

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**PREPARO DO SOLO PARA A CULTURA DA
CANA-DE-AÇÚCAR: ALTERNATIVAS E PERSISTÊNCIA**

Bruno Henrique Silveira Mazon

Engenheiro Agrônomo

2019

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**PREPARO DO SOLO PARA A CULTURA DA
CANA-DE-AÇÚCAR: ALTERNATIVAS E PERSISTÊNCIA**

Bruno Henrique Silveira Mazaron

Orientadora: Profa. Dra. Carolina Fernandes

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Agronomia (Ciência do Solo).

2019

M475p

Mazaron, Bruno Henrique Silveira

Preparo do solo para a cultura da cana-de-açúcar:
alternativas e persistências / Bruno Henrique Silveira
Mazaron. -- Jaboticabal, 2019

44 p. : il., tabs., fotos, mapas

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista
(Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias,
Jaboticabal

Orientadora: Carolina Fernandes

1. Manejo do solo. 2. Plantio direto. 3. Saccharum spp..
4. Compactação. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos
pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: PREPARO DO SOLO PARA A CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR: ALTERNATIVAS E PERSISTÊNCIA

AUTOR: BRUNO HENRIQUE SILVEIRA MAZARON

ORIENTADORA: CAROLINA FERNANDES

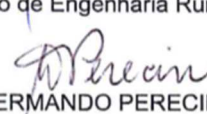
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA (CIÊNCIA DO SOLO), pela Comissão Examinadora:


Prof. Dra. CAROLINA FERNANDES
Departamento de Solos e Adubos / FCAV / UNESP - Jaboticabal


Pesquisador Dr. RAFAEL GONÇALVES PELUCO
Grupo São Martinho S.A. / Pradópolis/SP


Prof. Dr. MARCOS GUIMARÃES DE ANDRADE LANDELL
Centro de Cana-IAC / Ribeirão Preto/SP


Prof. Dr. CARLOS EDUARDO ANGELI FURLANI
Departamento de Engenharia Rural / FCAV / UNESP - Jaboticabal


Prof. Dr. DILERMANDO PERECIN
Departamento de Ciências Exatas / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Jaboticabal, 25 de abril de 2019

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

BRUNO HENRIQUE SILVEIRA MAZARON, nascido em 27 de julho de 1987, em Campinas – SP, é Engenheiro Agrônomo formado pela Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Câmpus de Jaboticabal – FCAV/UNESP, onde desenvolveu trabalhos nas áreas de Engenharia Agrícola e Economia Rural, como bolsista entre 2008 e 2009, e estágios em diversas empresas do setor. Recebeu o título de Engenheiro Agrônomo em fevereiro de 2010. Desde julho de 2009, trabalha na São Martinho S/A, onde atua nas áreas de plantio e tratos culturais, além de ocupar o cargo de gestor de plantio e tratos culturais na unidade Santa Cruz. Em julho de 2010, ingressou na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV/UNESP) para iniciar o curso de Mestrado em Agronomia (Ciência do Solo), recebendo o título de Mestre em Agronomia no ano de 2013. No ano de 2015, iniciou o curso de Doutorado em Agronomia, por meio do qual desenvolveu trabalhos nas áreas de física e manejos do solo.

*Ama e faz o que quiseres.
Se tiveres o amor enraizado em ti, nenhuma
coisa senão o amor serão os teus frutos.*

Santo Agostinho

A Santíssima Trindade, por me abençoar, iluminar, inspirar,
e me atribuir a sabedoria que me guia diariamente pelos
caminhos da vida.

AGRADEÇO

A minha mãe Maria Clara, por todo o amor, carinho e dedicação com
a minha formação. Ao meu avô José Euzébio (*in memoriam*), por me
ensinar o verdadeiro sentido do exemplo e da humildade. A minha
esposa Ana Cláudia, pelo total apoio e companheirismo

DEDICO E OFEREÇO

AGRADECIMENTO

À toda a minha família, em especial aos meus pais Maria Clara e Carlos Alberto; ao meu irmão André; aos meus avós Wylma, José Euzébio (*in memorian*), Maria e Waldir; minha esposa Ana Cláudia, por terem sido meus alicerces durante minha formação pessoal e pelos inúmeros os incentivos que contribuíram para a elaboração desse trabalho.

À São Martinho, pela grande parceria e contribuição na elaboração desse projeto, e também por possibilitar meu desenvolvimento profissional. Agradeço a todos os colaboradores da empresa, em especial a Luis Gustavo Teixeira, Luiz Alberto Henriques, Lucas Cortez e Rafael Peluco por todo o apoio, amizade e orientação na minha trajetória profissional.

À Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV-UNESP), Câmpus de Jaboticabal, SP, pelas oportunidades de aprendizados nos cursos de graduação e pós-graduação (mestrado e doutorado).

À Professora Dra. Carolina Fernandes, orientadora, agradeço pelos ensinamentos, pelo apoio e pelas discussões técnicas que foram fundamentais para o desenvolvimento dessa pesquisa.

Aos companheiros do Grupo de Pesquisa em Física do Solo (GPFiS), Daniel Pinheiro, Francisco Carlos, Camila Silva, Nilvan Melo, Luma Souza, Deise Nogueira, Matheus Silva e Mariele Fernandes, e a todos os funcionários do Departamento de Solos e Adubos.

À todos os meus amigos, que estiveram presentes em todos os momentos da minha vida e que me ensinaram o verdadeiro valor dos relacionamentos.

SUMÁRIO**Página**

RESUMO	x
ABSTRACT	xii
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 Aspectos gerais da cultura da cana-de-açúcar	3
2.2 Mecanização e compactação	5
2.3 Características e representatividade do Latossolo e Argissolo	6
2.4 Atributos físicos e sistemas de cultivo	7
3 MATERIAL E MÉTODOS	12
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	20
4.1 Avaliação da RP no preparo de solo localizado (PL) e no preparo de solo em área total (PAT)	20
4.2 Avaliação da persistência do efeito da subsolagem no preparo de solo localizado (PL) e no preparo de solo em área total (PAT).....	27
5 CONCLUSÕES	33
6 REFERÊNCIAS	34

PREPARO DO SOLO PARA A CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR: ALTERNATIVAS E PERSISTÊNCIA

RESUMO – Aspectos relacionados à compactação do solo têm sido considerados como limitantes para o aumento da produtividade na cultura da cana-de-açúcar. Diante disso, o setor vem buscando alternativas para o preparo do solo por meio de sistemas que sejam capazes de melhorar a produtividade dos canaviais e, conseqüentemente, sua competitividade no mercado. Dentro desse contexto, este trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar a qualidade física do solo, por meio da avaliação da sua resistência à penetração, suas alterações e persistência no tempo, em decorrência de seu preparo com subsolagem na linha de plantio e em área total, e das possíveis interferências dos manejos na produtividade da cana-de-açúcar. O experimento foi conduzido no estado de São Paulo, em uma área localizada no município de Guariba, em um solo classificado como Latossolo Vermelho, e outra localizada no município de Monte Alto, em um solo classificado como Argissolo Amarelo. As áreas experimentais foram compostas por 20 parcelas cada e os tratamentos foram constituídos pelo preparo de solo com subsolagem na linha de plantio e outro com subsolagem em área total. As amostragens foram realizadas nas camadas de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 m na linha de plantio e na entrelinha. A produção de colmos ($t\ ha^{-1}$) foi determinada em cada uma das parcelas. A análise de variância foi realizada no delineamento, em parcelas grandes pareadas; e a comparação das médias das variáveis foi realizada utilizando-se o teste de Tukey, ao nível de significância de 5% de probabilidade ($p < 0,05$). Foi realizado o teste T para verificar os efeitos dos tratamentos sobre a resistência do solo à penetração, avaliados por meio das diferenças entre os valores relacionados ao atributo no momento anterior ao preparo do solo. Nos dois solos avaliados, o preparo do solo com subsolagem na linha de plantio apresentou resultados semelhantes de resistência do solo à penetração e de produtividade da cana-de-açúcar, apresentando-se como alternativa para a substituição do manejo convencional com subsolagem em área total. Os efeitos da operação de subsolagem não foram persistentes no decorrer do tempo, apresentando resultados, aos seis meses após o plantio, semelhantes aos verificados antes do preparo do solo, tanto no Latossolo Vermelho, quanto no Argissolo Amarelo.

Palavras-chave: compactação, manejo, plantio direto, preparo localizado.

SOIL TILLAGE FOR SUGARCANE CROP: ALTERNATIVES AND PERSEVERATION

ABSTRACT - Soil compaction has been considered a limiting factor to the increasing of productivity in sugarcane crop. Therefore, the sector has been seeking alternatives for soil tillage through systems that are capable of improving sugarcane productivity and, consequently, its competitiveness in the market. In this context, this study was carried out with the aim of evaluating the physical soil quality through the evaluation of its resistance against penetration, its changes and perseveration in time, as a result of soil tillage with subsoiling in the planting line and in total area, and the possible interferