importante esclarecer que os preparos do solo foram realizados para a cultura do amendoim e nenhum foi realizado previamente

ao plantio da cana-de-açúcar. A distribuição dos tratamentos está apresentada na Figura 4.

O plantio do amendoim foi realizado no dia 26 de novembro de 2016 com a utilização de uma semeadora Baldan SPA Megaflex Air e um trator Valtra, modelo BM 125i, 132 cv, utilizando 110 kg ha⁻¹ de sementes, nesta mesma ocasião ocorreram as operações de preparo de solo. O plantio da *Crotalaria ochroleuca* ocorreu em linhas por meio de uma semeadora de plantio direto de nove Linhas, Baldan Modelo Solo gráfico 4500 e um trator Valtra, modelo BM 125i, 132 cv, utilizando 25 kg ha⁻¹ de sementes. A caracterização granulométrica e dos atributos químicos do solo da área encontra-se na Tabela 2.

Tabela 2. Caracterização granulométrica e química da área experimental de cana-de-açúcar em Paraguaçu Paulista, São Paulo, Brasil.

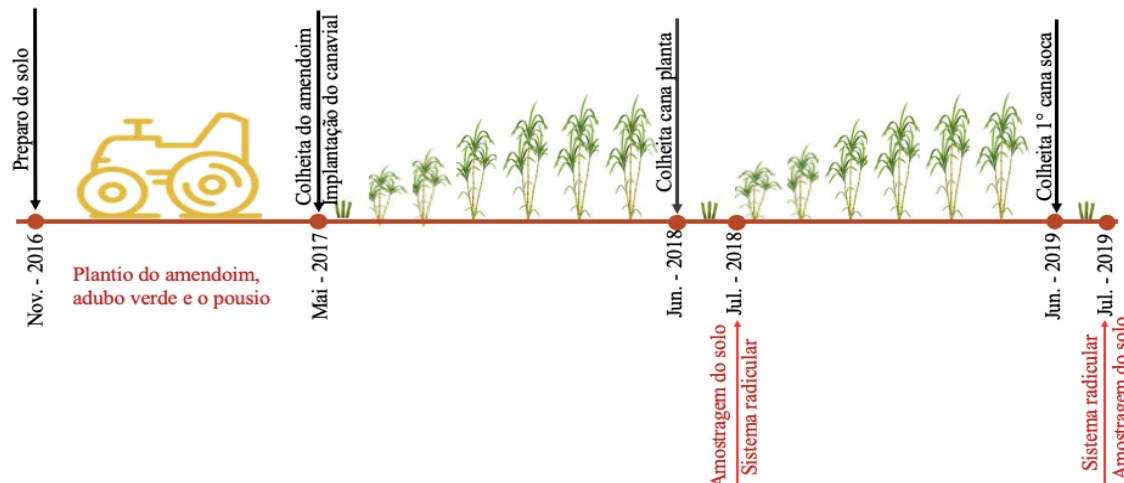
Distribuição granulométrica										
Profundidade (m)		Argila		Silte			Areia			
		----- (g kg ⁻¹) -----								
0,00-0,05		87		47			866			
0,05-0,10		85		43			872			
0,10-0,20		89		42			869			
0,20-0,40		96		43			861			
0,40-0,60		111		47			842			
Atributos químicos										
Profundidade	MO	pH	P	K	Ca	Mg	H+Al	SB	CTC	V
(m)	g dm ⁻³	CaCl ₂	mg dm ⁻³	-----mmol _c dm ⁻³ -----				%		
0,00-0,25	14	5,5	10	0,4	25	5	20	30,4	50,4	60,3
0,25-0,50	9	5,2	10	0,4	14	4	23	18,4	41,4	44,4

Na implantação dos tratamentos, o preparo do solo das áreas foi realizado com as seguintes operações e equipamentos: a) eliminação mecânica da soqueira da lavoura anteriormente instalada foi realizada com um equipamento da marca DMB – com o objetivo de eliminar simultaneamente duas linhas de soqueiras de cana. O implemento possui dois discos de corte que atuam sobre a linha da soqueira; b) A gradagem foi realizada com uma grade niveladora marca BALDAN®, modelo NV (número de discos: 44; largura de trabalho: 3760 mm; espaçamento entre discos: 175 mm; diâmetro do eixo ø: 1,1/4"), a uma profundidade de trabalho de 50 a 150 mm, após a erradicação da

soqueira; c) Aração foi realizada com um arado da marca BALDAN®, modelo AF (número de discos: 5; largura de trabalho: 1500 mm; espaçamento entre discos: 550 mm; peso aproximado: 664 kg e 30"); d) A subsolagem foi realizada na camada de 0,45 m com o subsolador da marca BALDAN®, modelo SCB-CR de cinco hastes, espaçadas 450 mm umas das outras, com engate de arrasto.

O plantio manual da cana-de-açúcar, variedade RB 86-7515, foi realizado no dia 20 de maio de 2017 utilizando espaçamento duplo alternado (linhas duplas com 0,90 m espaçadas a 1,50 m). A adubação de plantio consistiu no fornecimento de 500 kg ha⁻¹ de N-P-K (formulação 6-30-10) e na ocasião foi aplicado 0,5 L ha⁻¹ do fungicida Comet (piraclostrobina), além do inseticida fipronil (0,25 kg ha⁻¹). A Figura 5 apresenta uma linha do tempo dos acontecimentos ocorridos durante o período do estudo na área de estudo com os momentos de coleta avaliados

Figura 5. Linha do tempo dos eventos que ocorreram na área de estudo da Fazenda Agroterenas, em Paraguaçu Paulista, São Paulo, Brasil.



O equipamento *Rip Strip*® foi desenvolvido pela empresa KMC (Kelley Manufacturing Co.) para viabilizar a cultura do amendoim em manejos conservacionistas nos Estados Unidos, mas com pouca utilização na cultura da cana-de-açúcar, fato que caracteriza uma inovação para a cultura (Figura 6). O equipamento realiza o preparo em faixas entre 0,20 e 0,46 m de largura por meio de quatro discos corrugados posicionados na vertical e entre 0,25 e 0,45 m de profundidade por meio de uma haste subsoladora.

Figura 6. Equipamento *Rip Strip*® que foi utilizado na área experimental em Paraguaçu Paulista, São Paulo, Brasil. Fonte: Denizart Bolonhezi.



Dentre as vantagens deste equipamento, consiste em realizar as operações de manejo no solo sem a necessidade de retirada da palha, além de fazer duas operações em um único equipamento e, assim, economizar combustível e operar com maior agilidade. Este sistema de plantio também reduz a erosão no solo em épocas de chuva, pois permite a realização da operação com a palha da cultura no solo.

1.6.2 Delineamento experimental e tratamentos

O experimento obedece a um esquema em faixas, com quatro tratamentos de preparo de solo e três repetições, sendo: T1- preparo convencional; T2- adubo verde com *Crotalaria ochroleuca*; T3- preparo reduzido com *Rip Strip*®; T4- Plantio direto (Tabela 3). A área de cada tratamento é de dois hectares para o plantio da cana-de-açúcar.

Tabela 3. Descrição dos tratamentos avaliados na área de estudo em Paraguaçu Paulista, São Paulo, Brasil.

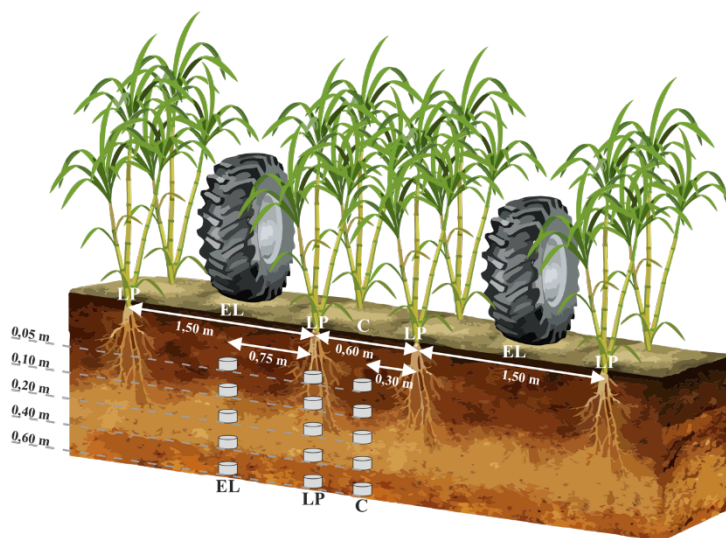
Tratamentos	Preparos do solo
T1 – Plantio convencional	Destruidor de soqueira + grade + subsolagem + pousio
T2 – Adubo verde	Destruidor de soqueira + grade + subsolagem + semeadura de <i>Crotalaria ochroleuca</i>
T3 – Preparo reduzido com <i>Rip Strip</i> ®	<i>Rip Strip</i> ® + Semeadura de Amendoim
T4 – Plantio direto	Semeadura direta de amendoim

1.6.3 Coleta de solo para determinação dos atributos físicos do solo

Para todos os tratamentos, as coletas das amostras deformadas e indeformadas de solo foram realizadas após o momento de colheita da cana-de-açúcar para ambos os ciclos avaliados (cana planta e primeira soca), nas seguintes profundidades: 0,00-0,05 m, 0,05-0,10 m, 0,10-0,20 m, 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m, conforme esquema representado na Figura 7.

As amostras foram coletadas em três locais: linha de plantio (LP) – local correspondente à região da touceira (sulco); entrelinha das culturas (EL) – localizado no centro das duas linhas de plantio e, distanciado a 0,75 m da linha de plantio, sendo o local teórico onde deve ocorrer o tráfego dos rodados das máquinas; canteiro (C) – ponto médio entre a linha de plantio e a linha do rodado, localizado a 0,375 m da linha de plantio.

Figura 7. Local de amostragem de solo nos tratamentos da área experimental em Paraguaçu Paulista, São Paulo, Brasil. LP = linha de plantio, C = canteiro, EL = entrelinha da cultura.



1.6.4 Atributos físicos do solo

Caracterização granulométrica: Foram determinadas as frações de areia, silte e argila utilizando terra fina seca ao ar pelo método da pipeta com solução de Hidróxido de Sódio 0,1 Mol L⁻¹ (NaOH) como agente dispersante (TEIXEIRA *et al.*, 2017).

Densidade do solo e porosidade do solo: A densidade do solo foi calculada pela relação existente entre a massa do solo seco em estufa a 105 °C, e o volume da amostra. A densidade de partículas foi determinada utilizando um picnômetro de 50 mL. A

microporosidade, por sua vez, pelo método da mesa de tensão aplicando-se uma coluna de água com altura de 0,06 MPa nas amostras saturadas. A porosidade total pela relação entre a densidade do solo e a densidade de partículas e, a macroporosidade pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade (TEIXEIRA *et al.*, 2017).

Resistência do solo à penetração: Foi utilizado o penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar com ângulo de cone de 30°, área do cone de 1,29 cm² e haste de 0,7 m de comprimento. A transformação da penetração da haste do aparelho no solo (cm impacto⁻¹) em resistência à penetração foi obtida conforme a Equação 1, descrita por Stolf *et al.* (2014):

$$RP = 0,56 + 0,689 \times (N/P) \times 10 \quad (1)$$

em que, RP = resistência do solo à penetração (MPa); N = número de impactos; P = penetração do cone no solo (cm). As determinações de RP foram realizadas no mesmo dia para reduzir a variação da umidade do solo. A umidade do solo foi determinada pelo método gravimétrico (TEIXEIRA *et al.*, 2017), utilizando um trado tipo rosca para coleta da amostra de solo nas mesmas profundidades (Figura 7). Cada amostra de solo foi acondicionada numa lata de alumínio para impedir a perda de água até seu processamento em laboratório.

1.6.5 Atributos químicos do solo

Foram coletadas amostras deformadas nas camadas de 0,00-0,05 m, 0,05-0,10 m, 0,10-0,20 m, 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m para determinação de análise química de rotina e carbono/nitrogênio elementar, sendo estes determinados conforme Raij *et al.* (2001). As amostras foram levadas ao laboratório, secas ao ar e em seguida passadas em peneira de 2,0 mm para análise química do solo. Foram realizadas determinações do pH do solo (CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹), fósforo disponível, cátions trocáveis (Ca²⁺, Mg²⁺ e K⁺), acidez potencial e cálculo da CTC e saturação de bases de acordo com metodologia proposta por Raij *et al.* (2001).

Para a análise de carbono em (%) foram usadas amostras de aproximadamente cinco gramas de terra fina seca ao ar que foram moídas com auxílio de almofariz e, passadas em peneira de 100 mesh (0,149 mm), antes da determinação do teor total de

carbono por combustão via seca em um analisador elementar, conforme metodologia descrita por Nelson e Sommers (1996).

1.6.6 Estoque de carbono no solo

Os estoques e teores de carbono em cada sistema de manejo foram calculados e avaliados conforme Segnini *et al.* (2012). As amostras de solo foram coletadas, secas ao ar em laboratório e depois moídas e tamizadas em peneiras com malha de 0,25 mm. O conteúdo de carbono foi determinado por combustão a seco conforme Nelson e Sommers (1996). Após o estoque de carbono foi calculado de acordo com a seguinte equação:

$$EC = CO * D_s * CS \quad (2)$$

em que, EC = estoque de carbono no solo ($Mg\ ha^{-1}$); D_s = densidade do solo ($kg\ dm^{-3}$); CS = camada de solo avaliada (cm); CO = teor de carbono orgânico no solo ($g\ g^{-1}$).

O estoque foi calculado em $Mg\ ha^{-1}$ multiplicando a concentração de carbono em (%) pela densidade do solo ($g\ cm^{-3}$) e pela espessura da camada (cm). Os valores de estoque de carbono encontrados foram corrigidos com base em massa equivalente (ELLERT; BETTANY, 1995).

1.6.7 Avaliação do sistema radicular

Para a avaliação do sistema radicular foi utilizado a metodologia descrita por Otto *et al.* (2011). Foram usadas sondas em aço inox com 1,0 m de comprimento e 0,055 m de diâmetro interno (SONDATERRA®) para coletar amostras de solo nas profundidades de 0,00-0,20 m, 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m (Figura 8). As avaliações foram realizadas ao final do ciclo cana planta (julho de 2018) e ao final da primeira cana soca (julho de 2019). Foram coletadas em três pontos para cada lado da linha de plantio, sendo o primeiro ponto próximo a linha, o segundo a distância de 0,30 m da linha e o terceiro a 0,60 m para cada lado.

Após a coleta das amostras, foi efetuada a separação do solo das raízes por peneiramento (malha 2,0 mm). As raízes e rizomas foram separados do solo e lavados em água corrente (VASCONCELOS *et al.*, 2003; FARONI; TRIVELIN, 2006). Posteriormente, as raízes foram secas em estufa ventilada a 65 °C e obtidas as massas de material seco (FREDDI *et al.*, 2007) para determinação da matéria seca e extrapoladas por hectare.

A biomassa seca das raízes foi calculada de acordo com Otto *et al.* (2011), como descrito pelas equações abaixo:

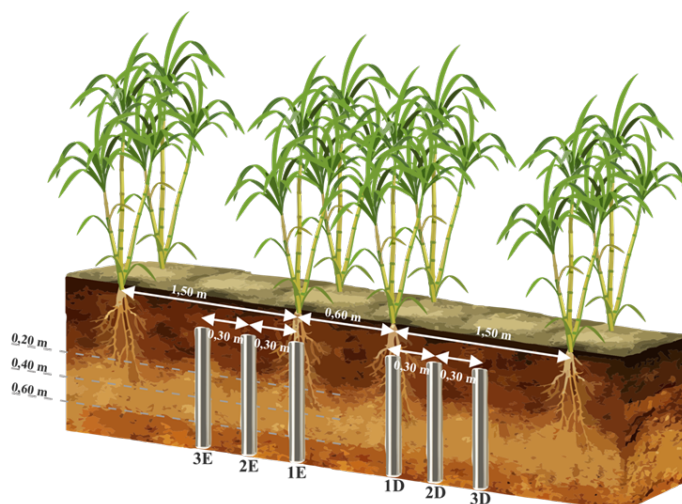
$$BSR=(DR*Vs) \quad (3)$$

em que, BSR = biomassa seca radicular (kg ha^{-1}); DR = densidade radicular em (g dm^{-3}); Vs = volume do solo representado em cada ponto amostrado em ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$).

$$DR=Ms / Vm \quad (4)$$

em que, Ms = massa seca de raízes (g); Vm = volume da sonda (dm^3).

Figura 8. Esquema de amostragem para avaliação das raízes pelo método da sonda na área experimental em Paraguaçu Paulista, São Paulo, Brasil.



1.6.8 Análise estatística

Para análise dos resultados dos atributos físicos do solo, estoque de carbono e biomassa seca radicular, foi realizada uma análise de variância e as médias comparadas por meio de contrastes ortogonais ao nível de 5% de probabilidade, onde foi utilizado o pacote 'emmeans'. Toda a análise estatística foi realizada no software R.

1.6.9 Análise de componentes principais (PCA)

Foi realizada uma abordagem multivariada por meio de análise de componentes principais (ACP), onde os componentes principais (CP) formam

combinações lineares das variáveis originais, criando eixos ortogonais onde são plotados em gráficos bidimensionais ou tridimensionais. A análise aumenta a variância, evidenciando o poder discriminatório de cada variável, onde os primeiros CP detêm mais informações. Todas as análises estatísticas foram realizadas no software livre R (R Development Core Team, 2020).

2. ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E SISTEMA RADICULAR DA CANA-DE-AÇÚCAR SOB SISTEMAS DE MANEJO DE SOLO NA REFORMA DO CANAVIAL

Resumo

A reforma dos canaviais é importante para manter elevada a qualidade do solo e a produtividade agrícola da cultura, aumentando o número de corte que atualmente está em torno de cinco. Aliado a isso, são fundamentais estudos para avaliar a influência de sistemas de cultivo (convencional ou conservacionista) e a sucessão de culturas utilizadas na renovação do canavial, visando um maior rendimento agrícola. Assim, o objetivo dessa pesquisa foi avaliar os efeitos de diferentes preparos do solo na reforma do canavial sobre os atributos físicos do solo e o crescimento do sistema radicular da cana-de-açúcar cultivada em sucessão ao amendoim. O experimento foi instalado nas dependências da Fazenda Agroterenas em um Neossolo Quartzarênico órtico típico, no município de Paraguaçu Paulista, Estado de São Paulo, Brasil. Os tratamentos de preparo do solo foram: T1- preparo convencional; T2- Adubo verde com *Crotalaria ochroleuca*; T3- Preparo reduzido com *Rip Strip*®; T4- Plantio direto. Foram avaliados a densidade do solo, teor de água no solo, porosidade (total, macro e microporosidade), resistência do solo à penetração, estoque de carbono e a biomassa seca radicular por dois ciclos da cultura da cana-de-açúcar (cana planta e primeira soca), em cinco profundidades e três locais de amostragens. A distinção entre os manejos do solo foi realizada por meio da análise de contrastes ortogonais entre as médias dos T1 e T2 (C1) x T3 e T4 (C2), sendo divididos em manejos convencionais (C1) e manejos conservacionistas (C2). A partir dos resultados verifica-se uma diferenciação entre as variáveis na discriminação de cada manejo do solo, com uma maior sensibilidade estatística ao nível de 5% de probabilidade para a MiP e durante o segundo ciclo de cultivo da cultura.

Palavras-chave: Compactação do solo, sistema radicular, *Rip Strip*®, *Saccharum officinarum*.

2.1 INTRODUÇÃO

O Brasil é considerado o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, com produção estimada em 568,4 milhões de toneladas, abrangendo 8,2 milhões de hectares em 2022 (CONAB, 2022). Com isso, a expansão de cultivos homogêneos com cana-de-açúcar em larga escala vem ocupando extensas áreas, principalmente no estado de São Paulo, onde áreas de pastagens foram substituídas por canaviais e mantidas com monoculturas pelas últimas décadas com intensas atividades antrópicas, o que causa a alteração nos atributos do solo, promovendo sua degradação e prejudicando o crescimento, produtividade e longevidade da cultura (FREITAS *et al.*, 2014; ALKIMIM *et al.*, 2015; CHERUBIN *et al.*, 2017; GUARENGHI *et al.*, 2023).

O sistema atual de produção da cana-de-açúcar envolve diversas operações que ocorrem desde o plantio até a colheita, sendo contabilizado até 30 operações mecanizadas em um mesmo talhão (DE MARIA *et al.*, 2016; GUIMARÃES *et al.*, 2019b), onde o tráfego dos maquinários é mais intenso na colheita (SILVA *et al.*, 2016; GUIMARÃES JÚNNYOR *et al.*, 2019a). Destaca-se que o manejo intensivo desencadeia o processo de compactação do solo, reduzindo a produtividade e o desenvolvimento radicular da cultura ao longo do ciclo (ESTEBAN *et al.*, 2019; GUIMARÃES *et al.*, 2019b; LIMA *et al.*, 2022; LUZ *et al.*, 2023).

Nesse sentido, se faz necessário a adoção de práticas de manejo conservacionistas que visem a redução do revolvimento do solo, preservando sua qualidade estrutural (BARBOSA *et al.*, 2019; AWE *et al.*, 2020), contribuindo na restauração do carbono perdido por meio do cultivo do solo (SILVA-OLAYA *et al.*, 2017a), bem como manter sua agregação natural para proteger o carbono orgânico do consumo microbiano (POEPLAU *et al.*, 2015), além de melhorar também a química do solo (LISBOA *et al.*, 2018) e, com isso, trazendo benefícios como aumento da produtividade da cultura (MORAES *et al.*, 2017).

Segundo Moraes *et al.* (2017), o plantio direto é conhecido tradicionalmente por trazer benefícios a longo prazo, após ser bem estabelecido e, portanto, é importante que se faça uma avaliação temporal desses sistemas de manejo, para assim poder quantificar da melhor forma seus efeitos ao longo dos ciclos da cultura. Segundo alguns estudos presentes na literatura, a colheita mecanizada sem queima associada ao plantio direto da cana-de-açúcar, tem efeito sobre a emissão de CO₂ do solo, auxilia no aumento da produtividade da cultura e diminui o custo de implantação do canavial em até 40%

(BOLONHEZI, 2013; FIGUEIREDO *et al.*, 2015; SILVA-OLAYA *et al.*, 2013; MORAES *et al.*, 2016; BORDONAL *et al.*, 2018).

Com a busca de alternativas para diminuir o custo da implementação do canavial, houve a necessidade de se adaptar equipamentos que são utilizados em outras culturas, como por exemplo o *Rip Strip*® (Kelley Manufacturing Co.). Este equipamento de preparo de solo, que é usado para a cultura do amendoim, realiza preparos em apenas uma passagem e ainda com a palhada sobre a superfície do solo (BALKCOM *et al.*, 2010). Devido ao amendoim ser uma das opções de planta de cobertura mais utilizadas na reforma de canaviais, a utilização desse equipamento para as duas culturas pode ser considerada uma inovação importante, trazendo benefícios para o produtor. O *Rip Strip*® já vem sendo testado na reforma do canavial nos últimos anos e com resultados favoráveis na produtividade, redução da compactação na linha de semeadura e melhoria na uniformidade de emergência (BOLONHEZI *et al.*, 2017; OLIVEIRA *et al.*, 2022).

Deste modo, a adoção de manejos conservacionistas aliado a adaptação de implementos agrícolas contribuem para formas mais sustentáveis de plantio da cultura da cana-de-açúcar e redução de problemas relacionados à compactação, criando condições favoráveis e adequadas para o crescimento e desenvolvimento da cultura e, desta forma, aumentar a sua produtividade. Portanto, a hipótese deste estudo é que os sistemas conservacionistas para a cultura do amendoim e *Crotalaria ochroleuca* na reforma de cana crua, melhoram a estrutura do solo ao longo dos ciclos da cana-de-açúcar plantada sem preparo em sucessão, para as condições de Neossolo Quartzarênico. Com isto, o objetivo deste estudo foi comparar o preparo convencional com o preparo conservacionista do solo e seus efeitos sob os atributos físicos do solo e produção de biomassa seca, durante o primeiro e segundo ano da cultura.

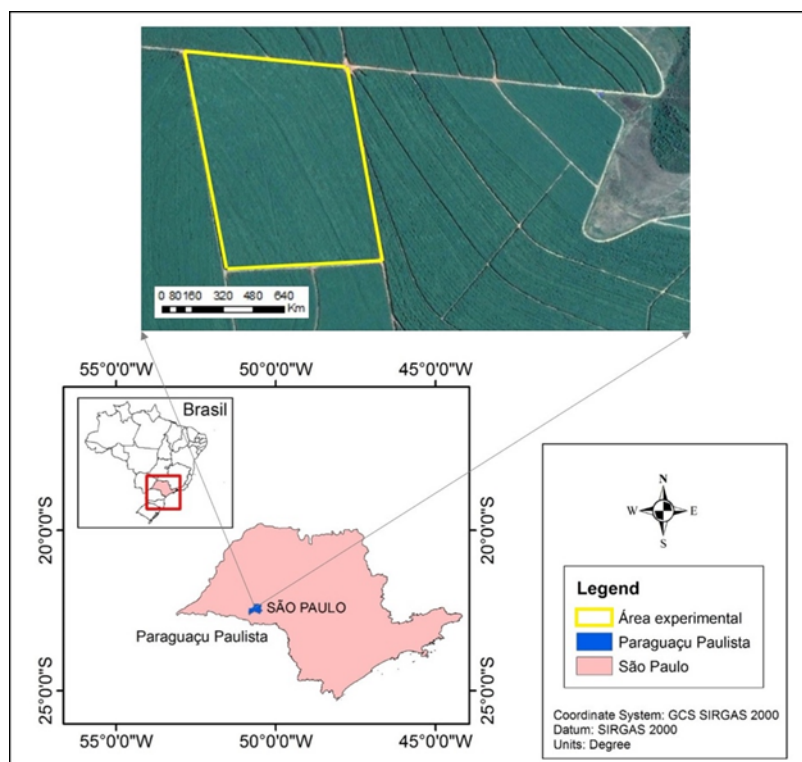
2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Área experimental e histórico

O estudo foi conduzido nas dependências da Fazenda Agroterenas, localizada no município de Paraguaçu Paulista, Estado de São Paulo, Brasil, nas seguintes coordenadas geográficas: 22°24'53" de latitude sul e 50°34'35" de longitude oeste com 420 m de altitude (Figura 9). O clima da região é classificado, segundo Köppen, como Cwa, temperado úmido com inverno seco e verão quente, e apresenta precipitação anual entre 1.430 e 1.517 mm e temperatura média anual de 22 °C (ALVARES *et al.*, 2013). O solo da área foi classificado como Neossolo Quartzarênico órtico típico, álico, textura

arenosa, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SBCS) (SANTOS *et al.*, 2018) ou, como Entisols Quartzipsamments de acordo com o Soil Taxonomy System (SOIL SURVEY STAFF, 2014).

Figura 9. Localização da área experimental de cana-de-açúcar em Paraguaçu Paulista, São Paulo, Brasil.



A área experimental consiste em um canavial de 10,0 ha com histórico de sete cortes mecanizados e sem queima. Anteriormente ao plantio da cana-de-açúcar, a área foi cultivada com amendoim em semeadura direta sobre palhço, adubo verde e uma faixa deixada em pousio desde dezembro de 2016. Como práticas corretivas, foram aplicados 1,7 Mg ha⁻¹ de calcário dolomítico (PRNT 85%), 1,0 Mg ha⁻¹ de gesso agrícola e 350 Mg ha⁻¹ de fosfato, os quais foram incorporados nos sistemas de manejo de solo convencional e deixados sobre palhada nos sistemas conservacionistas.

Após, foram instalados os tratamentos de preparo do solo e os tratamentos estabelecidos foram: T1- preparo convencional com grade aradora, subsolagem e pousio; T2- adubo verde com semeadura de *Crotalaria ochroleuca*; T3- preparo reduzido com *Rip Strip*® e semeadura de amendoim; T4- semeadura direta de amendoim. É importante esclarecer que os preparos do solo foram realizados para a cultura do amendoim e nenhum

foi realizado previamente ao plantio da cana-de-açúcar. A caracterização granulométrica e dos atributos químicos do solo da área encontra-se na Tabela 4.

Tabela 4. Caracterização granulométrica e química da área experimental de cana-de-açúcar em Paraguaçu Paulista, São Paulo, Brasil.

Distribuição granulométrica										
Profundidade (m)		Argila		Silte				Areia		
		----- (g kg ⁻¹) -----								
0,00-0,05		87		47				866		
0,05-0,10		85		43				872		
0,10-0,20		89		42				869		
0,20-0,40		96		43				861		
0,40-0,60		111		47				842		
Atributos químicos										
Profundidade	MO	pH	P	K	Ca	Mg	H+Al	SB	CTC	V
(m)	g dm ⁻³	CaCl ₂	mg dm ⁻³	-----mmol _c dm ⁻³ -----						%
0,00-0,25	14	5,5	10	0,4	25	5	20	30,4	50,4	60,3
0,25-0,50	9	5,2	10	0,4	14	4	23	18,4	41,4	44,4

O plantio do amendoim foi realizado no dia 26 de novembro de 2016 com a utilização de uma semeadora Baldan SPA Megaflex Air e um trator Valtra, modelo BM 125i, 132 cv, utilizando 110 kg ha⁻¹ de sementes, nesta mesma ocasião ocorreram as operações de preparo de solo. Para o plantio da *Crotalaria ochroleuca* ocorreu em linhas por meio de uma semeadora de plantio direto de nove Linhas, Baldan Modelo Solo gráfico 4500 e um trator Valtra, modelo BM 125i, 132 cv, utilizando 25 kg ha⁻¹ de sementes.

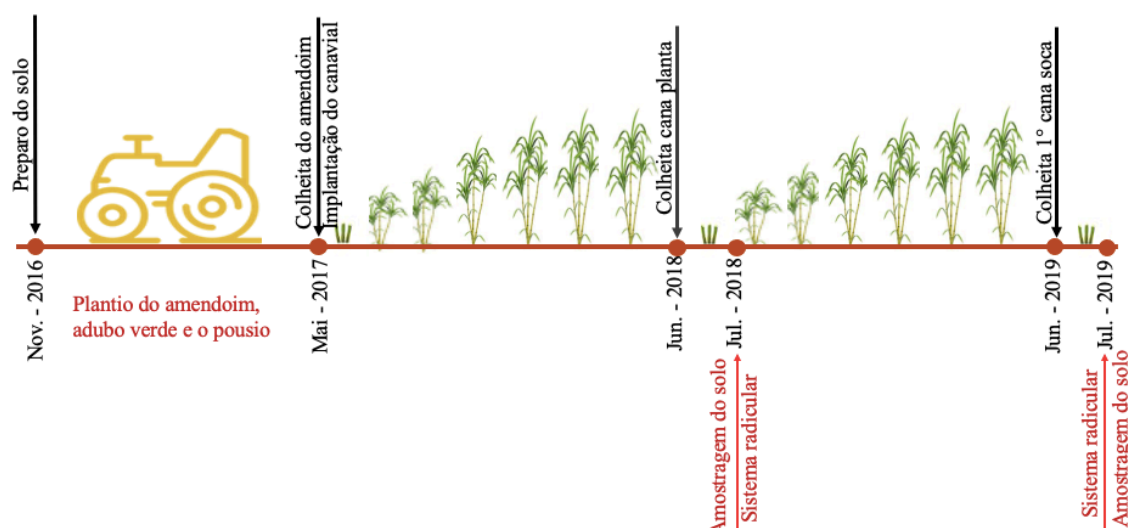
Na implantação dos tratamentos, o preparo do solo das áreas foi realizado com as seguintes operações e equipamentos: a) eliminação mecânica da soqueira da lavoura anteriormente instalada foi realizada com um equipamento da marca DMB – com o objetivo de eliminar simultaneamente duas linhas de soqueiras de cana. O implemento possui dois discos de corte que atuam sobre a linha da soqueira; b) A gradagem foi realizada com uma grade niveladora marca BALDAN®, modelo NV (número de discos: 44; largura de trabalho: 3760 mm; espaçamento entre discos: 175 mm; diâmetro do eixo ø: 1,1/4"), a uma profundidade de trabalho de 50 a 150 mm, após a erradicação da soqueira; c) Aração foi realizada com um arado da marca BALDAN®, modelo AF (número de discos: 5; largura de trabalho: 1500 mm; espaçamento entre discos: 550 mm;

peso aproximado: 664 kg e 30"); d) A subsolagem foi realizada na camada de 0,45 m com o subsolador da marca BALDAN®, modelo SCB-CR de cinco hastes, espaçadas 450 mm umas das outras, com engate de arrasto.

O plantio manual da cana-de-açúcar, variedade RB 86-7515, foi realizado no dia 20 de maio de 2017 utilizando espaçamento duplo alternado (linhas duplas com 0,90 m espaçadas a 1,50 m). A adubação de plantio consistiu no fornecimento de 500 kg ha⁻¹ de N-P-K (formulação 6-30-10) e na ocasião foi aplicado 0,5 L ha⁻¹ do fungicida Comet (piraclostrobina), além do inseticida fipronil (0,25 kg ha⁻¹).

O equipamento *Rip Strip*® foi desenvolvido pela empresa KMC (Kelley Manufacturing Co.) para viabilizar a cultura do amendoim em manejos conservacionistas nos Estados Unidos, mas com pouca utilização na cultura da cana-de-açúcar, fato que caracteriza uma inovação para a cultura. O equipamento realiza o preparo em faixas entre 0,20 e 0,46 m de largura por meio de quatro discos corrugados posicionados na vertical e entre 0,25 e 0,45 m de profundidade por meio de uma haste subsoladora. A Figura 10 apresenta uma linha do tempo dos acontecimentos ocorridos durante o período do estudo na área de estudo com os momentos de coleta avaliados.

Figura 10. Linha do tempo dos eventos que ocorreram na área de estudo da Fazenda Agroterenas, em Paraguaçu Paulista, São Paulo, Brasil.



2.2.2 Delineamento experimental e tratamentos

O experimento obedece a um esquema em faixas, com quatro tratamentos de preparo de solo e três repetições, sendo: T1- preparo convencional; T2- adubo verde com *Crotalaria ochroleuca*; T3- preparo reduzido com *Rip Strip*®; T4- Plantio direto. Divido em dois grupos: preparo convencional (C1) e preparo conservacionista (C2). A área de cada tratamento é de dois hectares para o plantio da cana-de-açúcar (Tabela 5).

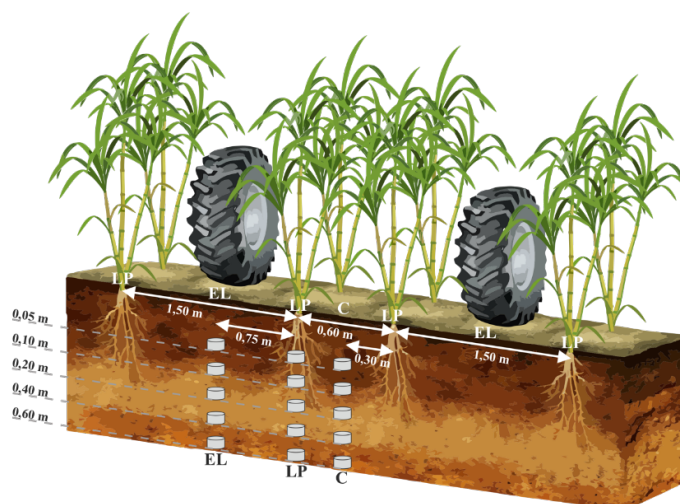
Tabela 5. Descrição dos tratamentos avaliados na área de estudo, em Paraguaçu Paulista, São Paulo, Brasil.

Grupos	Tratamentos	Preparos do solo
C1	T1 – Plantio convencional	Destruidor de soqueira + grade + subsolagem + pousio
	T2 – Adubo verde	Destruidor de soqueira + grade + subsolagem + semeadura de <i>Crotalaria ochroleuca</i>
C2	T3 – Preparo reduzido com <i>Rip Strip</i> ®	<i>Rip Strip</i> ® + semeadura de amendoim
	T4 – Plantio direto	Semeadura direta de amendoim

2.2.3 Coleta de solo para determinação dos atributos físicos do solo

Para todos os tratamentos, as coletas das amostras deformadas e indeformadas de solo foram realizadas após o momento de colheita da cana-de-açúcar para ambos os ciclos avaliados (cana planta e primeira soca), nas seguintes profundidades: 0,00-0,05 m, 0,05-0,10 m, 0,10-0,20 m, 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m, conforme esquema representado na Figura 11.

Figura 11. Local de amostragem de solo nos tratamentos da área experimental em Paraguaçu Paulista, Estado de São Paulo, Brasil. LP = linha de plantio, C = canteiro, EL = entrelinha das culturas.



As amostras foram coletadas em três locais: linha de plantio (LP) – local correspondente à região da touceira (sulco); entrelinha das culturas (EL) – localizado no centro das duas linhas de plantio e, distanciado a 0,75 m da linha de plantio, sendo o local teórico onde deve ocorrer o tráfego dos rodados das máquinas; canteiro (C) – ponto médio entre a linha de plantio e a linha do rodado, localizado a 0,375 m da linha de plantio.

2.2.4 Atributos físicos do solo

Caracterização granulométrica: Foram determinadas as frações de areia, silte e argila utilizando terra fina seca ao ar pelo método da pipeta com solução de hidróxido de sódio 0,1 Mol L⁻¹ (NaOH) como agente dispersante (TEIXEIRA *et al.*, 2017).

Densidade do solo, densidade de partículas e porosidade do solo: A densidade do solo foi calculada pela relação existente entre a massa do solo seco em estufa a 105 °C, e o volume da amostra. A densidade de partículas foi determinada utilizando um picnômetro de 50 mL. A microporosidade, por sua vez, pelo método da mesa de tensão aplicando-se uma coluna de água com altura de 0,06 MPa nas amostras saturadas. A porosidade total pela relação entre a densidade do solo e a densidade de partículas e, a macroporosidade pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade (TEIXEIRA *et al.*, 2017).

Resistência do solo à penetração: Foi utilizado o penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar com ângulo de cone de 30°, área do cone de 1,29 cm² e haste de 0,7 m de comprimento. A transformação da penetração da haste do aparelho no solo (cm impacto⁻¹) em resistência à penetração foi obtida conforme a Equação 5, descrita por Stolf *et al.* (2014):

$$RP = 0,56 + 0,689 \times (N/P) \times 10 \quad (5)$$

em que, RP = resistência do solo à penetração (MPa); N = número de impactos; P = penetração do cone no solo (cm).

As determinações de RP foram realizadas no mesmo dia para reduzir a variação da umidade do solo. A umidade do solo foi determinada pelo método gravimétrico (TEIXEIRA *et al.*, 2017), utilizando um trado tipo rosca para coleta da amostra de solo nas mesmas profundidades (Figura 11). Cada amostra de solo foi acondicionada numa lata de alumínio para impedir a perda de água até seu processamento em laboratório.

2.2.5 Avaliação do sistema radicular

Para a avaliação do sistema radicular foi utilizado a metodologia descrita por Otto *et al.* (2011). Foram usadas sondas em aço inox com 1,0 m de comprimento e 0,055 m de diâmetro interno (SONDATERRA®) para coletar amostras de solo nas profundidades de 0,00-0,20 m, 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m (Figura 12). As avaliações foram realizadas ao final do ciclo cana planta (abril de 2018) e ao final da primeira cana soca (junho de 2019). Foram coletadas em três pontos para cada lado da linha de plantio, sendo o primeiro ponto próximo a linha, o segundo a distância de 0,30 m da linha e o terceiro a 0,60 m para cada lado.

Após a coleta das amostras, foi efetuada a separação do solo das raízes por peneiramento (malha 2,0 mm). As raízes e rizomas foram separadas do solo e lavadas em água corrente (VASCONCELOS *et al.*, 2003; FARONI; TRIVELIN, 2006). Posteriormente, as raízes foram secas em estufa ventilada a 65 °C e obtidas as massas de material seco (FREDDI *et al.*, 2007) para determinação da matéria seca e extrapoladas por hectare.

A biomassa seca das raízes foi calculada de acordo com Otto *et al.* (2011), como descrito pelas equações abaixo:

$$BSR = (DR * V_s) \quad (6)$$

em que, BSR = biomassa seca radicular (kg ha^{-1}); DR = densidade radicular em (g dm^{-3}); V_s = volume do solo representado em cada ponto amostrado em ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$).

$$DR = M_s / V_m \quad (7)$$

em que, M_s = massa seca de raízes (g); V_m = volume da sonda (dm^3).

2.2.6 Estoque de carbono no solo

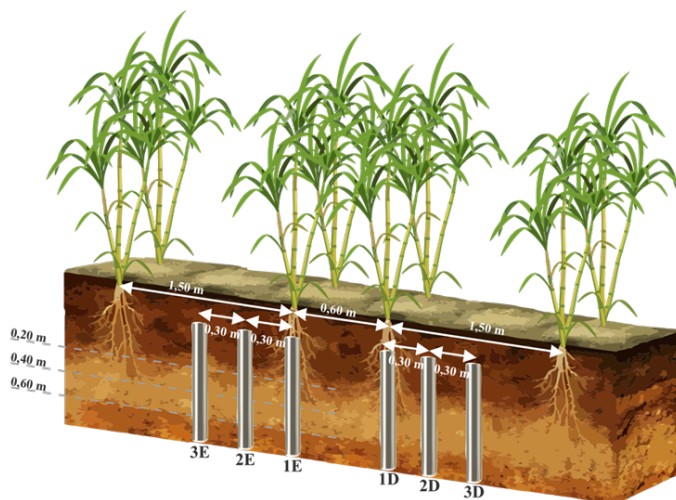
Os estoques e teores de carbono em cada sistema de manejo foram calculados e avaliados conforme Segnini *et al.* (2012). As amostras de solo foram coletadas, secas ao ar em laboratório e depois moídas e tamizadas em peneiras com malha de 0,25 mm. O conteúdo de carbono foi determinado por combustão a seco conforme Nelson e Sommers (1996). Após o estoque de carbono foi calculado de acordo com a seguinte equação:

$$EC = CO * D_s * CS \quad (8)$$

em que, EC = estoque de carbono no solo (Mg ha^{-1}); Ds = densidade do solo (kg dm^{-3}); CS = camada de solo avaliada (cm); CO = teor de carbono orgânico no solo (g g^{-1}).

O estoque foi calculado em Mg ha^{-1} multiplicando a concentração de carbono em (%) pela densidade do solo (g cm^{-3}) e pela espessura da camada (cm). Os valores de estoque de carbono encontrados foram corrigidos com base em massa equivalente (ELLERT; BETTANY, 1995).

Figura 12. Esquema de amostragem para avaliação das raízes pelo método da sonda na área experimental em Paraguaçu Paulista, São Paulo, Brasil.



2.2.7 Análises dos resultados

A análise estatística foi realizada no software R, por meio da análise de variância e as médias comparadas por meio de contrastes ortogonais, onde foi utilizado o pacote 'emmeans'. A estrutura dos contrastes testados foi a seguinte: contrastes ortogonais entre as médias das variáveis dos tratamentos com manejos convencionais ($C1 = T1$ e $T2$) e os manejos conservacionistas ($C2 = T3$ e $T4$), conforme Tabela 5.

2.3 RESULTADOS

2.3.1 Atributos físicos do solo

No primeiro ciclo produtivo da cana-de-açúcar (cana planta), de maneira geral, observa-se que os contrastes ortogonais dos tratamentos convencionais ($C1$) e conservacionista ($C2$) mostram significância na diferenciação entre os grupos de tratamentos somente para algumas profundidades das variáveis analisadas (Tabela 6). Para o segundo ciclo produtivo da cultura (primeira cana soca), com uma maior diferenciação estatística entre os contrastes testados ($C1 \times C2$), e valores significativos

entre as variáveis estudadas, especialmente para a microporosidade (MiP), permitindo uma maior diferenciação entre os grupos de tratamentos confrontados.

Tabela 6. Contrastes ortogonais entre os grupos de tratamento C1 x C2 para densidade do solo (kg dm^{-3}) realizada ao final do primeiro e segundo ciclo da cana-de-açúcar em Paraguaçu Paulista, São Paulo, Brasil.

Local	Prof. (m)	Cana planta			Primeira soca		
		C1 Média	C2 Média	C1xC2	C1 Média	C2 Média	C1xC2
C	0,00-0,05	1,62	1,60	ns	1,71	1,66	ns
	0,05-0,10	1,67	1,69	ns	1,77	1,71	ns
	0,10-0,20	1,77	1,76	ns	1,76	1,74	ns
	0,20-0,40	1,69	1,74	ns	1,73	1,72	ns
	0,40-0,60	1,62	1,68	ns	1,69	1,64	ns
EL	0,00-0,05	1,59	1,69	ns	1,74	1,61	*
	0,05-0,10	1,70	1,76	ns	1,78	1,70	ns
	0,10-0,20	1,78	1,75	ns	1,78	1,69	ns
	0,20-0,40	1,72	1,74	ns	1,71	1,68	ns
	0,40-0,60	1,71	1,69	ns	1,67	1,63	ns
LP	0,00-0,05	1,40	1,50	ns	1,56	1,46	ns
	0,05-0,10	1,46	1,54	ns	1,53	1,50	ns
	0,10-0,20	1,47	1,56	ns	1,64	1,62	ns
	0,20-0,40	1,54	1,68	*	1,72	1,71	ns
	0,40-0,60	1,57	1,68	*	1,72	1,60	*

C1 = contraste T1 e T2; C2 = contraste T3 e T4; Prof. = profundidade (m); T1 = preparo convencional com pousio; T2 = adubo verde com *Crotalaria ochroleuca*; T3 = preparo reduzido com *Rip Strip®*; T4 = plantio direto; LP = linha de plantio; C = canteiro; EL = entrelinha da cultura. *, ns = significativo a 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente, pela análise de contraste entre as médias de C1 e C2.

Para a densidade do solo (Ds) no ciclo da cana planta, verifica-se que houve significância entre os contrastes C1 x C2 nas profundidades 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m para a linha de plantio (LP), e no ciclo da primeira cana soca para os grupos de tratamentos na profundidade 0,00-0,05 m para a entrelinha (EL) e de 0,40-0,60 m na LP (Tabela 6). A cana planta apresentou os maiores valores de Ds para o grupo de tratamento com manejos conservacionistas (C2), com $1,68 \text{ kg dm}^{-3}$ na LP. Enquanto na cana soca, o cenário mudou, sendo observados maiores valores médios de Ds para o grupo com manejos convencionais (C1), alcançado valores médios de $1,74 \text{ kg dm}^{-3}$ na EL e $1,72 \text{ kg dm}^{-3}$ na LP.

Para macroporosidade (MaP), durante o primeiro ciclo produtivo da cultura (cana planta), observa-se significância na diferenciação entre os grupos de tratamentos

somente na profundidade 0,00-0,05 m para a LP, com maior valor médio observado para o grupo C1 ($0,14 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) (Tabela 7). Para a cana soca, houve valores significativos entre os contrastes testados na profundidade 0,40-0,60 m para o canteiro (C) e na profundidade 0,00-0,05 m para a EL. Os maiores valores médios foram observados para o grupo de tratamento com manejo convencional (C1) para o C, registrando $0,08 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de MaP, enquanto na EL o contraste com manejo conservacionista (C2) alcançou o maior valor médio para essa variável ($0,09 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$).

Tabela 7. Contrastes ortogonais entre os grupos de tratamento C1 x C2 para a macroporosidade ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) realizada ao final do primeiro e segundo ciclo da cana-de-açúcar em Paraguaçu Paulista, São Paulo, Brasil.

Local	Prof.(m)	Cana planta			Primeira soca		
		C1 Média	C2 Média	C1xC2	C1 Média	C2 Média	C1xC2
C	0,00-0,05	0,05	0,06	ns	0,03	0,05	ns
	0,05-0,10	0,05	0,06	ns	0,03	0,04	ns
	0,10-0,20	0,05	0,05	ns	0,03	0,04	ns
	0,20-0,40	0,06	0,06	ns	0,04	0,05	ns
	0,40-0,60	0,07	0,06	ns	0,08	0,05	*
EL	0,00-0,05	0,06	0,06	ns	0,03	0,09	*
	0,05-0,10	0,04	0,04	ns	0,03	0,04	ns
	0,10-0,20	0,04	0,04	ns	0,03	0,04	ns
	0,20-0,40	0,05	0,05	ns	0,04	0,04	ns
	0,40-0,60	0,05	0,06	ns	0,06	0,05	ns
LP	0,00-0,05	0,14	0,11	*	0,07	0,08	ns
	0,05-0,10	0,10	0,10	ns	0,09	0,08	ns
	0,10-0,20	0,10	0,10	ns	0,07	0,06	ns
	0,20-0,40	0,07	0,05	ns	0,05	0,05	ns
	0,40-0,60	0,06	0,05	ns	0,05	0,06	ns

C1 = contraste T1 e T2; C2 = contraste T3 e T4; Prof. = profundidade (m); T1 = preparo convencional com pousio; T2 = adubo verde com *Crotalaria ochroleuca*; T3 = preparo reduzido com *Rip Strip®*; T4 = plantio direto; LP = linha de plantio; C = canteiro; EL = entrelinha da cultura. *, ns = significativo a 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente, pela análise de contraste entre as médias de C1 e C2.

Em relação a microporosidade (MiP), durante a cana planta, observou-se diferenciação estatística entre os grupos de tratamentos confrontados C1 x C2 apenas para os locais de amostragens EL e LP, nas profundidades 0,00-0,05 m e 0,05-0,10 m, respectivamente (Tabela 8). O grupo do contraste C1 proporcionou as maiores médias, com valores de $0,20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $0,21 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, nos primeiros 0,10 m de profundidade para ambos os locais de amostragens (EL e LP), respectivamente.

Contudo, na cana soca, a MiP foi a variável que mostrou maior sensibilidade estatística ao nível de 5% para os contrastes C1 e C2 (Tabela 8), promovendo valores médios significativos em praticamente todas as profundidades e locais de amostragens estudados, permitindo, desta forma, uma maior diferenciação entre os grupos de tratamentos testados.

Tabela 8. Contrastes ortogonais entre os grupos de tratamento C1 x C2 para microporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) realizada ao final do primeiro e segundo ciclo da cana-de-açúcar em Paraguaçu Paulista, São Paulo, Brasil.

Local	Prof. (m)	Cana planta			Primeira soca		
		C1 Média	C2 Média	C1xC2	C1 Média	C2 Média	C1xC2
C	0,00-0,05	0,20	0,20	ns	0,16	0,18	*
	0,05-0,10	0,17	0,17	ns	0,14	0,16	*
	0,10-0,20	0,16	0,16	ns	0,14	0,15	ns
	0,20-0,40	0,17	0,17	ns	0,14	0,17	*
	0,40-0,60	0,19	0,19	ns	0,15	0,19	*
EL	0,00-0,05	0,20	0,17	*	0,16	0,19	*
	0,05-0,10	0,16	0,17	ns	0,15	0,17	*
	0,10-0,20	0,15	0,16	ns	0,14	0,17	*
	0,20-0,40	0,17	0,17	ns	0,15	0,16	ns
	0,40-0,60	0,17	0,19	ns	0,16	0,17	ns
LP	0,00-0,05	0,19	0,20	ns	0,16	0,21	*
	0,05-0,10	0,21	0,18	*	0,16	0,18	ns
	0,10-0,20	0,16	0,18	ns	0,14	0,17	*
	0,20-0,40	0,17	0,18	ns	0,14	0,17	*
	0,40-0,60	0,19	0,20	ns	0,15	0,18	*

C1 = contraste T1 e T2; C2 = contraste T3 e T4; Prof. = profundidade (m); T1 = preparo convencional com pousio; T2 = adubo verde com *Crotalaria ochroleuca*; T3 = preparo reduzido com *Rip Strip*®; T4 = plantio direto; LP = linha de plantio; C = canteiro; EL = entrelinha da cultura. *, ns = significativo a 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente, pela análise de contraste entre as médias de C1 e C2.

Na cana planta, para a porosidade total (PT), os contrastes C1 x C2 não apresentaram valores significativos para esta variável (Tabela 9). Porém, na cana soca observa-se diferenciação entre esses grupos de tratamentos testados, para a profundidade de 0,00-0,05 m na EL e LP, na profundidade 0,10-0,20 m para a EL e a 0,40-0,60 m para a LP.

Os maiores valores médios foram observados para o contraste com o grupo de tratamento conservacionista (C2), alcançando valores de PT na EL de 0,26 e 0,21 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, nas camadas de 0,00-0,05 e 0,10-0,20 m, respectivamente (Tabela 9). Na LP valores

de 0,30 e 0,24 m³ m⁻³ na primeira e última camada avaliada para este local de amostragem, respectivamente.

Tabela 9. Contrastes ortogonais entre os grupos de tratamento C1 x C2 para porosidade total (m³ m⁻³) realizada ao final do primeiro e segundo ciclo da cana-de-açúcar em Paraguaçu Paulista, São Paulo, Brasil.

Local	Prof. (m)	Cana planta			Primeira soca		
		C1 Média	C2 Média	C1xC2	C1 Média	C2 Média	C1xC2
C	0,00-0,05	0,25	0,27	ns	0,20	0,23	ns
	0,05-0,10	0,21	0,23	ns	0,17	0,21	ns
	0,10-0,20	0,21	0,21	ns	0,18	0,19	ns
	0,20-0,40	0,23	0,23	ns	0,18	0,21	ns
	0,40-0,60	0,25	0,25	ns	0,22	0,22	ns
EL	0,00-0,05	0,26	0,23	ns	0,19	0,26	*
	0,05-0,10	0,19	0,21	ns	0,18	0,21	ns
	0,10-0,20	0,19	0,21	ns	0,17	0,21	*
	0,20-0,40	0,22	0,22	ns	0,19	0,20	ns
	0,40-0,60	0,22	0,25	ns	0,21	0,22	ns
LP	0,00-0,05	0,34	0,31	ns	0,26	0,30	*
	0,05-0,10	0,31	0,29	ns	0,25	0,27	ns
	0,10-0,20	0,26	0,27	ns	0,21	0,23	ns
	0,20-0,40	0,23	0,23	ns	0,19	0,22	ns
	0,40-0,60	0,25	0,25	ns	0,20	0,24	*

T1 - preparo convencional com pousio; T2 - adubo verde com *Crotalaria ochroleuca*; T3 - preparo reduzido com *Rip Strip*®; T4 - plantio direto. As letras maiúsculas diferem entre os locais de amostragem e as minúsculas entre os preparos de solo, pelo teste Tukey a 5% de probabilidade ($p \leq 0,05$). L = linha de plantio; C = canteiro; EL = entrelinha da cultura.

Para a resistência do solo à penetração (RP), foram verificados valores significativos em ambos os ciclos produtivos da cultura (cana planta e primeira soca) (Tabela 10). Durante a cana planta, apenas os valores na EL apresentaram diferenciação estatística entre os contrastes ortogonais C1 x C2, na profundidade 0,05-0,10 m e 0,10-0,20 m, sendo que os maiores valores de RP ocorreram no contraste com manejo convencional – C2 (3,08 e 4,10 MPa, respectivamente).

Para a cana soca, valores significativos foram constatados na profundidade 0,20-0,40 m para o C e de 0,10-0,20 m para a EL (Tabela 10), onde diferentemente da primeira soca, o contraste C1 foi o grupo de tratamentos que proporcionou maiores valores de RP (3,53 e 3,37 MPa, respectivamente).

Tabela 10. Contrastes ortogonais entre os grupos de tratamento C1 x C2 para resistência do solo à penetração (MPa) realizada ao final do primeiro e segundo ciclo da cana-de-açúcar em Paraguaçu Paulista, São Paulo, Brasil.

Local	Prof. (m)	Cana planta			Primeira soca		
		C1 Média	C2 Média	C1xC2	C1 Média	C2 Média	C1xC2
C	0,00-0,05	0,92	0,61	ns	0,74	0,71	ns
	0,05-0,10	1,92	1,70	ns	1,86	1,60	ns
	0,10-0,20	3,07	3,48	ns	2,97	2,53	ns
	0,20-0,40	3,82	4,05	ns	3,53	2,95	*
	0,40-0,60	3,02	2,98	ns	2,65	2,48	ns
EL	0,00-0,05	1,05	1,26	ns	0,92	0,85	ns
	0,05-0,10	1,98	3,08	*	2,25	1,78	ns
	0,10-0,20	3,50	4,10	*	3,37	2,23	*
	0,20-0,40	4,66	4,83	ns	3,44	3,04	ns
	0,40-0,60	3,62	3,37	ns	2,71	2,90	ns
LP	0,00-0,05	0,60	0,56	ns	0,56	0,56	ns
	0,05-0,10	0,93	0,59	ns	0,61	0,56	ns
	0,10-0,20	1,96	1,59	ns	1,31	1,03	ns
	0,20-0,40	3,31	3,61	ns	2,63	2,64	ns
	0,40-0,60	2,90	2,84	ns	2,64	2,52	ns

C1 = contraste T1 e T2; C2 = contraste T3 e T4; Prof. = profundidade (m); T1 = preparo convencional com pousio; T2 = adubo verde com *Crotalaria ochroleuca*; T3 = preparo reduzido com *Rip Strip*®; T4 = plantio direto; LP = linha de plantio; C = canteiro; EL = entrelinha da cultura. *, ns = significativo a 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente, pela análise de contraste entre as médias de C1 e C2.

O teor de água no solo (Us) realizado durante a avaliação da RP, apresentou valores significativos para os contrastes testado em ambas os ciclos produtivos (Tabela 11). Na cana planta observa-se significância entre os grupos de manejos em todos os locais de amostragens (C, EL e LP), nas profundidades 0,05-0,10 m para o C, 0,00-0,05 m na EL e 0,05-0,10 m e 0,20-0,40 m para LP, com os maiores valores médios para o C1, exceto para a LP em que o C2 atingiu o maior valor médio de Us.

Diferentemente do que ocorreu no ciclo anterior, para a cana soca, a Us promoveu valores significativos na diferenciação dos grupos de tratamento somente na entrelinha da cultura (EL) nas profundidades 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 m (Tabela 11), alcançando maiores valores médios para o grupo de tratamentos do manejo convencional (C1).

Tabela 11. Contrastes ortogonais entre os grupos de tratamento C1 x C2 para o teor de água no solo (kg kg^{-1}) realizada ao final do primeiro e segundo ciclo da cana-de-açúcar em Paraguaçu Paulista, São Paulo, Brasil.

Local	Prof. (m)	Cana planta			Primeira soca		
		C1 Média	C2 Média	C1xC2	C1 Média	C2 Média	C1xC2
C	0,00-0,05	0,10	0,09	ns	0,09	0,10	ns
	0,05-0,10	0,10	0,08	*	0,10	0,09	ns
	0,10-0,20	0,09	0,09	ns	0,10	0,09	ns
	0,20-0,40	0,09	0,09	ns	0,11	0,11	ns
	0,40-0,60	0,10	0,10	ns	0,11	0,11	ns
EL	0,00-0,05	0,10	0,10	ns	0,10	0,10	ns
	0,05-0,10	0,09	0,08	*	0,10	0,09	ns
	0,10-0,20	0,09	0,08	ns	0,10	0,09	*
	0,20-0,40	0,09	0,09	ns	0,12	0,11	*
	0,40-0,60	0,09	0,10	ns	0,11	0,11	ns
L	0,00-0,05	0,10	0,09	*	0,09	0,10	ns
	0,05-0,10	0,10	0,09	*	0,10	0,09	ns
	0,10-0,20	0,09	0,09	ns	0,10	0,09	ns
	0,20-0,40	0,09	0,10	*	0,11	0,11	ns
	0,40-0,60	0,10	0,10	ns	0,11	0,11	ns

C1 = contraste T1 e T2; C2 = contraste T3 e T4; Prof. = profundidade (m); T1 = preparo convencional com pousio; T2 = adubo verde com *Crotalaria ochroleuca*; T3 = preparo reduzido com *Rip Strip®*; T4 = plantio direto; LP = linha de plantio; C = canteiro; EL = entrelinha da cultura. *, ns = significativo a 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente, pela análise de contraste entre as médias de C1 e C2.

2.3.2 Estoque de carbono orgânico no solo

Em relação ao estoque de carbono no solo (EC), conforme Tabela 12, verifica-se que os contrastes ortogonais entre os grupos de tratamentos avaliados apresentaram significância em todas as profundidades do primeiro ciclo de cultivo da cultura (cana planta). No entanto, para o ciclo da primeira soca, não houve significância em nenhuma das profundidades avaliadas neste estudo.

Observa-se que as médias da variável EC foram maiores para o contraste C1 em todas as profundidades (Tabela 12). Nos diferentes ciclos avaliados houve uma redução do EC conforme o aumento da profundidade avaliada, exceto na profundidade de 0,20-0,40 m na cana planta para o contraste C2, que se constatou um aumento nos valores de EC em relação a profundidade anterior.

Tabela 12. Contrastes ortogonais entre os grupos de tratamento C1 x C2 para o estoque de carbono no solo (Mg ha^{-1}) realizada ao final do primeiro e segundo ciclo da cana-de-açúcar em Paraguaçu Paulista, São Paulo, Brasil.

Prof. (m)	Cana planta			Primeira soca		
	Médias C1	Médias C2	C1xC2	Médias C1	Médias C2	C1xC2
0,00-0,05	7,28	6,19	*	6,54	6,91	ns
0,05-0,10	6,39	5,08	*	6,17	6,86	ns
0,10-0,20	5,95	4,59	*	5,44	5,86	ns
0,20-0,40	5,69	4,84	*	4,92	4,87	ns
0,40-0,60	4,92	4,08	*	3,95	4,4	ns

C1 = contraste T1 e T2; C2 = contraste T3 e T4; Prof. = profundidade (m); T1 = preparo convencional com pousio; T2 = adubo verde com *Crotalaria ochroleuca*; T3 = preparo reduzido com *Rip Strip*®; T4 = plantio direto. *, ns = significativo a 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente, pela análise de contraste entre as médias de C1 e C2.

2.3.3 Biomassa seca radicular

Para a biomassa seca radicular (BSR), verifica-se que houve significância nos contrastes ortogonais dos grupos de tratamentos avaliados para ambos os ciclos produtivos da cultura (Tabela 13). Observa-se no ciclo da cana planta, que os contrastes ortogonais mostraram significância na profundidade 0,40-0,60 m no D1 e na profundidade 0,00-0,20 m para o D2. Enquanto para a cana soca, houve diferenciação entre os grupos de tratamentos apenas para a primeira profundidade do solo (0,00-0,20 m) em E1.

Analisando as médias de BSR da cana-de-açúcar (Tabela 13), verifica-se que os maiores valores médios foram observados para os grupos de tratamento do manejo convencional para o primeiro e segundo ciclo produtivo, exceto para a primeira camada do local D2 (0,00-0,20 m), em que o contraste com manejo conservacionista obteve o maior valor médio para essa variável.

Em relação ao local de amostragem, de forma geral, as raízes tenderam a se concentrar mais próximo a planta com maiores valores médios nos locais correspondentes a linha do plantio (E1 e D1) (Tabela 13). Além disso, a concentração do sistema radicular foi maior na camada de 0,00-0,20 m, para os dois anos agrícolas avaliados.

Tabela 13. Contrastes ortogonais entre os grupos de tratamento C1 x C2 para a distribuição da biomassa seca radicular (kg ha^{-1}) realizada ao final do primeiro e segundo ciclo da cultura em Paraguaçu Paulista, São Paulo, Brasil.

Local	Cana planta				Primeira soca		
	Prof. (m)	Média C1	Média C2	C1xC2	Média C1	Média C2	C1xC2
D1	0,00-0,20	402,8	349,6	ns	322,9	261,9	ns
	0,20-0,40	165,1	90,3	ns	129,8	59,2	ns
	0,40-0,60	193,5	21,3	*	39,6	29,6	ns
D2	0,00-0,20	121,5	244,9	*	146,0	125,8	ns
	0,20-0,40	26,7	56,1	ns	23,7	13,5	ns
	0,40-0,60	27,1	23,2	ns	88,7	37,9	ns
D3	0,00-0,20	126,4	205,8	ns	136,0	173,5	ns
	0,20-0,40	22,6	45,9	ns	36,2	56,4	ns
	0,40-0,60	12,8	15,5	ns	11,0	37,2	ns
E1	0,00-0,20	303,0	337,6	ns	359,2	237,9	*
	0,20-0,40	124,5	145,6	ns	126,4	83,6	ns
	0,40-0,60	96,0	165,0	ns	88,6	22,1	ns
E2	0,00-0,20	176,1	226,3	ns	157,1	103,2	ns
	0,20-0,40	50,0	62,0	ns	37,2	34,4	ns
	0,40-0,60	59,3	62,6	ns	34,1	84,6	ns
E3	0,00-0,20	160,5	139,0	ns	148,2	137,0	ns
	0,20-0,40	13,0	40,6	ns	47,8	47,0	ns
	0,40-0,60	15,6	9,8	ns	11,5	7,5	ns

C1 = contraste T1 e T2; C2 = contraste T3 e T4; Prof. = profundidade (m); T1 = preparo convencional com pousio; T2 = adubo verde com *Crotalaria ochroleuca*; T3 = preparo reduzido com *Rip Strip*®; T4 = plantio direto; D1, D2, D3, E1, E2 e E3 = locais de amostragem. *, ns = significativo a 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente, pela análise de contraste entre as médias de C1 e C2.

2.4 DISCUSSÃO

2.4.1 Atributos físicos do solo

Os resultados mostram que os atributos físicos do solo foram diretamente afetados pelos diferentes preparos adotados. Observa-se ao longo do perfil do solo a diferenciação dos grupos de tratamento adotados (manejo convencional x manejo conservacionista), sobretudo no ciclo da cana soca. Durante o primeiro ciclo produtivo da cultura (cana planta), os maiores valores de Ds (Tabela 6) e RP (Tabela 10) ocorreram nos grupos de tratamento de manejo conservacionista do solo (C2), porém no ciclo seguinte (primeira soca), os maiores valores destas variáveis foram observados nos tratamentos relativos ao manejo convencional (C1).

Sabe-se que o uso da subsolagem associado ao uso de gradagens rompe a camada superficial do solo, além de incorporar os resíduos presentes na superfície, quebrando a estrutura do solo, desagregando as partículas e aumentando o movimento de

água no perfil do solo, promovendo desta forma um aumento da macroporosidade e redução na densidade do solo, como pode ser visto neste estudo. Contudo, apesar de parecer benéfico no início do ciclo, no ano seguinte foi observado um efeito “rebote”, em que os tratamentos utilizando o manejo conservacionista se sobressaíram aos demais (MARASCA *et al.*, 2015; TORRES *et al.*, 2015; BARBOSA *et al.*, 2018). Isso foi observado por Barbosa *et al.* (2019), onde no ciclo da cana planta o tratamento convencional apresentou menores valores de Ds, ocorrendo, porém, um aumento desses valores nos ciclos seguintes.

Este efeito pode ser observado, segundo Marasca *et al.* (2015), devido a alteração que ocorre na estrutura do solo, causada pelo revolvimento em profundidade devido as frequentes passadas de máquinas durante todo os ciclos produtivos que se seguem da cultura, promovendo maior compactação nos tratamentos que utilizam preparo convencional do que nos preparos que utilizam revolvimento superficial. Além disso, nota-se um aumento nos valores médios de Ds da cana planta para primeira soca, observado no grupo C1 e uma redução para o grupo C2 para algumas profundidades (Tabela 6). Contudo, segundo Corsini e Ferraudo (1999), valores de densidade do solo em torno de $1,75 \text{ kg dm}^{-3}$, como os valores observados nesse estudo, não são considerados críticos ao desenvolvimento radicular da cultura, para esta mesma classe de solo.

Para a MaP, observa-se que o comportamento foi semelhante na maioria dos grupos de contrastes ortogonais (Tabela 7). Os valores de MaP iguais ou superiores a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, se concentram na LP e no ciclo da cana planta, na cana soca houve uma aparente redução da MaP em ambos os grupos de tratamento não atingindo valores de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ que é considerado o limite crítico para promover as trocas gasosas necessárias ao desenvolvimento do sistema radicular e, por consequência, sendo associada às condições estruturais desfavoráveis ao pleno desenvolvimento das plantas, demonstrando sensibilidade desse atributo perante os impactos provocados pelas atividades antrópicas (REICHERT *et al.*, 2007; SEVERIANO *et al.*, 2008; SALES *et al.*, 2010).

A MiP, dentre os atributos avaliados, foi a que apresentou maior diferenciação entre os preparos de solo, a partir da primeira soca (Tabela 8). Entretanto, os valores médios máximos observados não ultrapassaram $0,21 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ nos grupos de tratamentos testados nos contrastes. É importante salientar que esses valores podem ser considerados baixos, o que é comum nos Neossolos Quartzarênicos, uma vez que a distribuição do espaço poroso apresenta relação direta com a granulometria. Essa

característica do solo em questão deve ser analisada com atenção no manejo adotado, por se tratar de poros de retenção da água disponível às plantas (SEVERIANO *et al.*, 2009).

Para a porosidade total houve uma redução nos valores de PT de um ciclo de cultivo para outro, com diferenças significativas entre os contrastes somente para a primeira soca. A Ds nos ciclos de cultivo avaliados, apresentou um aumento nas médias, sobretudo no grupo de tratamento C1, da cana planta para primeira soca, porém com valores significativos em ambos os ciclos. Esteban *et al.* (2020), em pesquisa com controle de tráfego no cultivo da cana-de-açúcar em um Latossolo Vermelho distrófico, afirmam que a porosidade é afetada diretamente pelo tráfego, onde a cada ciclo ocorre o aumento da Ds e MiP, causado pela transformação de macroporos em microporos e, consequente uma redução da macroporosidade.

A RP apresentou valores significativos entre os grupos de contrastes na diferenciação dos manejos, para ambos os ciclos (Tabela 10). Observa-se que as maiores médias foram verificadas entre 0,05 e 0,40 m de profundidade, no qual a camada 0,10-0,20 m apresentou valores significativos de RP com médias que ultrapassam 4,0 MPa, que segundo Sá *et al.* (2016), está acima do limite considerado aceitável para o pleno desenvolvimento radicular, que seria de 3,8 MPa. Contudo, Arshad *et al.* (1996) citam que em solos não mobilizados anualmente, como é o caso da cana-de-açúcar, os valores médios entre 2,0 e 4,0 MPa não são impeditivos ao crescimento radicular.

2.4.2 Estoque de carbono e Sistema radicular

As médias de estoque de carbono variaram entre 4,08 e 7,28 Mg ha⁻¹, com diferenciação entre os contrastes ortogonais somente para o primeiro ciclo de cultivo da cultura (Tabela 12). Observa-se também maiores concentrações de carbono (C) na camada superficial (0,00-0,10 m), com diminuição na concentração com o aumento na profundidade. O que já era esperado, visto que os teores de carbono orgânico na camada superficial são maiores do que a camada sub superficial, influenciando nos valores de estoque de carbono (EC). Resultados semelhantes foram obtidos por Oliveira *et al.* (2022), que observaram que em ambos os ciclos da cana-de-açúcar, o carbono orgânico do solo reduziu com a profundidade.

Segundo Madari *et al.* (2009) diversos fatores podem interferir na distribuição do carbono no solo, como o tipo do solo em questão, o relevo, a cobertura ou uso do solo, as condições climáticas, a vegetação natural predominante na área, as práticas de uso e manejo do solo, entre outros. Além do mais, conforme Araújo Filho *et al.* (2000), os

Neossolos Quartzarênicos são solos com textura muito arenosa, em geral com alta concentração de areia ou areia franca, apresentando assim baixa capacidade de estocar carbono.

Em relação a diminuição da concentração de EC em profundidade (Tabela 12), verifica-se que outros autores têm relatado maiores valores ou valores não diferentes na camada superficial do solo, para o teor de carbono orgânico e estoque de carbono, seja em solos sob cultivo ou quando comparados aos solos de vegetação natural (COUTINHO *et al.*, 2010; MASCARENHAS *et al.*, 2017; SOL *et al.*, 2021). Portanto, corroborando com os resultados desse trabalho.

Os maiores valores médios de EC observados para o grupo de manejo convencional (C1) em relação ao C2, são decorrentes das maiores densidades do solo (1,62 até 1,77 kg dm⁻³), e resistência do solo à penetração (0,92 até 3,07 MPa). Indicando que o manejo convencional proporcionou maior compactação do solo, devido aos menores valores de macroporosidade (0,05 m³ m⁻³), e porosidade total (0,21 até 0,25 m³ m⁻³). Resultados semelhantes foram obtidos por Oliveira *et al.* (2022), os autores verificaram que o subsolador não melhorou a qualidade física do solo, e para o ciclo da primeira soca, observaram que houve diferença na camada de 0,20-0,40 m com maior valor de estoque de carbono no solo no preparo convencional com grade e menor no sistema plantio direto.

De acordo com Jakelaitis *et al.* (2008) e Guareschi *et al.* (2012), a ausência de ação antrópica, o que ocorre em vegetação nativa, favorece a manutenção de matéria orgânica do solo relacionada com a entrada de resíduos e pouca saída deles, onde os teores de carbono orgânico e estoque de carbono diminuem em função do uso do solo, de modo que, os maiores teores de C normalmente são observados em área de vegetação nativa.

Observa-se que a BSR não apresentou diferenciação entre os grupos de manejo do solo que foram confrontados pelos contrastes C1 x C2. Contudo, nota-se que a concentração do sistema radicular foi maior na camada de 0,00-0,20 m, pelos dois anos agrícolas avaliados, com valores significativos nos locais de amostragens que estavam próximo à região da touceira (D1, D2 e E1) (Tabela 13). Esses resultados corroboram com os encontrados na literatura (OTTO *et al.*, 2011; CURY *et al.*, 2014; SILVA-OLAYA *et al.*, 2017b; ESTEBAN *et al.*, 2019).

Além disso, para o primeiro ciclo produtivo da cultura, no local D2, observa-se que o grupo de tratamento com manejo conservacionista (C2) possui maior concentração do sistema radicular em superfície (244,9 kg ha⁻¹). Para o segundo ciclo de

cultivo, no local E1, o grupo com manejo convencional (C1) obteve o maior valor médio de raízes (359,2 kg ha⁻¹). O contraste C1, na cana planta obteve o maior valor médio de BSR (193,5 kg ha⁻¹) em profundidade (0,40-0,60 m) comparado com o contraste C2. Apresentando, desta forma, aprofundamento da distribuição do sistema radicular para este manejo do solo.

Em pesquisa realizada por três anos agrícolas para avaliar o desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar em diferentes sistemas de preparo do solo e plantas de cobertura, Lovera *et al.* (2021), observaram um melhor desenvolvimento radicular em solos mais arenosos, não apresentando diferenças entre os preparos utilizados. Nos solos mais argilosos, possivelmente devido a maior dificuldade de penetração das raízes, as diferenças significativas entre os preparos são mais presentes. Além disso, os autores verificaram uma maior concentração da biomassa radicular nos primeiros 0,20 m de profundidade do solo, contendo entre 36% e 62% de raízes.

De acordo com Alvarez *et al.* (2000), o sistema radicular tende a se concentrar mais na superfície, e próximo do eixo da touceira. Sampaio *et al.* (1987) mencionam ainda, que 75% da biomassa radicular da cana-de-açúcar encontram-se nos primeiros 0,20 m superficiais e 50% das raízes estão distantes a menos de 0,30 m da touceira, sendo importante se considerar a existência de uma pressão resultante do manejo da cultura, principalmente em relação ao tráfego agrícola na entrelinha, que diminui a porosidade e consequentemente a aeração do solo, como foi observado no presente trabalho.

Observa-se que entre o ciclo da cana planta e primeira soca, ocorreu uma redução na biomassa seca radicular (BSR) nos diferentes manejos avaliados, em algumas profundidades (Tabela 10). Esse comportamento também foi observado por Oliveira *et al.* (2022), que constatou uma redução na biomassa seca radicular (BSR) entre o primeiro e o segundo ciclo de cultivo da cana-de-açúcar nos diferentes manejos estudados, em solo de textura argilosa. Ainda conforme Oliveira *et al.* (2022), a maior quantidade de raiz foi encontrada para o tratamento com plantio direto (PD) na camada superficial do solo (0,00-0,20 m) na cana planta, o mesmo que foi observado neste estudo em que os maiores valores de BSR foram para o manejo conservacionista (C2) na mesma camada e ciclo referidos.

2.5 CONCLUSÕES

Os resultados mostram que as variáveis analisadas permitiram uma diferenciação entre os preparos convencionais e conservacionista do solo, sendo mais

evidente na cana soca, sobretudo para a MiP, que demonstrou ser a variável mais sensível para os contrastes C1 e C2.

O contraste C2 com manejos conservacionistas foram os sistemas com os maiores valores de Ds, no primeiro ciclo de cultivo da cana-de-açúcar, enquanto no segundo ciclo, o contraste C1 apresentou maiores valores para esta variável. O mesmo comportamento foi observado para RP.

O grupo de tratamentos utilizando o manejo convencional (C1) foi o que obteve o maior estoque de carbono no solo, com uma redução dos valores conforme se aumentou a profundidade. Também foi o grupo que proporcionou a maior produção da biomassa seca de raiz na primeira soca quando comparado ao grupo de manejos conservacionistas, além de ter apresentado o maior valor médio em profundidade no primeiro ciclo, ambos para os locais mais próximos da planta.

Os locais de amostragens próximos a região da touceira (D1 e E1) apresentaram um maior desenvolvimento do sistema radicular, com maior acúmulo de biomassa seca de raízes nos primeiros 0,20 m de profundidade, em relação aos locais mais afastados da planta.

3. QUALIDADE DO SOLO NO CULTIVO DA CANA-DE-AÇÚCAR EM MANEJOS CONSERVACIONISTA E CONVENCIONAL DO SOLO

Resumo

O revolvimento excessivo do solo no manejo convencional causa diversos danos, fazendo com que ocorra a sua degradação física, sendo importante sua substituição por manejos que preservem a qualidade estrutural do solo. Com isso, estudos sobre os efeitos dos manejos convencionais e conservacionistas nos atributos do solo, na ocasião da reforma dos canaviais, é importante para manter a qualidade do solo agrícola e assim aumentar a produtividade da cultura. Portanto, o objetivo dessa pesquisa foi avaliar os efeitos de diferentes preparos do solo sobre os seus atributos físicos, químicos e a biomassa radicular da cana-de-açúcar cultivada em sucessão ao amendoim e *Crotalaria ochroleuca*. O experimento foi instalado nas dependências da Fazenda Agroterenas em um Neossolo Quartzarênico no município de Paraguaçu Paulista, Estado de São Paulo, Brasil. Os tratamentos de preparo do solo adotados foram: T1- Preparo convencional com pousio; T2- Adubo verde com *Crotalaria ochroleuca*; T3- Preparo reduzido com o equipamento *Rip Strip*®; T4- Plantio direto de amendoim. Foram avaliados os atributos físicos e químicos do solo como: densidade do solo, porosidade do solo, resistência do solo à penetração, estoque de carbono no solo, pH, soma de bases, teor de fósforo no solo, além da biomassa seca radicular da cana-de-açúcar. Os resultados foram analisados com o auxílio da análise estatística multivariada, por meio da análise de componentes principais. Houve correlação positiva entre a biomassa radicular e a densidade do solo, resistência do solo à penetração e estoque de carbono. Observou-se a formação de dois grupos distintos, em que os manejos com adubo verde e plantio direto foram agrupados separadamente do manejo com plantio convencional. Verifica-se uma maior influência dos preparos com adubo verde e plantio direto na macroporosidade, microporosidade, estoque de carbono no solo e resistência do solo à penetração.

Palavras-chave: Compactação do solo, sistema radicular, *Rip Strip*®, *Saccharum officinarum*.

3.1 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar ocupa mais de 10 milhões de hectares de terras agricultáveis no Brasil, com uma produção média de 757 milhões de toneladas (IBGE, 2022). O agronegócio representa aproximadamente 27% do produto interno bruto (PIB) brasileiro, o que corresponde a US\$ 390 bilhões na economia mundial (THE WORLD BANK, 2023). Porém, o manejo intensivo do solo tem sido responsável pela conversão de áreas naturais em regiões cultivadas, o que leva à diminuição da saúde do solo e à estagnação da produtividade (MARTINELLI *et al.*, 2017) em muitas culturas, como a cana-de-açúcar. Além disso, há uma preocupação relacionada principalmente com a redução dos custos e a manutenção da produtividade e otimização da colheita, visto que os custos da cana-de-açúcar nas operações em campo são responsáveis por mais de 50% do custo total da produção de etanol por área plantada (JONKER *et al.*, 2016).

Com isso, novos equipamentos foram implementados no manejo da cultura, dentre eles o *Rip Strip*® (Kelley Manufacturing Co.). Esse equipamento vem sendo testado há três anos para a cultura do amendoim em reforma de canaviais com resultados favoráveis em termos de produtividade, redução da compactação na linha de semeadura e melhoria na uniformidade de emergência (BOLONHEZI *et al.*, 2017). O *Rip Strip*® realiza preparo em faixas entre 0,20 e 0,46 m de largura por meio de quatro discos corrugados posicionados na vertical e entre 0,25 e 0,45 m de profundidade, por meio de uma haste subsoladora, na linha de plantio. Nesse contexto, Oliveira *et al.* (2022), avaliando os atributos do solo e o rendimento da cana-de-açúcar em um Latossolo Vermelho, cultivado com quatro sistemas de preparo, incluindo o preparo mínimo com *Rip Strip*®, obtiveram produtividade de 112,59 Mg ha⁻¹ e 89,15 Mg ha⁻¹ para cana planta e no segundo ciclo (primeira cana soca), respectivamente.

O uso de leguminosas como plantas de cobertura no cultivo cana-de-açúcar é uma prática amplamente utilizada tanto em sistema orgânico como em convencional, na ocasião de reforma do canavial e antes do plantio da cana, o que proporciona, além da redução da incidência de plantas daninhas, incrementos na produtividade da cultura comercial, melhoria dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo (NIXON; SIMMONDS, 2004), economia da adubação nitrogenada e geração de renda (AMBROSANO *et al.*, 2011). A cultura do amendoim é uma das opções utilizadas na reforma de canaviais, sendo que dos 150 mil hectares em cultivo no Brasil, cerca de 122 mil estão vinculados ao sistema de produção canavieiro.

Para o cultivo da cana-de-açúcar, se faz necessário a utilização de operações de preparo do solo, como o tráfego de máquinas e implementos utilizados desde o preparo do solo até a colheita (SILVA *et al.*, 2016; GUIMARÃES JÚNNYOR *et al.*, 2019a). Contudo, essas operações contribuem para a degradação da estrutura do solo, ao longo dos anos, ocasionando alterações nos atributos físicos do solo como, porosidade do solo, densidade do solo e resistência do solo à penetração das raízes, prejudicando o crescimento, produtividade e longevidade da cultura (SOUZA *et al.*, 2014; CHERUBIN *et al.*, 2017, ESTEBAN *et al.*, 2019; AWE *et al.*, 2020; LOVERA *et al.*, 2021).

O preparo convencional e o cultivo mínimo são os sistemas de cultivo do solo mais utilizados no manejo da cana-de-açúcar, onde o preparo convencional envolve operações de aração e gradagem, acompanhadas de subsolagem em área total com o objetivo de romper camadas compactadas, nivelar a superfície do solo e eliminar plantas daninhas, além de incorporar corretivos e fertilizantes no solo (BELARDO *et al.*, 2015; BORDONAL *et al.*, 2018; AWE *et al.*, 2020) enquanto que o preparo mínimo, conhecido também como preparo conservacionista ou preparo reduzido, se caracteriza pela sequência de operações que reduza as perdas do solo e da água, diminuindo a utilização dos implementos de discos mas possibilitando o uso de outros equipamentos como o arado escarificador, além da manutenção de resíduos na superfície e o uso de rotação de culturas (CARVALHO *et al.*, 2017; MORAES *et al.*, 2019; AWE *et al.*, 2020; LUZ *et al.*, 2022).

Neste contexto, a adoção de manejos conservacionistas, com menor mobilização do solo, torna-se essencial, pois este tipo de preparo promove menor perda de solo por erosão, devido ao menor revolvimento do solo, e menor uso de máquinas e implementos, contribuindo para o aumento da capacidade produtiva do solo e da redução do consumo de combustíveis (SOUZA *et al.*, 2014; MORAES *et al.*, 2019; LUZ *et al.*, 2022). Além de contribuir para a redução de problemas relacionados à compactação de forma mais localizada, na diminuição da densidade do solo, na resistência do solo à penetração das raízes e ainda favorece o aumento do espaço poroso do solo, pois interfere na microporosidade, que possui a função de retenção e armazenamento de água no solo, e na macroporosidade, cuja função é a de arejar e infiltrar a água no solo, criando condições adequadas para o crescimento das raízes de cana-de-açúcar (NAGAHAMA *et al.*, 2016; LUZ *et al.*, 2022; OLIVEIRA *et al.*, 2022).

Contudo, cabe ressaltar que a resposta da cana-de-açúcar em função da diminuição do nível de preparo depende de diversos fatores, tais como: características do

solo em questão, do tipo de cultura utilizada na reforma, do histórico de pragas do talhão e da necessidade de incorporar fertilizantes e corretivos, além do tipo de plantio utilizado (manual, mecanizado, mudas pré-brotada etc.). Portanto, a adoção de sistemas conservacionistas de manejo do solo (plantio direto e *Rip Strip*®) para a cultura do amendoim na reforma de cana crua, poderá melhorar a estrutura do solo cultivado com cana-de-açúcar RB 86-7515 plantada sem preparo em sucessão, para as condições de Neossolo Quartzarênico, durante o primeiro ano da cultura.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

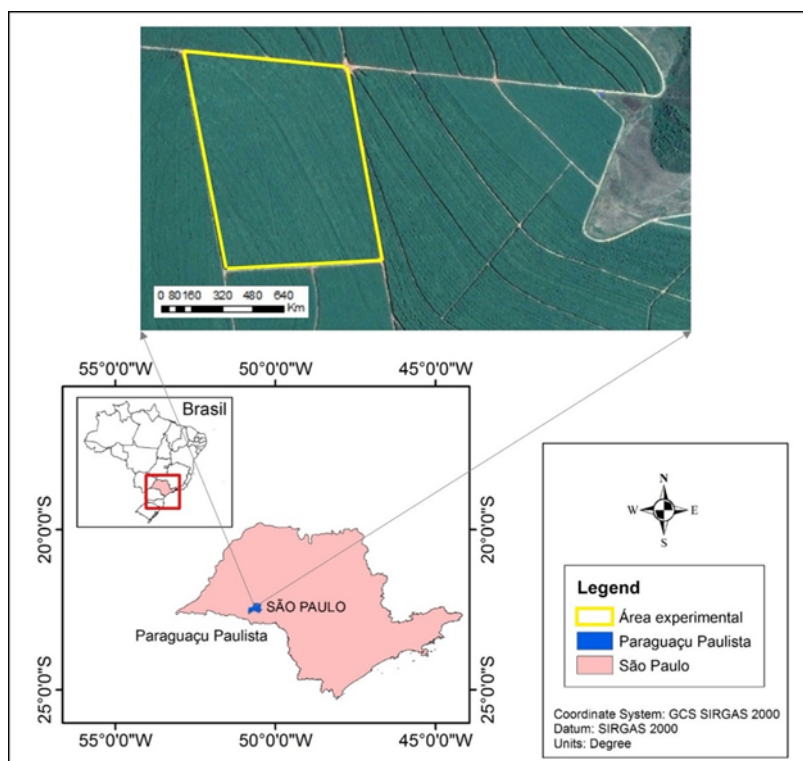
3.2.1 Área experimental e histórico

O estudo foi conduzido nas dependências da Fazenda Agroterenas, localizada no município de Paraguaçu Paulista, Estado de São Paulo, Brasil, nas seguintes coordenadas geográficas: 22°24'53" de latitude sul e 50°34'35" de longitude oeste com 420 m de altitude (Figura 13). O clima da região é classificado, segundo Köppen, como Cwa, temperado úmido com inverno seco e verão quente, e apresenta precipitação anual entre 1.430 e 1.517 mm e temperatura média anual de 22 °C (ALVARES *et al.*, 2013). O solo da área foi classificado como Neossolo Quartzarênico órtico típico, álico, textura arenosa, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SBCS) (SANTOS *et al.*, 2018) ou, como Entisols Quartzipsamments de acordo com o Soil Taxonomy System (SOIL SURVEY STAFF, 2014).

A área experimental consiste em um canavial de 10,0 ha com histórico de sete cortes mecanizados e sem queima (Tabela 1). Anteriormente ao plantio da cana-de-açúcar, a área foi cultivada com amendoim em semeadura direta sobre palhço, adubo verde e uma faixa deixada em pousio desde dezembro de 2016. Como práticas corretivas, foram aplicados 1,7 Mg ha⁻¹ de calcário dolomítico (PRNT 85%), 1,0 Mg ha⁻¹ de gesso agrícola e 350 Mg ha⁻¹ de fosfato, os quais foram incorporados nos sistemas de manejo de solo convencional e deixados sobre palhada nos sistemas conservacionistas.

Após, foram instalados os tratamentos de preparo do solo. Os tratamentos estabelecidos foram: T1- preparo convencional com grade aradora, subsolagem e pousio; T2- adubo verde com semeadura de *Crotalaria ochroleuca*; T3- preparo reduzido com *Rip Strip*® e semeadura de amendoim; T4- semeadura direta de amendoim. É importante esclarecer que os preparos do solo foram realizados para a cultura do amendoim e nenhum foi realizado previamente ao plantio da cana-de-açúcar. A caracterização da área encontra-se na Tabela 14.

Figura 13. Localização da área experimental de cana-de-açúcar em Paraguaçu Paulista, São Paulo, Brasil.



O plantio do amendoim foi realizado no dia 26 de novembro de 2016 com a utilização de uma semeadora Baldan SPA Megaflex Air e um trator Valtra, modelo BM 125i, 132 cv, utilizando 110 kg ha^{-1} de sementes, nesta mesma ocasião ocorreram as operações de preparo de solo. Para o plantio da *Crotalaria ochroleuca* ocorreu em linhas por meio de uma semeadora de plantio direto de nove Linhas, Baldan Modelo Solo grafic 4500 e um trator Valtra, modelo BM 125i, 132 cv, utilizando 25 kg ha^{-1} de sementes.

Na implantação dos tratamentos, o preparo do solo das áreas foi realizado com as seguintes operações e equipamentos: a) eliminação mecânica da soqueira da lavoura anteriormente instalada foi realizada com um equipamento da marca DMB – com o objetivo de eliminar simultaneamente duas linhas de soqueiras de cana. O implemento possui dois discos de corte que atuam sobre a linha da soqueira; b) A gradagem foi realizada com uma grade niveladora marca BALDAN®, modelo NV (número de discos: 44; largura de trabalho: 3760 mm; espaçamento entre discos: 175 mm; diâmetro do eixo $\varnothing$: 1,1/4"), a uma profundidade de trabalho de 50 a 150 mm, após a erradicação da soqueira; c) Aração foi realizada com um arado da marca BALDAN®, modelo AF (número de discos: 5; largura de trabalho: 1500 mm; espaçamento entre discos: 550 mm;

peso aproximado: 664 kg e 30"); d) A subsolagem foi realizada na camada de 0,45 m com o subsolador da marca BALDAN®, modelo SCB-CR de 5 hastes, espaçadas 450 mm umas das outras, com engate de arrasto.

Tabela 14. Caracterização granulométrica e química da área experimental de cana-de-açúcar em Paraguaçu Paulista, São Paulo, Brasil.

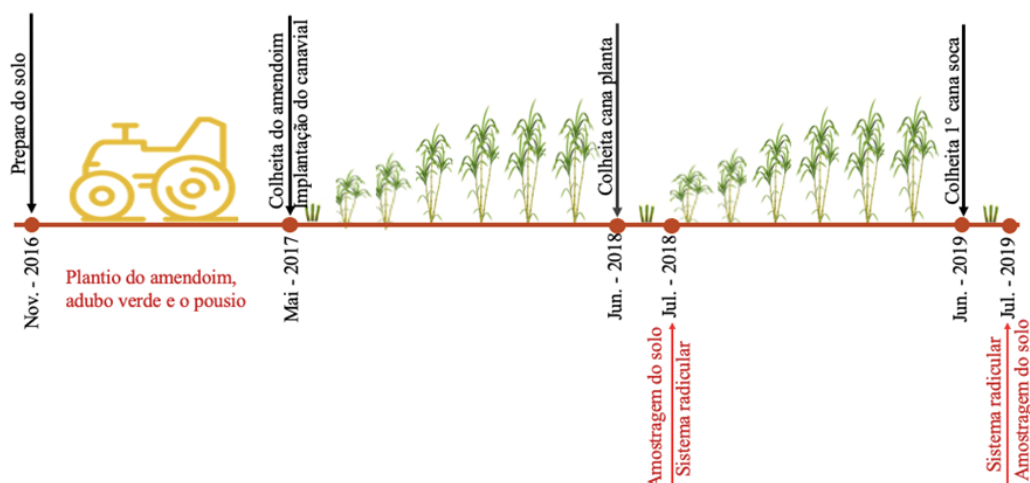
Distribuição granulométrica ¹										
Profundidade		Argila			Silte			Areia		
(m)		----- (g kg ⁻¹) -----								
0,00-0,05		87			47			866		
0,05-0,10		85			43			872		
0,10-0,20		89			42			869		
0,20-0,40		96			43			861		
0,40-0,60		111			47			842		
Atributos químicos										
Profundidade	MO	pH	P	K	Ca	Mg	H+Al	SB	CTC	V
(m)	g dm ⁻³	CaCl ₂	mg dm ⁻³	-----mmol _c dm ⁻³ -----						%
0,00-0,25	14	5,5	10	0,4	25	5	20	30,4	50,4	60,3
0,25-0,50	9	5,2	10	0,4	14	4	23	18,4	41,4	44,4

¹Método da pipeta com baixa rotação (TEIXEIRA *et al.*, 2017). ²Métodos de análise química (RAIJ *et al.*, 2001).

O plantio manual da cana-de-açúcar, variedade RB 86-7515, foi realizado no dia 20 de maio de 2017 utilizando espaçamento duplo alternado (linhas duplas com 0,90 m espaçadas a 1,50 m). A adubação de plantio consistiu no fornecimento de 500 kg ha⁻¹ de N-P-K (formulação 6-30-10) e na ocasião foi aplicado 0,5 L ha⁻¹ do fungicida Comet (piraclostrobina), além do inseticida fipronil (0,25 kg ha⁻¹).

O equipamento *Rip Strip*® foi desenvolvido pela empresa KMC (Kelley Manufacturing Co.) para viabilizar a cultura do amendoim em manejos conservacionistas nos Estados Unidos, mas com pouca utilização na cultura da cana-de-açúcar, fato que caracteriza uma inovação para a cultura. O equipamento realiza o preparo em faixas entre 0,20 e 0,46 m de largura por meio de quatro discos corrugados posicionados na vertical e entre 0,25 e 0,45 m de profundidade por meio de uma haste subsoladora. A Figura 14 apresenta uma linha do tempo dos acontecimentos ocorridos durante o período do estudo na área de estudo com os momentos de coleta avaliados.

Figura 14. Linha do tempo dos eventos que ocorreram na área de estudo da Fazenda Agrotórenas em Paraguaçu Paulista, Estado de São Paulo, Brasil.



3.2.2 Delineamento experimental e tratamentos

O experimento obedece a um esquema em faixas, com quatro tratamentos de preparo de solo e três repetições, sendo: T1- preparo convencional; T2- adubo verde com *Crotalaria ochroleuca*; T3- preparo reduzido com *Rip Strip*®; T4- Plantio direto (Tabela 15). A área de cada tratamento é de dois hectares para o plantio da cana-de-açúcar.

Tabela 15. Descrição dos tratamentos avaliados na área de estudo em Paraguaçu Paulista, São Paulo, Brasil.

Tratamentos	Preparos do solo
T1 – Plantio convencional	Destruidor de soqueira + grade + subsolagem + pousio
T2 – Adubo verde	Destruidor de soqueira + grade + subsolagem + semeadura de <i>Crotalaria ochroleuca</i>
T3 – Preparo reduzido com <i>Rip Strip</i>®	<i>Rip Strip</i> ® + semeadura de amendoim
T4 – Plantio direto	Semeadura direta de amendoim

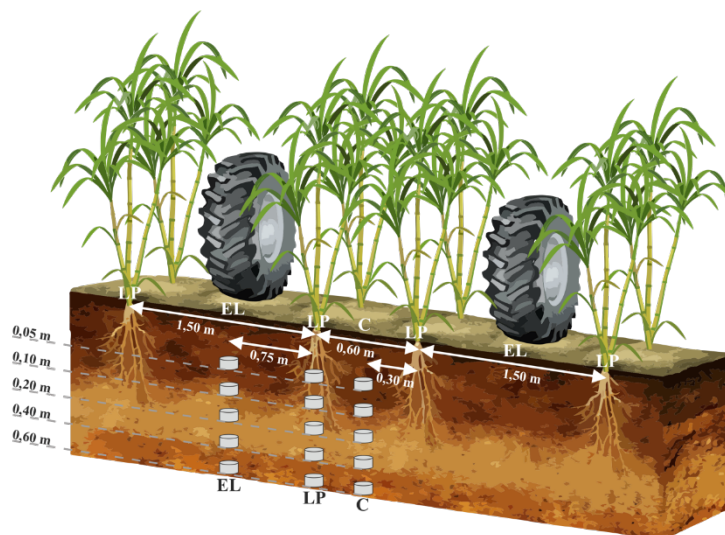
3.2.3 Coleta de solo para determinação dos atributos físicos do solo

Para todos os tratamentos, as coletas das amostras deformadas e indeformadas de solo foram realizadas após o momento de colheita da cana-de-açúcar (cana planta), nas

seguintes profundidades: 0,00-0,05 m, 0,05-0,10 m, 0,10-0,20 m, 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m, conforme esquema representado na Figura 15.

As amostras foram coletadas em três locais: linha de plantio (LP) – local correspondente à região da touceira (sulco); entrelinha das culturas (EL) – localizado no centro das duas linhas de plantio e, distanciado a 0,75 m da linha de plantio, sendo o local teórico onde deve ocorrer o tráfego dos rodados das máquinas; canteiro (C) – ponto médio entre a linha de plantio e a linha do rodado, localizado a 0,375 m da linha de plantio.

Figura 15. Local de amostragem de solo nos tratamentos da área experimental localizada em Paraguaçu Paulista, São Paulo, Brasil. LP = linha de plantio, C = canteiro, EL = entrelinha das culturas.



3.2.4 Atributos físicos do solo

Caracterização granulométrica: Foram determinadas as frações de areia, silte e argila utilizando terra fina seca ao ar pelo método da pipeta com solução de Hidróxido de Sódio $0,1 \text{ Mol L}^{-1}$ (NaOH) como agente dispersante (TEIXEIRA *et al.*, 2017).

Densidade do solo, densidade de partículas e porosidade do solo: A densidade do solo foi calculada pela relação existente entre a massa do solo seco em estufa a 105°C , e o volume da amostra. A densidade de partículas foi determinada utilizando um picnômetro de 50 mL. A microporosidade, por sua vez, pelo método da mesa de tensão aplicando-se uma coluna de água com altura de 0,06 MPa nas amostras saturadas. A porosidade total pela relação entre a densidade do solo e a densidade de partículas e, a macroporosidade pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade (TEIXEIRA *et al.*, 2017).

Resistência do solo à penetração: Foi utilizado o penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar com ângulo de cone de 30°, área do cone de 1,29 cm² e haste de 0,7 m de comprimento. A transformação da penetração da haste do aparelho no solo (cm impacto⁻¹) em resistência à penetração foi obtida conforme a Equação 9, descrita por Stolf *et al.* (2014):

$$RP = 0,56 + 0,689 \times (N/P) \times 10 \quad (9)$$

em que, RP = resistência do solo à penetração (MPa); N = número de impactos; P = penetração do cone no solo (cm).

As determinações de RP foram realizadas no mesmo dia para reduzir a variação da umidade do solo. A umidade do solo foi determinada pelo método gravimétrico (TEIXEIRA *et al.*, 2017), utilizando um trado tipo rosca para coleta da amostra de solo nas mesmas profundidades (Figura 14). Cada amostra de solo foi acondicionada numa lata de alumínio para impedir a perda de água até seu processamento em laboratório.

3.2.5 Atributos químicos do solo

Foram realizadas amostras compostas de solo para análise dos atributos químicos nas mesmas profundidades avaliadas para os atributos físicos do solo. As amostras de solo foram secas ao ar e em seguida passadas em peneira de 2,0 mm. Foram analisados o pH e os macronutrientes contidos no solo, no qual foram determinados o fósforo disponível e cátions trocáveis (Ca, Mg e K), de acordo com metodologia proposta por Raij *et al.* (2001) e a partir destes valores foram calculados a soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions (CTC) e a porcentagem de saturação por bases (V%).

3.2.6 Estoque de carbono no solo

Os estoques e teores de carbono em cada sistema de manejo foram calculados e avaliados conforme Segnini *et al.* (2012). As amostras de solo foram coletadas, secas ao ar em laboratório e depois moídas e tamizadas em peneiras com malha de 0,25 mm. O conteúdo de carbono foi determinado por combustão a seco conforme Nelson e Sommers (1996). Após o estoque de carbono foi calculado de acordo com a seguinte equação:

$$EC = CO * Ds * CS \quad (10)$$

em que, EC = estoque de carbono no solo (Mg ha^{-1}); Ds = densidade do solo (kg dm^{-3}); CS = camada de solo avaliada (cm); CO = teor de carbono orgânico no solo (g g^{-1}).

O estoque foi calculado em Mg ha^{-1} multiplicando a concentração de carbono em (%) pela densidade do solo (g cm^{-3}) e pela espessura da camada (cm). Os valores de estoque de carbono encontrados foram corrigidos com base em massa equivalente (ELLERT; BETTANY, 1995).

3.2.7 Avaliação do sistema radicular

Para a avaliação do sistema radicular foi utilizado a metodologia descrita por Otto *et al.* (2011). Foram usadas sondas em aço inox com 1,0 m de comprimento e 0,055 m de diâmetro interno (SONDATERRA®) para coletar amostras de solo nas profundidades de 0,00-0,20 m, 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m (Figura 16). As avaliações foram realizadas ao final do ciclo cana planta (abril de 2018) e ao final da primeira cana soca (junho de 2019). Foram coletadas em três pontos para cada lado da linha de plantio, sendo o primeiro ponto próximo a linha, o segundo a distância de 0,30 m da linha e o terceiro a 0,60 m para cada lado.

Após a coleta das amostras, foi efetuada a separação do solo das raízes por peneiramento (malha 2,0 mm). As raízes e rizomas foram separados do solo e lavados em água corrente (VASCONCELOS *et al.*, 2003; FARONI e TRIVELIN, 2006). Posteriormente, as raízes foram secas em estufa ventilada a $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ e obtidas as massas de material seco (FREDDI *et al.*, 2007) para determinação da matéria seca e extrapoladas por hectare.

A biomassa seca das raízes foi calculada de acordo com Otto *et al.* (2011), como descrito pelas equações abaixo:

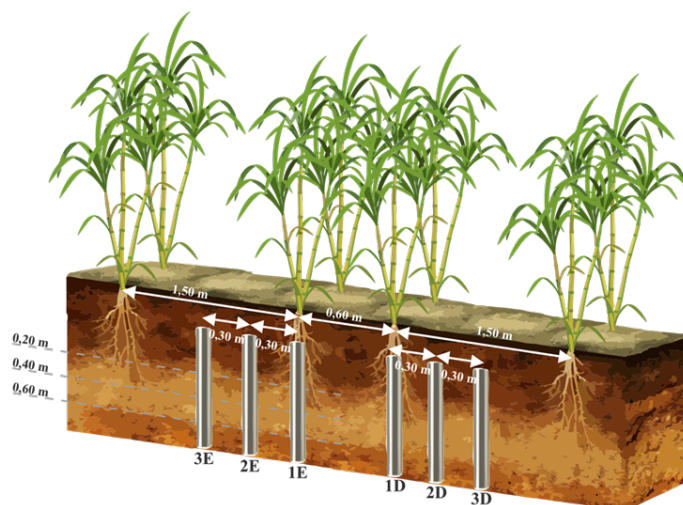
$$\text{BSR} = (\text{DR} * \text{Vs}) \quad (11)$$

em que, BSR = biomassa seca radicular (kg ha^{-1}); DR = densidade radicular em (g dm^{-3}); Vs = volume do solo representado em cada ponto amostrado em ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$).

$$\text{DR} = \text{Ms} / \text{Vm} \quad (12)$$

em que, Ms = massa seca de raízes (g); Vm = volume da sonda amostrado (dm^{-3}).

Figura 16. Esquema de amostragem para avaliação das raízes pelo método da sonda na área experimental em Paraguaçu Paulista, São Paulo, Brasil.



3.2.8 Análises dos resultados

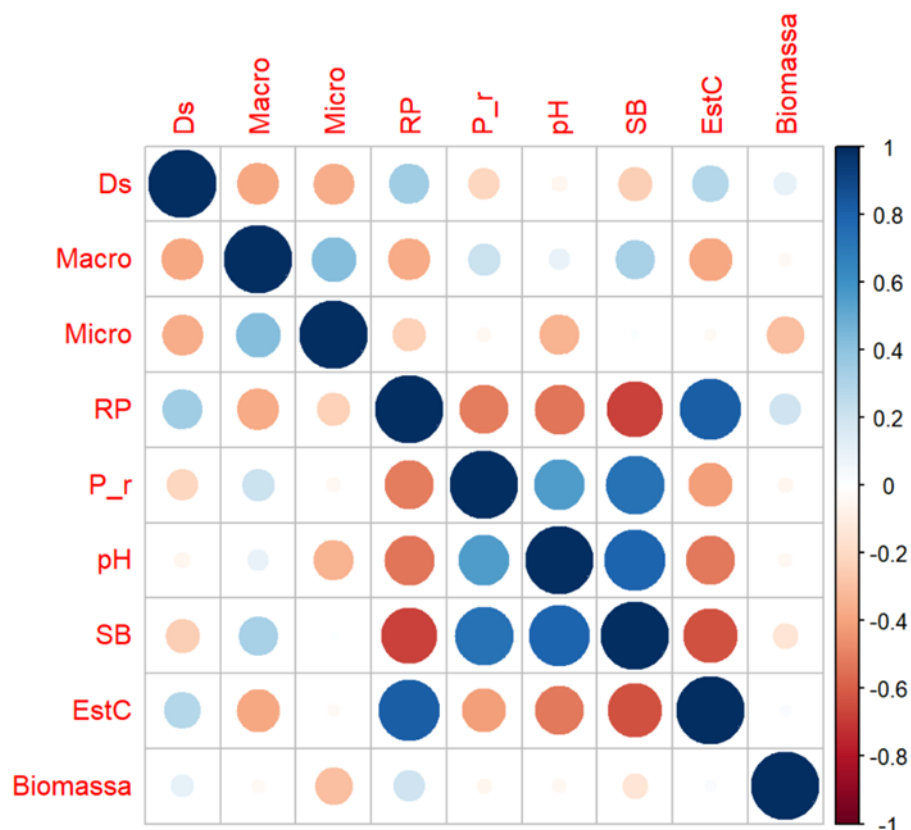
Foi realizada uma abordagem multivariada por meio de análise de componentes principais (ACP), onde os componentes principais (CP) formam combinações lineares das variáveis originais, criando eixos ortogonais onde são plotados em gráficos bidimensionais ou tridimensionais. A análise aumenta a variância, evidenciando o poder discriminatório de cada variável, onde os primeiros CP detêm de mais informações. Todas as análises estatísticas foram realizadas no software livre R (R Development Core Team, 2020).

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1 Correlação entre as variáveis e análise de componentes principais (PCA)

Com o intuito de analisar a importância de cada atributo do solo utilizado no estudo, estes foram correlacionados entre si e com a biomassa radicular, gerando uma matriz de correlações, que foi elaborada empregando-se a Correlação de Pearson (r), sendo que quanto maior r , maior será a intensidade das cores azul (correlação positiva entre as variáveis) e vermelha (correlação negativa). Sendo assim, na Figura 17, está descrita a correlação entre os atributos químicos (pH, SB, teor de P e Est C), físicos (Ds, MaP, MiP e RP) do solo, e da biomassa radicular da cana-de-açúcar. Verificou-se correlação positiva entre a biomassa radicular e a Ds, RSP e Est C. Destaca-se, que a biomassa radicular da cana-de-açúcar proporcionou uma correlação negativa entre a MaP, MiP, P, pH e SB no solo.

Figura 17. Matriz de correlação linear entre os atributos do solo analisados na área experimental em Paraguaçu Paulista, São Paulo, Brasil.



Para estudar a estrutura multivariada presente no conjunto inicial dos dados, é usual trabalhar com a análise de componentes principais (ACP), que condensa as variáveis originais medidas (dados) em novas variáveis não medidas, a partir de combinações lineares (componentes principais), na tentativa de avaliar o poder discriminatório das variáveis originais. A ACP é o cálculo dos autovalores e correspondentes autovetores a partir da matriz variância-covariância ou de uma matriz de coeficientes de correlação entre variáveis (CARVALHO JÚNIOR *et al.*, 2008).

Assim, foram considerados os componentes principais (CPs) cujos autovalores foram superiores ou iguais à unidade (KAISER, 1958), desse modo, os três primeiros CPs (CP1, CP2 e CP3), juntos explicam 74,16% da variância dos atributos (Figura 18 e Tabela 16). Foram acatados os dois primeiros componentes principais CP1 e CP2 que explicam 62,86% da variância total dos dados, sendo que o CP1 e CP2 foram capazes de explicar 42,31% e 20,55% das variâncias, respectivamente (Figura 18). Tavares *et al.* (2015), em estudo sobre FCO₂ e atributos físicos, químicos e biológicos do solo em sistemas de manejo na cana-de-açúcar, observaram que os dois primeiros

componentes principais explicaram 46,53%, sendo o CP1 e CP2, 30,46% e 16,10% da variância, respectivamente.

Figura 18. Gráfico de variância explicada do conjunto de variáveis para cada componente principal (CP).

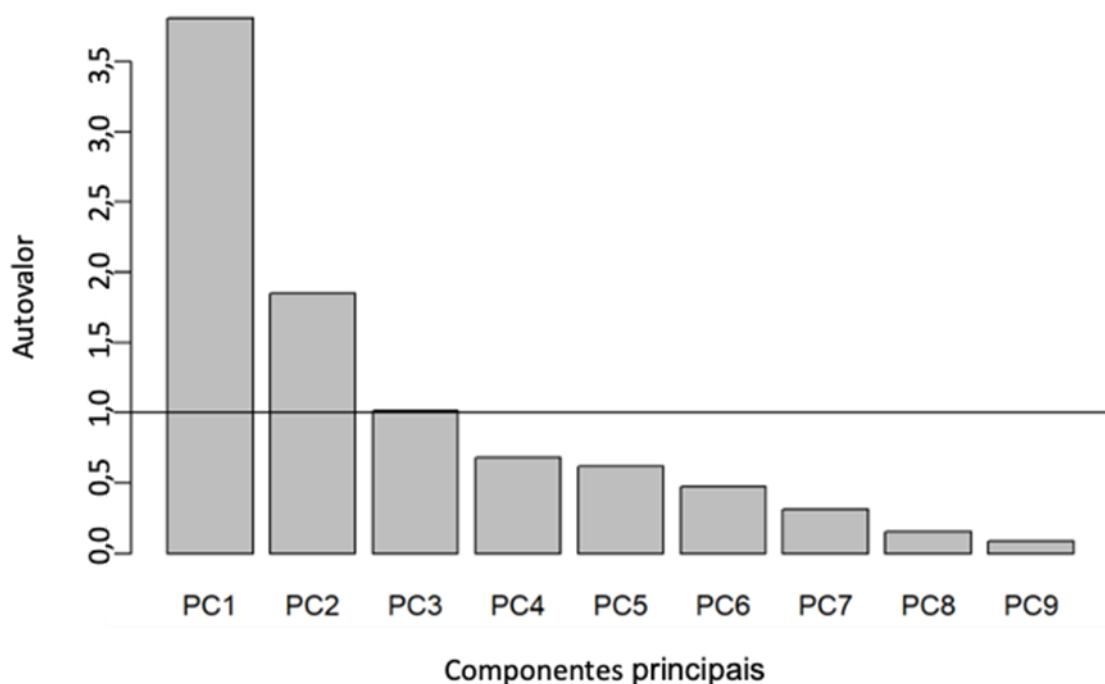


Tabela 16. Componentes principais (CP1, CP2, CP3, CP4, CP5, CP6, CP7, CP8 e CP9) da análise multivariada dos atributos físico-químicos, biomassa radicular e estoque de carbono de um Neossolo Quartzarênico, cultivado com cana de açúcar.

CP	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8	CP9
Autovalores	3,807	1,850	1,016	0,681	0,618	0,477	0,313	0,152	0,085
% VE	0,432	0,205	0,112	0,075	0,068	0,530	0,034	0,016	0,009
% VEA	42,31	62,86	74,16	81,73	88,59	93,89	97,36	99,05	100,00

CP = componentes principais; %VE = % da variância explicada; %VEA = % da variância explicada acumulada.

A correlação entre as variáveis e as componentes principais permitiu caracterizar as variáveis que mais discriminaram na diferenciação dos manejos do solo (Tabela 17). Em CP1, por ordem de importância, os dados que apresentaram maiores coeficientes de correlação foram: SB (-0,902), RSP (0,873), Est C (0,817) e P (-0,735) e, em CP2, por ordem de importância, os dados que apresentaram maiores coeficientes de

correlação foram: MiP (0,872), pH (-0,538), Ds (-0,534) e MaP (0,525). E em CP3 biomassa radicular (0,878), MaP (0,370), Ds (-0,222) e Est C (-0,160).

Tabela 17. Correlações entre os atributos físico-químicos do solo e biomassa radicular da cana-de-açúcar, nos três primeiros componentes principais da PCA.

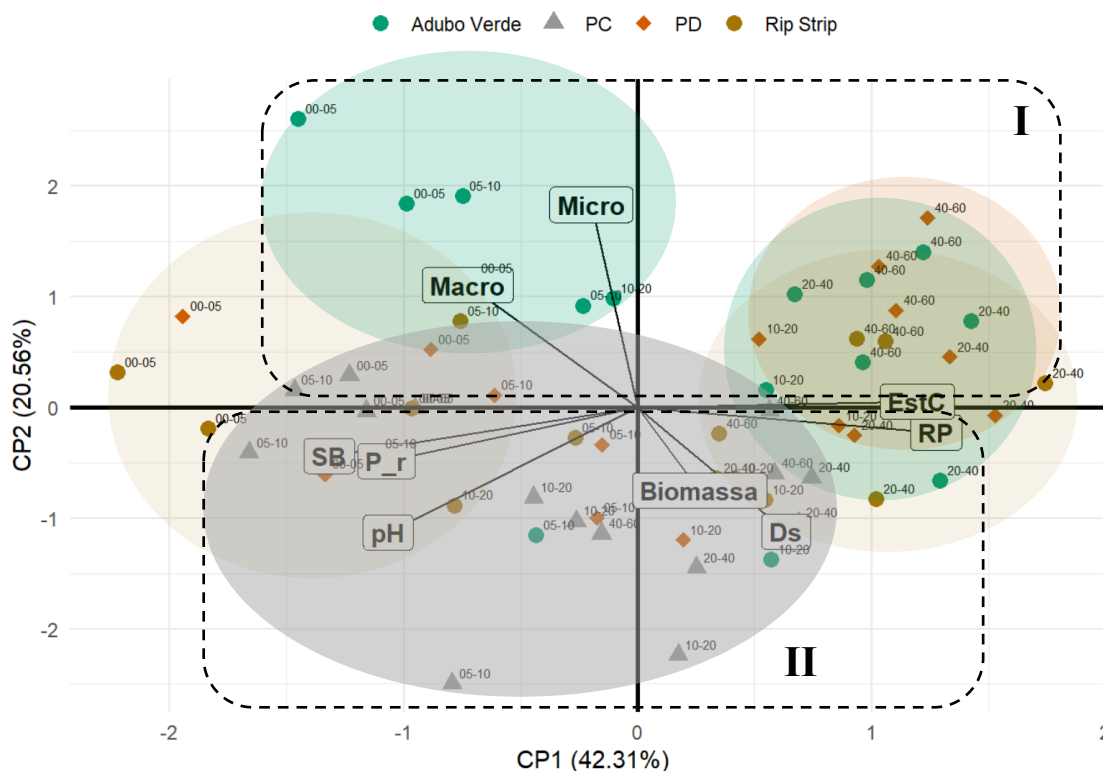
Atributos	Componente Principal (Ranking)		
	CP1	CP2	CP3
Físicos			
Macroporosidade	-0,497 (6°)	0,525 (4°)	0,370 (2°)
Microporosidade	-0,136 (9°)	0,872 (1°)	-0,088 (7°)
Densidade do solo	0,434 (7°)	-0,534 (3°)	-0,222 (3°)
Resistência à penetração	0,873 (2°)	-0,108 (8°)	0,054 (8°)
Químicos			
Soma de base	-0,902 (1°)	-0,208 (7°)	-0,090 (6°)
Potencial hidrogeniônico	-0,730 (5°)	-0,538 (2°)	-0,108 (5°)
Teor de fósforo	-0,735 (4°)	-0,231 (6°)	-0,043 (9°)
Estoque de carbono	0,817 (3°)	0,024 (9°)	-0,160 (4°)
Biológicos			
Biomassa radicular	0,180 (8°)	-0,357 (5°)	0,878 (1°)

Cada um dos componentes principais (CPs) gerou uma representação bidimensional do espaço amostral original, denominado gráfico Biplot (Figura 19), permitindo caracterizar a estrutura das variáveis direcionando feixes nas regiões de máxima variabilidade. Observa-se através do gráfico biplot, a formação de pelo menos, dois grupos distintos. O primeiro grupo, localizado no lado superior do gráfico biplot, formado por amostras provenientes da área com adubo verde e plantio direto (PD), e um segundo agrupamento de pontos posicionados do lado inferior do primeiro componente principal, constituído pelas amostras provenientes da área de plantio convencional (PC), mais agrupados em relação as demais áreas. Ainda, o manejo com *Rip Strip*®, foi um intermediário entre os dois.

Em uma análise mais apurada do gráfico biplot, nota-se ainda que o grupo constituído pela área de PC foi o que apresentou menor dispersão dos pontos, formando um maior agrupamento, enquanto o segundo grupo, representados pelas áreas de adubo verde e PD aparenta ter uma relação média com praticamente todas as variáveis (Figura

8). Na área com a utilização do *Rip Strip*® demonstra ter maior dispersão dos pontos ao longo dos eixos, com maior variabilidade dos atributos avaliados.

Figura 19. Gráfico biplot dos componentes principais CP1 e CP2 com todas as observações avaliadas.



Em relação as variáveis, no grupo I, verifica-se maior influência da MaP, MiP e Est C, posicionados no grupo do adubo verde (Figura 19). De modo geral, principalmente na camada 0,00-0,05 m, houve correlação positiva para CP2. Ainda, em relação à RSP, houve correlação negativa para CP2, posicionados tanto no grupo do adubo verde quanto no PD na camada 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m. Isso demonstra uma correlação indireta entre a RSP e a MaP e MiP do solo, já que estão em direções opostas, ou seja, maiores valores de RSP indicam diminuição da porosidade do solo. E uma correlação direta entre MaP, MiP e Est C, indicando que o solo esteja mais poroso devido ao acúmulo de carbono no solo, oriundo dos restos culturais do amendoim e do adubo verde. Conforme Cherubin *et al.* (2021c), a remoção da palha afeta negativamente a saúde e a dinâmica do solo, reduzindo teores de nutrientes, aumentando a compactação do solo e esgotando o teor de carbono orgânico.

No grupo II, a SB, P e pH foram os atributos que estão posicionados no grupo do PC que mais influenciaram na camada 0,00-0,05 m e 0,05-0,10 m, com correlação negativa para CP1, enquanto a biomassa radicular e a Ds, foram os atributos que mais influenciaram nas camadas 0,10-0,20 m, 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m, com correlação positiva para CP1 (Figura 19). Isso pode indicar que a Ds está diretamente relacionada a biomassa radicular, já que apresentam sentidos iguais, e indiretamente com a MaP e MiP do solo, sentidos opostos. O aumento da Ds causou a redução da MaP e MiP do solo, e o aumento da biomassa radicular da cana. O preparo intensivo do solo realizado para o plantio de cana-de-açúcar rompe as camadas compactadas do solo, reduzindo a Ds e aumentando a MaP (DAL FERRO *et al.*, 2014; JABRO *et al.*, 2016; SITHOLE *et al.*, 2016; BARBOSA *et al.*, 2019).

Além disso, esses resultados podem indicar que as plantas precisaram emitir muitas raízes e manter a massa radicular em maior quantidade, indicando que no tratamento PC, as raízes podem estar drenando reservas para ampliar o sistema radicular, em busca de nutrientes e água nas camadas mais profundas do solo (Figura 19). Segundo Vasconcelos *et al.* (2003), a manutenção de grande massa de raízes resulta em grande gasto de energia metabólica e tem consequências negativas sobre o crescimento em altura de plantas e sobre a produtividade. Parte das reservas utilizadas para produção de colmos e folhas poderia ser drenada para o aumento e a manutenção do sistema radicular. Cury *et al.* (2014), avaliando dois sistemas de manejo do solo na reforma do canavial, plantio direto (PD) e plantio com preparo convencional (PC), com e sem calcário, em diferentes regimes hídricos, observaram que a produção de raízes apresentou valores máximos significativamente diferentes nos tratamentos sem uso de calcário e PC, indicando que esses podem estar drenando reservas para ampliar o sistema radicular, para maior exploração do solo.

Segundo alguns autores da literatura, há diferentes efeitos dos manejos convencionais, comparados aos manejos conservacionistas, como por exemplo o plantio direto (sem revolvimento) e o cultivo mínimo (preparo reduzido), em que seus resultados são bem visíveis em culturas anuais, como é o caso da soja e do milho. Porém, em áreas de cana-de-açúcar, ainda são pouco perceptíveis, devido ao seu ciclo de longo prazo, chegando de cinco a seis cortes (ASHWORTH *et al.*, 2016; RAFAEL; RUSU, 2017; RAMOS *et al.*, 2019; VIZIOLI; FERNANDES, 2019; ZHOU *et al.*, 2018; OLIVEIRA *et al.*, 2022).

Segundo Tavares *et al.* (2015), em estudo para avaliar alguns atributos do solo com influência na emissão de CO₂ em diferentes sistemas de manejo de cana-de-açúcar, observaram por meio da ACP, a formação de pelo menos dois agrupamentos que foram provenientes das áreas de cana crua e cana queimada, onde um dos grupos apresentou maior dispersão de pontos em relação ao outro, com maior variabilidade dos atributos. Carvalho *et al.* (2018), trabalhando com solos da região amazônica, observaram em seus estudos a separação dos manejos dos solos avaliados em grupos, com certas características de uso do solo parecidas, corroborando com os resultados aqui descritos.

3.4 CONCLUSÕES

Foram acatados os dois primeiros componentes principais (CP1 e CP2), representando 62,86% da variação total do conjunto de dados original e formando dois grupos, um com os manejos conservacionistas (adubo verde e plantio direto) e outro com o manejo convencional.

Por meio da metodologia multivariada observou-se que a MaP, MiP, Ds, RSP, Est C, P, SB, pH e biomassa radicular foram os atributos que permitiram a maior diferenciação entre os preparos do solo, demonstrando assim sua importância para estudos de qualidade do solo.

Os atributos MaP, MiP, Est C e RSP foram os que tiveram maior influência nas áreas com adubo verde e plantio direto, enquanto na área com preparo convencional foi influenciada pelos atributos pH, SB, P, Ds e biomassa radicular.

4.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMI, M.; RUDORFF, B.F.T.; FREITAS, R.M.; AGUIAR, D.A.; SUGAWARA, L.M.; MELLO, M.P. Remote sensing time series to evaluate direct land use change of recent expanded sugarcane crop in Brazil. **Sustainability**, v.4, n.4, p.574-585, 2012.
- ALKIMIM, A.; SPAROVEK, G.; CLARKE, K.C. Converting Brazil's pastures to cropland: An alternative way to meet sugarcane demand and to spare forestlands. **Applied Geography**, v.62, n.1, p.75-84, 2015.
- ALMEIDA, D. O.; BAYER, C.; ALMEIDA, H. C. Fauna e atributos microbiológicos de um Argissolo sob sistemas de cobertura no Sul do Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51, n.9, p.1140-1147, 2016.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, n.6, p.711-728, 2013.
- ALVAREZ, I. A.; CASTRO, P. R. C.; NOGUEIRA, M. C. S. Crescimento de raízes de cana crua e cana queimada em dois ciclos. **Scientia Agrícola**, v.57, n.4, p.653-659, 2000.
- AMBROSANO, E. J.; AMBROSANO, G. M. B.; AZCÓN, R.; CANTARELLA, H.; DIAS F. L. F.; MURAOKA, T.; TRIVELIN, P. C. O.; ROSSI, F.; SCHAMMASS, E. A.; SACHS R. C. C. Produtividade da cana-de-açúcar após o cultivo de leguminosas. **Bragantia**, v.70, n.4, p.1-9, 2011.
- ARAÚJO FILHO, J. C.; BURGOS, N.; LOPES, O. F.; SILVA, F. H. B. B.; MEDEIROS, I. A. R.; MELO FILHO, H. F. R.; PARAHYBA, R. B. V.; CAVALCANTI, A. C.; OLIVEIRA NETO, M. B.; SILVA, F. B. R.; LEITE, A. P.; SANTOS, J. C. P.; SOUSA NETO, N. C.; SILVA, A. B.; LUZ, L. R. Q. P.; LIMA, P. C.; REIS, R. M. G.; BARROS, A. H. **Levantamento de reconhecimento de baixa e média intensidade dos solos do estado de Pernambuco**. Rio de Janeiro: Embrapa solos, 2000, 382 p. (Boletim de Pesquisa 11)
- ARCOVERDE, S. N. S.; SOUZA, C. M. A.; ORLANDO, R. C.; SILVA, M. M.; NASCIMENTO, J. M. Revista Engenharia na Agricultura. **Revista Engenharia na Agricultura**, v.27, n.2, p.142-156, 2019.
- ARRUDA, E. M.; ALMEIDA, R. F.; DOMINGUES, L. A. S.; SILVA JUNIOR, A. C.; MORAES, E. R.; BARROS, L. R.; SOUSA, J. L. O.; LANA, R. M. Q. Soil porosity and

density in sugarcane cultivation under different tillage systems. **African Journal of Agricultural Research**, v.11, n.30, p.2689-2696, 2016.

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

ASHWORTH, A. J.; ALLEN, F. L.; SAXTON, A. M.; TYLER, D. D. Long-term corn yield impacted by cropping rotations and bio-covers under no-tillage. **Crop Economics, Production and Management**, v.108, n.4, p.1495-1502, 2016.

AWE, G. O.; REICHERT, J. M.; FONTANELA, E. Sugarcane production in the subtropics: Seasonal changes in soil properties and crop yield in no-tillage, inverting and minimum tillage. **Soil and Tillage Research**, v.196, p.1-12, 2020.

BALKCOM, K. S.; ARRIAGA, F. J.; BALKCOM, K. B.; BOYKIN, D. L. Single- and twin-row peanut production within narrow and wide strip tillage systems. **Agronomy Journal**, v.102, n.2, p.507-512, 2010.

BARBOSA, L. C.; SOUZA, Z. M.; FRANCO, H. C. J.; OTTO, R.; ROSSI NETO, J.; GARSIDE, A. L.; CARVALHO, J. L. N. Soil texture affects root penetration in Oxisols under sugarcane in Brazil. **Geoderma Regional**, v.13, p.15-25, 2018.

BARBOSA, L. C.; MAGALHÃES, P. S. G.; BORDONAL, R. O.; CHERUBIN, M. R.; CASTIONI, G. A. F.; TENELLI, S.; FRANCO, H. C. J.; CARVALHO, J. L. N. Soil physical quality associated with tillage practices during sugarcane planting in south-central Brazil. **Soil and Tillage Research**, v.195, p.1-11, 2019.

BARBOSA, L. C.; MAGALHÃES, P. S. G.; BORDONAL, R. O.; CHERUBIN, M. R.; CASTIONI, G. A.; ROSSI NETO, J.; FRANCO, H. C. J.; CARVALHO, J. L. N. Untrafficked furrowed seedbed sustains soil physical quality in sugarcane mechanized fields. **European Journal of Soil Science**, v.72, n.5, p.2150-2164, 2021.

BELARDO, G. C.; CASSIA, M. T., SILVA, R. P. (Eds.). **Processos agrícolas e mecanização da cana de açúcar**. São Paulo: Livrocere, p.149-176, 2015.

BENGOUGH, A. G.; MCKENZIE, B. M.; HALLETT, P. D.; VALENTINE, T. A. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. **Journal of Experimental Botany**, v.62, n.1, p.59-68, 2011.

- BEZERRA, M. O.; BAKER, M.; PALMER, M. A.; FILOSO, S. Gully formation in headwater catchments under sugarcane agriculture in Brazil. **Journal of Environmental Management**, v.270, p.1-14, 2020.
- BOLONHEZI, D. Plantio direto e calagem na reforma de cana crua. **A Granja**, v.769, n.1, p.75-77, 2013.
- BOLONHEZI, D.; AMBROSIO, L. M. S.; BARINI, R. T.; BETIOL, V.; GONÇALVES, L. H. O.; SCARPELLINI, J. R.; BOLONHEZI, A. C. Peanut pod yield and soil compaction in Brazilian conservation agriculture system. VII, WORLD CONGRESS ON CONSERVATION AGRICULTURE, Rosário: Argentina, 2017, **Proceedings...** Asociacion Argentina de Productores en Siembra Directa (AAPRESID), Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha (FEBRAPDP), Rosário: Argentina, p.72-75, 2017.
- BONILLA-BEDOYA, S.; LÓPEZ-ULLOA, M.; VANWALLEGHEM, T.; HERRERA-MACHUCA, M. A. Effects of land use change on soil quality indicators in forest landscapes of the Western Amazon. **Soil Science**, v.182, p.128-136, 2017.
- BORDONAL, R. O.; CARVALHO, J. L. N.; LAL, R.; FIGUEIREDO, E. B.; OLIVEIRA, B. G.; LA SCALA, N. Sustainability of sugarcane production in Brazil. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v.38, n.13, p.1-23, 2018.
- BRINKMAN, M. L. J.; CUNHA, M. P.; HEIJNEN, S.; WICKE, B.; GUILHOTO, J. J. M.; WALTER, A.; FAAIJ, A. P. C.; VAN DER HILST, F. Interregional assessment of socio-economic effects of sugarcane ethanol production in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.88, P.347-362, 2018.
- BUHLER, D. D. Influence of tillage systems on weed population dynamics and management in corn and soybean in the central USA. **Crop Science**, v.35, n.5, p.1247-1258, 1995.
- CANISARES, L. P.; CHERUBIN, M. R.; SILVA, L. F. S.; FRANCO, A. L. C.; COOPER, M.; MOONEY, S. J.; CERRI, C. E.P. Soil microstructure alterations induced by land use change for sugarcane expansion in Brazil. **Soil Use and Management**, v.36, p.189-199, 2020.
- CARVALHO JÚNIOR, W.; SCHAEFER, C. E. G. R.; CHAGAS, C. S. Y. F. F.; ELPÍDIO, I. Análise multivariada de Argissolos da faixa atlântica brasileira. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, v.32, n.5, p.2081-2090, 2008.

- CARVALHO, J. L. N.; NOGUEIROL, R. C.; MENANDRO, L. M. S.; BORDONAL, R. O.; BORGES, C. D.; CANTARELLA, H.; FRANCO, H. C. J. Agronomic and environmental implications of sugarcane straw removal: A major review. **GCB Bioenergy**, v.9, n.7, p.1181-1195, 2017.
- CARVALHO, M. A. C.; PANOSSO, A. R.; TEIXEIRA, E. E. R.; ARAÚJO, E. G.; BRANCAGLIONI, V. A.; DALLACORT, R. Multivariate approach of soil attributes on the characterization of land use in the southern Brazilian Amazon. **Soil and Tillage Research**, v.184, p.207-215, 2018.
- CASSOL, E. A.; DENARDIN, J. E.; KOCHHANN, R. A. **Sistema plantio direto: Evolução e implicações sobre a conservação do solo e da água**. In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. (Eds.). Tópicos em ciência do solo: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.5, p.333-370, 2007.
- CASTIONI, G. A.; CHERUBIN, R. M.; MENANDRO, L. M. S.; SANCHES, G. M.; BORDONAL, R. O.; BARBOSA, L. C.; FRANCO, H. C. J.; CARVALHO, J. L. N. Soil physical quality response to sugarcane straw removal in Brazil: A multi-approach assessment. **Soil and Tillage Research**, v.184, p.301-309, 2018.
- CASTIONI, G. A. F.; LIMA, R. P.; CHERUBIN, M. R.; BORDONAL, R. O.; ROLIM, M. M.; CARVALHO, J. L. N. Machinery traffic in sugarcane straw removal operation: Stress transmitted and soil compaction. **Soil and Tillage Research**, v.213, p.1-10, 2021.
- CAVALCANTI, R. Q.; ROLIM, M. M.; LIMA, R. P.; TAVARES, U. E.; PEDROSA, E. M. R. Soil physical and mechanical attributes in response to successive harvests under sugarcane cultivation in Northeastern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v.189, n.1, p.140-147, 2019.
- CERRI, C. C., GALDOS, M. V., MAIA, S. M. F., BERNOUX, M., FEIGL, B. J., POWLSON, D. S. AND CERRI, C. E. P. Effect of sugarcane harvesting systems on soil carbon stocks in Brazil: an examination of existing data. **European Journal of Soil Science**, v.62, n.1, p.23-28, 2011.
- CHERUBIN, M. R.; KARLEN, D. L.; CERRI, C. E. P.; FRANCO, A. L. C.; TORMENA, C. A.; DAVIES, C. A.; CERRI, C. A. Soil quality indexing strategies for evaluating sugarcane expansion in Brazil. **PLoS ONE**, v.11, n.3, p.1-26, 2016.
- CHERUBIN, M. R.; FRANCO, A. L. C.; GUIMARÃES, R. M. L.; TORMENA, C. A.; CERRI, C. E. P.; KARLEN, D. L.; CERRI, C. C. Assessing soil structural quality under

Brazilian sugarcane expansion areas using Visual Evaluation of Soil Structure (VESS). **Soil and Tillage Research**, v.173, p.64-74, 2017.

CHERUBIN, M. R.; CARVALHO, J. L. N.; CERRI, C. E. P.; NOGUEIRA, L. A. H.; SOUZA, G. M.; CANTARELLA, H. Land use and management effects on sustainable sugarcane-derived bioenergy. **Land**, v.10, p.1-24, 2021a.

CHERUBIN, M. R.; FRANCHI, M. R. A.; LIMA, R. P.; MORAES, M. T.; LUZ, F. B. Sugarcane straw effects on soil compaction susceptibility. **Soil and Tillage Research**, v.212, 105066, 2021b.

CHERUBIN, M. R.; BORDONAL, R. O.; CASTIONI, G. A. F.; GUIMARÃES, E. M.; LISBOA, I. P.; MORAES, L. A. A.; MENANDRO, L. M. S.; TENELLI, S.; CERRI, C. E. P.; KARLEN, D. L.; CARVALHO, J. L. N. Soil health response to sugarcane straw removal in Brazil. **Industrial Crops and Products**, v.163, p.1-12, 2021c.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira**. Cana-de-açúcar - Safra 2022/23, v.9 - Terceiro levantamento, n.3, Brasília, p.1-58, 2022.

CORSINI, P. C.; FERRAUDO, S. A. Efeitos de sistemas de cultivo na densidade e macroporosidade do solo e no desenvolvimento radicular do milho em Latossolo Roxo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.34, n.2, p.289-298, 1999.

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**, v.31, n.6, p.1503-1514, 2007.

COUTINHO, R. P.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M.; ALVES, B. J. R.; TORRES, A. Q. A.; JANTALIA, C. P. Estoque de carbono e nitrogênio e emissão de N₂O em diferentes usos do solo na Mata Atlântica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.45, n.2, p.195-203, 2010.

CURY, T. N.; DE MARIA, I. C.; BOLONHEZI, D. Biomassa radicular da cultura de cana-de-açúcar em sistema convencional e plantio direto com e sem calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, n.6, p.1929-1938, 2014.

DAL FERRO, N., SARTORI, L., SIMONETTI, G., BERTI, A., MORARI, F. Soil macro- and microstructure as affected by different tillage systems and their effects on maize root growth. **Soil and Tillage Research**, v.140, p.55-65, 2014.

DE MARIA, I. C.; DRUGOWICH, M. I; BORTOLETTI, J.O; VITTI, A. C.; ROSSETTO, R.; FONTES, J. L.; TCATCHENCO, J.; MARGATHO, S. M. F. **Recomendações gerais para a conservação do solo na cultura da cana-de-açúcar.** Instituto Agronômico, Campinas, p.28-31, 2016 (Boletim Técnico IAC, 216).

DERPSCH, R.; FRANZLUEBBERS, A. J.; DUIKER, S. W.; REICOSKY, D. C.; KOELLER, K.; FRIEDRICH, T.; STURNY, W. G.; SÁ, J. C. M.; WEISS, K. Why do we need to standardize no-tillage research? **Soil and Tillage Research**, v.137, p.16-22, 2014.

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

ESTEBAN, D. A. A; SOUZA, Z. M.; TORMENA, C. A.; LOVERA, L. H.; LIMA, E S.; OLIVEIRA, I. N.; RIBEIRO, N. P. Soil compaction, root system and productivity of sugarcane under different row spacing and controlled traffic at harvest. **Soil and Tillage Research**, v.187, p.60-71, 2019.

ESTEBAN, D. A. A.; SOUZA, Z. M.; DA SILVA, R. B.; LIMA, E. S.; LOVERA, L. H.; OLIVEIRA, I. N. Impact of permanent traffic lanes on the soil physical and mechanical properties in mechanized sugarcane fields with the use of automatic steering. **Geoderma**, v.362, p.1-11, 2020.

FAO - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA AGRICULTURA E ALIMENTAÇÃO. **Food and Agricultural commodities production.** 2015. Available in: <http://faostat3.fao.org/browse/Q/QC/E>. Data de acesso: 18/05/2023.

FARHATE, C. V. V.; SOUZA, Z. M.; CHERUBIN, M. R.; LOVERA, L. H.; OLIVEIRA, I. N.; GUIMARÃES JÚNNYOR, W. S.; LA SCALA, N. Soil physical change and sugarcane stalk yield induced by cover crop and soil tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.46, e0210123, 2022.

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

FIGUEIREDO, P. Breve história da cana-de-açúcar e do papel do Instituto Agronômico no seu estabelecimento no Brasil. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. (Eds.). **Cana-de-açúcar.** Campinas: Instituto Agronômico, 2008. p.31-44.

- FIGUEIREDO, E. B.; PANOSSO, A. R.; REICOSKY, D. C.; LA SCALA JUNIOR, N. Short-term CO₂-C emissions from soil prior to sugarcane (*Saccharum spp.*) replanting in southern Brazil. **GCB Bioenergy**, v.7, n.2, p.316-327, 2015.
- FILASSI, M.; OLIVEIRA, A. L. R. Competitiveness drivers for soybean exportation and the fundamental role of the supply chain. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v.60, n.3, e235296, 2022.
- FOLEY, J. A.; RAMANKUTTY, N.; BRAUMAN, K. A.; CASSIDY, E. S.; GERBER, J. S.; JOHNSTON, M.; MUELLER, N. D.; O'CONNELL, C.; RAY, D. K.; WEST, P. C.; BALZER, C.; BENNETT, E. M.; CARPENTER, S. R.; HILL, J.; MONFREDA, C.; POLASKY, S.; ROCKSTRÖM, J.; SHEEHAN, J.; SIEBERT, S.; TILMAN, D.; ZAKS, D. P. M. Solutions for a cultivated planet. **Nature**, v.478, p.337-342, 2011.
- FRANCO, A. L. C.; BARTZ, M. L. C.; CHERUBIN, M. R.; BARETTA, D.; CERRI, C. E. P.; FEIGL, B. J.; WALL, D. H.; DAVIES, C. A.; CERRI, C. C. Loss of soil (macro)fauna due to the expansion of Brazilian sugarcane acreage. **Science of The Total Environment**, v.563-564, p.160-168, 2016.
- FRANCO, A. L. C.; CHERUBIN, M. R.; CERRI, C. E. P.; GUIMARÃES, R. M. L.; CERRI, C. C. Relating the visual soil structure status and the abundance of soil engineering invertebrates across land use change. **Soil and Tillage Research**, v.173, n.1, p.49-52, 2017.
- FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F.; BEUTLER, A. N.; ARATANI, R. G.; LEONEL, C. L. Compactação do solo no crescimento radicular e produtividade da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, n.4, p.627-636, 2007.
- FREITAS, L.; CASAGRANDE, J. C.; OLIVEIRA, I. A.; CAMPOS M. C. C. Análise multivariada na avaliação de atributos de solos com diferentes texturas cultivados com cana-de-açúcar. **Revista de Ciências Agrárias**, v.57, n.3, p.224-233, 2014.
- FUENTES-LLANILLO, R.; TELLES, T. S.; SOARES JUNIOR, D.; MELO, T. R.; FRIEDRICH, T.; KASSAM, A. Expansion of no-tillage practice in conservation agriculture in Brazil. **Soil and Tillage Research**, v.208, p.1-9, 2021.
- FURLANI, C. E. A.; CARNEIRO, F. M.; GIRIO, L. A. S.; ORMOND, A. T.; KAZAMA, E. H.; ALCANTARA, A. S.; ZERBATO, C. Rip Strip. **Cultivar Máquinas**, n.153, Ano XIII, p.28-29, 2015.

GOMES, T. F.; VAN DE BROEK, M.; GOVERS, G.; SILVA, R. W. C.; MORAES, J. M.; CAMARGO, P. B.; MAZZI, E. A.; MARTINELLI, L. A. Runoff, soil loss, and sources of particulate organic carbon delivered to streams by sugarcane and riparian areas: An isotopic approach. **Catena**, v.181, p.1-9, 2019.

GUARENGHI, M. M.; GAROFALO, D. F. T.; SEABRA, J. E. A.; MOREIRA, M. M. R.; NOVAES, R. M. L.; RAMOS, N. P.; NOGUEIRA, S. F.; ANDRADE, C. A. Land use change net removals associated with sugarcane in Brazil. **Land**, v.12, p.1-26, 2023.

GUARESCHI, R. F.; PEREIRA, M. G.; PERIN, A. Deposição de resíduos vegetais, matéria orgânica leve, estoques de carbono e nitrogênio e fósforo remanescente sob diferentes sistemas de manejo no cerrado goiano. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v.36, p.909-920, 2012.

GUIMARÃES JÚNNYOR, W. S.; DISERENS, E.; DE MARIA, I. C.; ARAUJO-JUNIOR, C. F.; FARHATE, C. V. V.; SOUZA, Z. M. Prediction of soil stresses and compaction due to agricultural machines in sugarcane cultivation systems with and without crop rotation. **Science of the Total Environment**, v.681, p.424-434, 2019a.

GUIMARÃES JÚNNYOR, W. S.; DE MARIA, I. C.; ARAUJO-JUNIOR, C. F.; LIMA, C. C.; VITTI, A. C.; FIGUEIREDO, G. C.; DECHEN, S. C. F. Soil compaction on traffic lane due to soil tillage and sugarcane mechanical harvesting operations. **Scientia Agricola**, v.76, n.6, p.509-517, 2019b.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/home/pimpfbr/brasil>>. Acesso em: 26 de abril de 2023.

JABRO, J. D.; IVERSEN, W. M.; STEVENS, W. B.; EVANS, R. G.; MIKHA, M. M.; ALLEN, B. L. Physical and hydraulic properties of a sandy loam soil under zero, shallow and deep tillage practices. **Soil and Tillage Research**, v.159, p.67-72, 2016.

JAKELAITIS, A.; SILVA, A. A.; SANTOS, J. B.; VIVIAN, R. Qualidade da camada superficial de solo sob mata, pastagens e áreas cultivadas. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.38, n.2, p.118-127, 2008.

JIMENEZ, K. J.; ROLIM, M. M.; GOMES, I. F.; LIMA, R. P.; BERRÍO, L. L. A.; ORTIZ, P. F. S. Numerical analysis applied to the study of soil stress and compaction due to mechanised sugarcane harvest. **Soil and Tillage Research**, v.206, p.1-10, 2021.

- JONKER, J. G. G.; JUNGINGER, H. M.; VERSTEGEN, J. A.; LIN, T.; RODRÍGUEZ, L. F.; TING, K. C.; FAAIJ, A. P. C.; VAN DER HILST, F. Supply chain optimization of sugarcane first generation and eucalyptus second generation ethanol production in Brazil. **Applied Energy**, v.173, p.494-510, 2016.
- JUNQUEIRA, R. A. R.; MORABITO, R. Modeling and solving a sugarcane harvest front scheduling problem. **International Journal of Production Economics**, v.213, p.150-160, 2019.
- KAISER, H. F. The application of electronic computers to factor analysis. **Educational and Psychological Measurement**, v.20, p.141-151, 1958.
- KELLER, T.; SANDIN, M.; COLOMBI, T.; HORN, R.; OR, D. Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. **Soil and Tillage Research**, v.194, p.1-12, 2019.
- KORNDÖRFER, G. H.; PRIMAVESI, O.; DEUBER, R. Crescimento e distribuição do sistema radicular da cana-de-açúcar em solo LVA. **Boletim Técnico Coopersucar**, São Paulo, v.47, p.32-36, 1989.
- LANDELL, M. G. A.; XAVIER, M. A.; CRESTE, S.; AZANIA, C. A. M.; ANJOS, I. A.; FIGUEIREDO, P.; CAMPANA, M. P. Trajetória de pesquisa, desenvolvimento e transferência de tecnologia em cana-de-açúcar no IAC. **Instituto Agrônomo**, Campinas, v.68, p.6-15, 2016. (Boletim Técnico IAC, 68).
- LIMA, C. C.; DE MARIA, I. C.; GUIMARÃES JÚNNYOR, W. S.; FIGUEIREDO, G. C.; DECHEN, S. C. F.; BOLONHEZI, D. Root parameters of sugarcane and soil compaction indicators under deep strip tillage and conventional tillage. **Scientific Reports**, v.12, p.1-11, 2022.
- LIRA, R. M.; SILVA, E. F. F.; SILVA, G. F.; SOUZA, D. H. S.; PEDROSA, E. M. R.; GORDIN, L. C. Content, extraction and export of nutrients in sugarcane under salinity and leaching fraction. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.23, n.6, p.432-438, 2019.
- LISBOA, I. P.; CHERUBIN, M. R.; LIMA, R. P.; CERRI, C. C.; SATIRO, L. S.; WIENHOLD, B. J.; SCHMER, M. R.; JIN, V. L.; CERRI, C. E. P. Sugarcane straw removal effects on plant growth and stalk yield. **Industrial Crops and Products**, v.111, p.794-806, 2018.

- LOVERA, L. H.; SOUZA, Z. M.; ESTEBAN, D. A. A.; OLIVEIRA, I. N.; FARHATE, C. V. V.; LIMA, E. S.; PANOSSO, A. R. Sugarcane root system: Variation over three cycles under different soil tillage systems and cover crops. **Soil and Tillage Research**, v.208, p.1-12, 2021.
- LUZ, F. B.; CASTIONI, G. A. F.; TORMENA, C. A.; FREITAS, R. S.; CARVALHO, J. L. N.; CHERUBIN, M. R. Soil tillage and machinery traffic influence soil water availability and air fluxes in sugarcane fields. **Soil and Tillage Research**, v.223, p.1-9, 2022.
- LUZ, F. B.; GONZAGA, L. C.; CASTIONI, G. A. F.; LIMA, R. P.; CARVALHO, J. L. N.; CHERUBIN, M. R. Controlled traffic farming maintains soil physical functionality in sugarcane Fields. **Geoderma**, v.432, p.1-12, 2023.
- MADARI, B. E.; CUNHA, T. J. F.; NOVOTNY, E. H.; MILORI, D. M. B. P.; NETO, L. M.; BENITES, V. M.; COELHO, M. R.; SANTOS, G. A. **Matéria orgânica dos solos antrópicos da Amazônia (Terra preta de índio): Suas características e papel na sustentabilidade da fertilidade do solo**. In: TEIXEIRA, W. G.; KERN, D. C.; MADARI, B. E.; LIMA, H. N.; WOODS, W. (Eds.). *As terras pretas de índio da Amazônia: Sua caracterização e uso deste conhecimento na criação de novas áreas*. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental, p.172-188, 2009.
- MANHÃES, C. M. C.; GARCIA, R. F.; FRANCELINO, F. M. A.; FRANCELINO, H. O.; COELHO, F. C. Fatores que afetam a brotação e o perfilhamento da cana-de-açúcar. **Vértices**, v.17, p.163-181, 2015.
- MAPBIOMAS. **MapBiomass platform - land use and cover**. 2020. Available online: <https://plataforma.mapbiomas.org/> (accessed on 19 November 2021).
- MARASCA, I.; LEMOS, S. V.; SILVA, R. B.; GUERRA, S. P. S.; LANÇAS, K. P. Soil compaction curve of an oxisol under sugarcane planted after in-row deep tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.39, n.5, p.1490-1497, 2015.
- MARTINELLI, L. A.; COLETTA, L. D.; LINS, S. R. M.; MARDEGAN, S. F.; VICTORIA, D. C. **Brazilian agriculture and its sustainability**. In: STEIER, G.; PATEL, K. K. (Eds.). *International food law and policy*. Cham: Springer Nature, 2017. p.767-792.

MARTÍNI, A. F.; VALANI, G. P.; BOSCHI, R. S.; BOVI, R. C.; SILVA, L. F. S.; COOPER, M. Is soil quality a concern in sugarcane cultivation? A bibliometric review. **Soil and Tillage Research**, v.204, p.1-8, 2020.

MASCARENHAS, A. R. P.; SCCOTI, M. S. V.; MELO, R. R.; CORRÊA, F. L. O.; SOUZA, E. F. M.; ANDRADE, R. A.; BERGAMIN, A. C. B.; MÜLLER, M. W. Atributos físicos e estoques de carbono do solo sob diferentes usos da terra em Rondônia, Amazônia Sul-Occidental. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v.37, n.89, p.19-27, 2017.

MATEUS, G. P.; CRUSCIOL, C. A. C.; PARIZ, C. M.; BORGHI, E.; COSTA, C.; MARTELLO, J. M.; FRANZLUEBBERS, A. J.; CASTILHOS, A. M. Sidedress nitrogen application rates to sorghum intercropped with tropical perennial grasses. **Agronomy Journal**, v.108, n.1, p.433-447, 2016.

MAZAREI, R.; MOHAMMADI, A. S.; NASERI, A. A.; EBRAHIMIAN, H.; IZADPANA, Z. Optimization of furrow irrigation performance of sugarcane fields based on inflow and geometric parameters using WinSRFR in Southwest of Iran. **Agricultural Water Management**, v.228, p.1-8, 2020.

MAZARON, B. H. S.; COELHO, A. P.; FERNANDES, C. Is localized soil tillage in the planting row a sustainable alternative for sugarcane cultivation? **Bragantia**, v.81, p.1-11, 2022.

MEDINA, C. C.; NEVES, C. S. V. J.; FONSECA, I. C. B.; TORRETI, A. F. Crescimento radicular e produtividade de cana-de-açúcar em função de doses de vinhaça em fertirrigação. **Semina: Ciências Agrárias**, v.23, n.2, p.179-184, 2002.

MELLO, F. F. C.; CERRI, C. E. P.; DAVIES, C. A.; HOLBROOK, N. M.; PAUSTIAN, K.; MAIA, S. M. F.; GALDOS, M. V.; BERNOUX, M.; CERRI, C. C. Payback time for soil carbon and sugar-cane ethanol. **Nature Climate Change**, v.4, p.605-609, 2014.

MORAES, M.; DEBIASI, H.; CARLESSO, R.; FRANCHINI, J. C.; SILVA, V.; LUZ, F. Soil physical quality on tillage and cropping systems after two decades in the subtropical region of Brazil. **Soil and Tillage Research**, v.155, p.351-362, 2016.

MORAES, M. T.; DEBIASI, H.; CARLESSO, R.; FRANCHINI, J. C.; SILVA, V. R.; LUZ, F.B. Age-hardening phenomena in an oxisol from the subtropical region of Brazil. **Soil and Tillage Research**, v.170, p.27-37, 2017.

MORAES, E. R.; MAGESTE, J. G.; LANA, R. M. Q.; TORRES, J. L. R.; DOMINGUES, L. A. S.; LEMES, E. M.; LIMA, L. C. Sugarcane root development and yield under

different soil tillage practices. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.43, e0180090, 2019.

NAGAHAMA, H. J.; GRANJA, G. P.; CORTEZ, J. W.; RAMOS, R. L.; ARCOVERDE, S. N. S. Efeitos da escarificação mecânica nos atributos físicos do solo e agrônômicos do capim elefante. **Revista Ceres**, v.63, n.5, p.741-746, 2016.

NELSON, D. W.; SOMMERS, L. E. **Total carbon, organic carbon and organic matter**. In: Methods of soil analysis. Part 3. Chemical Methods-SSSA Book Series no 5. Madison: Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, p.963-1010, 1996.

NIXON, D. J.; SIMMONDS, L. P. The impact of fallowing and green manuring on soil conditions and the growth of sugarcane. **Experimental Agriculture**, v.40, n.1, p.127-138, 2004.

NOGUEIRA, M. A. F. S.; GARCIA, M. S. Gestão dos resíduos do setor industrial sucroenergético: estudo de caso de uma usina no município de Rio Brillhante, Mato Grosso do Sul. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental – REGET**, v.17, n.17, p.3275-3283, 2013.

NORONHA, R. H. F. **Plantio de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar em sistemas de manejo conservacionista de solo**. 2018. 77 f. Tese (Tese de Doutorado) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal, Universidade Estadual Paulista, 2018.

OLIVEIRA, I. N.; SOUZA, Z. M.; BOLONHEZI, D.; TOTTI, M. C. V.; MORAES, M. T.; LOVERA, L. H.; LIMA, E. S.; ESTEBAN, D. A. A.; OLIVEIRA, C. F. Tillage systems impact on soil physical attributes, sugarcane yield and root system propagated by pre-sprouted seedlings. **Soil and Tillage Research**, v.223, p.1-13, 2022.

OTTO, R.; TRIVELIN, P. C. O.; FRANCO, H. C. J.; FARONI, C. E.; VITTI, A. C. Root system distribution of sugar cane as related to nitrogen fertilization, evaluated by two methods: monolith and probes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, n.3, p.601-611, 2009.

OTTO, R.; SILVA, A. P.; FRANCO, H. C. J.; OLIVEIRA, E. C. A.; TRIVELIN, P. C. O. High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development. **Soil and Tillage Research**, v.117, p.201-210, 2011.

OTTO, R.; PEREIRA, G. L.; TENELLI, S.; CARVALHO, J. L. N.; LAVRES, J.; CASTRO, S. A. Q.; LISBOA, I. P.; SERMARINI, R. A. Planting legume cover crop as

a strategy to replace synthetic N fertilizer applied for sugarcane production. **Industrial Crops and Products**, v.156, p.1-12, 2020.

PANG, Z.; FALLAH, N.; WENG, P.; ZHOU, Y.; TANG, X.; TAYYAB, M.; LIU, Y.; LIU, Q.; IAO, Y.; HU, C.; KAN, Y.; LIN, W.; YUAN, Z. Sugarcane-Peanut intercropping system enhances bacteria abundance, diversity, and sugarcane parameters in rhizospheric and bulk Soils. **Frontiers in Microbiology**, v.12, p.1-16, 2022.

POEPLAU, C.; DON, A. Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops – A meta-analysis. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.200, p.33-41, 2015.

POEPLAU, C.; KÄTTERER, T.; BOLINDER, M. A.; BÖRJESSON, G.; BERTI, A.; LUGATO, E. Low stabilization of aboveground crop residue carbon in sandy soils of Swedish long-term experiments. **Geoderma**, v.237-238, p.246-255, 2015.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. A language and environment for statistical computing. **R foundation for statistical computing**. Vienna: [s.n.], 2017. ISBN 3-900051-07-0, 2018. Disponível em: <<http://www.R-project.org/>>.

RABOT, E.; WIESMEIER, M.; SCHLÜTER, S.; VOGEL, H.J. Soil structure as an indicator of soil functions: A review. **Geoderma**, v.314, p.122-137, 2018.

RAFAEL, M.; RUSU, T. Testing the influence of soil tillage on maize and soy yields. **ProEnvironment**, v.10, p.57-60, 2017.

RAIJ, B. V.; ANDRADE, J. C.; CANTARELA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônômico, 185 p. 2001.

RAMOS, M. C.; PAREJA-SÁNCHEZ, E.; PLAZA-BONILLA, D.; CANTERO-MARTÍNEZ, C. C.; LAMPURLANÉS, J. Soil sealing and soil water content under no-tillage and conventional tillage in irrigated corn: effects on grain yield. **Hydrological Processes**, v.33, p.2095-2109, 2019.

REICHERT, J. M.; SUSKI, L. E. A.; REINERT, D. J. **Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação**. Tópicos em ciência do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.5, p.49-134, 2007.

SÁ, M. A. C.; SANTOS JUNIOR, J. D. G.; FRANZ, C. A. B.; REIN, T. A. Qualidade física do solo e produtividade da cana-de-açúcar com uso da escarificação entre linhas de plantio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51, n.9, p.1610-1622, 2016.

- SALAZAR, M. P.; LOZANO, L. A.; VILLARREAL, R.; IRIZAR, A. B.; BARRACO, B.; POLICH, N. G.; SORACCO, S. G. Capacity and intensity indicators to evaluate the effect of different crop sequences and cover crops on soil physical quality of two different textured soils from Pampas Region. **Soil and Tillage Research**, v.217, p.1-10, 2022.
- SALES, L. E. O.; CARNEIRO, M. A. C.; SEVERIANO, E. C.; OLIVEIRA, G. C.; FERREIRA, M. M. Qualidade física de Neossolo Quartzarênico submetido a diferentes sistemas de uso agrícola. **Ciência & Agrotecnologia**, v.34, n.3, p.667-674, 2010.
- SAMPAIO, E. V. S. B.; SALCEDO, I. H.; CAVALCANTI, F. J. A. Dinâmica de nutrientes em cana-de-açúcar. III. Conteúdo de nutrientes e distribuição radicular no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.22, n.4, p.425-431, 1987.
- SANDHU, H. S.; SINGH, M. P.; VUYURU, M. Minimum or no-tillage improves sugarcane ratoon yield on Florida histosol. **Agronomy Journal**, v.111, n.3, p.1516-1523, 2019.
- SANTOS, F.; BORÉM, A. **Cana-de-açúcar: do plantio à colheita**. Viçosa: Ed. UFV, 2016. 290 p.
- SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T., ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5 Ed. Revisada e Ampliada. Brasília: EMBRAPA, 2018.
- SCARPARE, F. V.; LIER, Q. DE J. VAN; CAMARGO, L.; PIRES, R. C.; RUIZ-CORRÊA, S. T.; BEZERRA, A. HF; GAVA, G. J.; DIAS, C. T. Tillage effects on soil physical condition and root growth associated with sugarcane water availability. **Soil and Tillage Research**, v.187, p.110-118, 2019.
- SEGNINI, A.; CARVALHO, J. L. N.; BOLONHEZI, D.; MILORI, D. M. B. P.; MILORI, W. T. L.; SIMÕES, M. L.; CANTARELA, H.; DE MARIA, I.; MARTIN-NETO, L. Carbon stocks and humification index of organic matter affected by sugarcane straw and soil management. **Scientia Agricola**, v.70, n.5, p.321-326, 2012.
- SEVERIANO, E. C.; OLIVEIRA, G. C.; DIAS JÚNIOR, M. S.; OLIVEIRA, L. F. C.; CASTRO, M. B. Pressão de preconsolidação e intervalo hídrico ótimo como indicadores de alterações estruturais de um Latossolo e de um Cambissolo sob cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, n.4, p.1419-1427, 2008.

SEVERIANO, E. C.; OLIVEIRA, G. C.; CURI, N.; DIAS JÚNIOR, 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**, v.33, n.1, p.159-168, 2009.

SHUKLA, S. K.; JAISWAL, V. P.; SHARMA, L.; PATHAK, A. D. SINGH, A. K.; GUPTA, R.; AWASTHI, S. K.; GAUR, A.; ZUBAIR, A.; TIWARI, R. Sugarcane yield using minimum tillage technology through subsoiling: Beneficial impact on soil compaction, carbon conservation and activity of soil enzymes. **Sugar Tech**, v.22, n.6, p.987-1006, 2020.

SHUKLA, S. K.; JAISWAL, V. P.; SHARMA, L.; PATHAK, A. D. SINGH, A. K.; GUPTA, R.; AWASTHI, S. K.; GAUR, A.; ZUBAIR, A.; TIWARI, R. Subsoiling affecting soil quality parameters and sugarcane yield in multiratooning system in subtropical India. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.52, n.18, p.2125-2144, 2021.

SILVA-OLAYA, A. M.; CERRI, C. E. P. C.; LA SCALA JUNIOR, N.; DIAS, C. T. S.; CERRI, C. C. Carbon dioxide emissions under different soil tillage systems in mechanically harvested sugarcane. **Environmental Research Letters**, v.8, n.1, p.1-8, 2013.

SILVA-OLAYA, A. M.; DAVIES, C. A.; CERRI, C. E. P.; ALLEN, D. J.; MELLO, F. F. C.; CERRI, C. C. Quantifying above and belowground biomass carbon inputs for sugar-cane production in Brazil. **Soil Research**, v.55, p.640-648, 2017a.

SILVA-OLAYA, A. M.; CERRI, C. E. P.; WILLIAMS, S.; CERRI, C. C.; DAVIES, C. A.; PAUSTIAN, K. Modelling SOC response to land use change and management practices in sugarcane cultivation in South-Central Brazil. **Plant and Soil**, v.410, n.1-2, p.483-498, 2017b.

SILVA, G. R. V.; SOUZA, Z. M.; MARTINS FILHO, M. V.; BARBOSA, R. S.; SOUZA, G. S. Soil, Water and Nutrient Losses by Interrill Erosion from Green Cane Cultivation. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, n.3, p.963-970, 2012.

SILVA, R. B.; IORI, P.; SOUZA, Z. M.; PEREIRA, D. M. G.; VISCHI FILHO, O. J.; SILVA, F. A. M. Contact pressures and the impact of farm equipment on Latosol with the presence and absence of sugarcane straw. **Ciência & Agrotecnologia**, v.40, n.3, p.265-278, 2016.

- 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**, v.38, n.2, p.575-584, 2014.
- SINGELS, A.; PARASKEVOPOULOS, A. L.; MASHABELA, M. L. Farm level decision support for sugarcane irrigation management during drought. **Agricultural Water Management**, v.222, p.274-285, 2019.
- SIPAÚBA-TAVARES, L. H.; TEDESQUE, M. G.; SCARDOELI-TRUZZI, B. Evaluation of the effects of sugarcane molasses as a carbon source for *Ankistrodesmus gracilis* and *Haematococcus pluvialis* (Chlorophyceae). **Brazilian Journal of Biology**, v.80, n.3, p.594-600, 2020.
- SITHOLE, N. J., MAGWAZA, L. S., MAFONGOYA, P. L. Conservation agriculture and its impact on soil quality and maize yield: a South African perspective. **Soil and Tillage Research**, v.162, p.55-67, 2016.
- SIVARAJAN, S.; MAHARLOOEI, M.; BAJWA, S. G.; NOWATZK, J. Impact of soil compaction due to wheel traffic on corn and soybean growth, development and yield. **Soil and Tillage Research**, v.175, p.234-243, 2018.
- SIX, J.; PAUSTIAN, K.; ELLIOT, E. T.; COMBRINK, C. Soil structure and organic matter: Distribution of aggregate-size classes and aggregate associated carbon. **Soil Science Society of America Journal**, v.64, n.2, p.681-689, 2000.
- SMITH, D. M.; INMAN-BAMBER, N. G.; THORBURN, P. J. Growth and function of the sugarcane root system. **Field Crops Research**, v.92, n.2-3, p.169-183, 2005.
- SOARES, M. B. B.; BIANCO, S.; FINOTO, E. L.; BOLONHEZI, D.; ALBUQUERQUE, J. A. Phytosociological study on the weed communities in green sugarcane field reform using conservation tillage and oilseed crops in succession. **Applied Ecology and Environmental Research**, v.15, p.417-428, 2017.
- SOIL SURVEY STAFF. **Keys to Soil Taxonomy**. 12 Ed. Washington: United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. 2014. 372 p.
- SOIL SURVEY STAFF. **Keys to Soil Taxonomy**. 12 Ed. Washington: United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. 2014. 372 p.
- SOL, P. J. S. N.; SILVA, L. S.; SOARES NETO, J. P.; NUNES, H. B.; ROSA, V. A. Propriedades físicas e carbono orgânico em camadas do solo sob diferentes usos e

manejos nos cerrados do Oeste da Bahia, Brasil. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v.12, n.8, p.1-11, 2021.

SOUZA, G. S.; SOUZA, Z. M.; SILVA, R. B.; ARAÚJO, F. S.; BARBOSA R. S. Compressibilidade do solo e sistema radicular da cana-de-açúcar em manejo com e sem controle de tráfego. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, n.4, p.603-612, 2012.

SOUZA, G. S.; SOUZA, Z. M.; SILVA, R. B.; 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**, v.38, n.1, p.135-146, 2014.

SOUZA, G. S.; SOUZA, Z. M.; COOPER, M.; TORMENA, C. A. Controlled traffic and soil physical quality of an Oxisol under sugarcane cultivation. **Scientia Agricola**, v.72, n.3, p.270-277, 2015.

SOUZA, C. A. A.; SILVA, T. G. F.; SOUZA, L. S. B.; MOURA, M. S. B.; SILVA, P. P.; MARIN, F. R. Straw management effects on sugarcane growth, nutrient cycling and water use in the Brazilian semiarid region. **Bragantia**, v.79, n.4, p.400-411, 2020.

STOLF, R.; MURAKAMI, J.H.; BRUGNARO, C.; SILVA, L.G.; SILVA, L.C.F.; MARGARIDO, L.A.C. Penetrômetro de impacto Stolf - programa computacional de dados em EXCEL-VBA. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, n.3, p.774-782, 2014.

STRASSBURG, B. B. N.; LATAWIEC, A. E.; BARIONI, L. G.; NOBRE, C. A.; SILVA, V. P.; VALENTIM, J. F., VIANNA, M.; ASSAD, E. D. When enough should be enough: Improving the use of current agricultural lands could meet production demands and spare natural habitats in Brazil. **Global Environmental Change**, v.28, p.84-97, 2014.

TAVARES, R. L. M., SOUZA, Z. M., SIQUEIRA, D. S., LA SCALA, N. J., PANOSSO, A. R., CAMPOS, M. C. C. Soil CO₂ emission in sugarcane management systems. **Acta Agriculturae Scandinavica, Section B, Soil & Plant Science**, v.65, n.8, p.755-762, 2015.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de Métodos de Análise de Solos**. 3ª edição Revista e Ampliada, Brasília: Embrapa, 2017. 573 p.

TELLES, T. S.; REYDON, B. P.; MAIA, A. G. Effects of no-tillage on agricultural land values in Brazil. **Land Use Policy**, v.76, n.1, p.124-129, 2018.

TENELLI, S.; BORDONAL, R. O.; BARBOSA, L. C.; CARVALHO, J. L. N. Can reduced tillage sustain sugarcane yield and soil carbon if straw is removed? **BioEnergy Research**, v.12, p.764-777, 2019.

The World Bank. **The World Bank in Brazil: Overview**. Available at: <Available at: <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.CD?end=2020&locations=BR&start=1961&view=chart>>. Accessed on: Feb. 2023.

THOMAZ, E. L.; MARCATTO, F. S.; ANTONELI, V. Soil erosion on the Brazilian sugarcane cropping system: An overview. **Geography and Sustainability**, v.3, n.2, p.129-138, 2022.

TORRES, J. L. R.; PEREIRA, M. G.; ASSIS, R. L.; SOUZA, Z. M. Atributos físicos de um latossolo vermelho cultivado com plantas de cobertura, em semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v.39, n.2, p.428-437, 2015.

TREVISAN, D. P.; MOSCHINI, L. E. Evolução do mercado de cana-de-açúcar. **Revista de Ciências Agroambientais**, v.16, n.2, p.140-148, 2018.

UNICA. **Ranking da produção de cana, açúcar e etanol das unidades da Região Centro Sul: safra 2013/2014**. Ribeirão Preto: ÚNICA, 2015. 30p.

VASCONCELOS, A. C. M.; CASAGRANDE, A. A.; PERECIN, D.; JORGE, L. A. C.; LANDELL, M. G. A. Avaliação do sistema radicular da cana-de-açúcar por diferentes métodos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, n.5, p.849-858, 2003.

VASCONCELOS, A. C. M.; GARCIA, J. C. Desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar. Potafos. **Informações Agronômicas**, n.110, 2005. (Encarte Técnico).

VASCONCELOS, A. C. M.; CASAGRANDE, A. A. **Fisiologia do sistema radicular**. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. (Eds.). **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agronômico, p.79-97, 2008.

VEIHMEYER, F.J.; HENDRICKSON, A. H. Soil density and root penetration. **Soil Science**, v.65, p.487-493, 1948.

VIZIOLI, B.; FERNANDES, C. Organic matter and physical attributes of Latosols 30 months after uses in the sugarcane fallow-period. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.13, n.4, p.1-8, 2019.

WHITE JUNIOR, P. M.; WILLIAMS, G.; VIATOR, H. P.; VIATOR, R. P.; WEBBER, C. L. Legume cover crop effects on temperate sugarcane yields and their decomposition in soil. **Agronomy**, v.10, p.1-12, 2020.

WIESBERG, I. L.; MEDEIROS, J. L.; MELLO, R. V. P.; JEIVEISON G.S. SANTOS MAIA, J. G. S. S.; JOAO BRUNO V. BASTOS, J. B. V.; OFELIA DE QUEIROZ F. ARAÚJO, O. Q. F. Bioenergy production from sugarcane bagasse with carbon capture and storage: Surrogate models for techno-economic decisions. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.15, p.1-11, 2021.

YUGUDA, T. K.; LI, Y.; ZHANG, W.; YE, Q. Incorporating water loss from water storage and conveyance into blue water footprint of irrigated sugarcane: A case study of savannah sugar irrigation district, Nigeria. **Science of the Total Environment**, v.715, p.1-14, 2020.

ZHAO, P.; GUO, J.; GAO, X.; LIU, G.; LI, Y.; BURNER, D. M.; YANG, L. Small-scale mechanical harvesting and tractor-caused soil compaction reduce early growth in sugarcane. **Agronomy**, v.9, p.1-17, 2019.

ZHOU, X. V.; LARSON, J. A.; YIN, X.; SAVOY, H. J.; McCLURE, A. M.; ESSINGTON, M. E.; BOYER, C. N. Profitability of enhanced efficiency urea fertilizers in no-tillage corn production. **Crops Economics, Production and Management**, v.110, n.4, p.1439-1446, 2018.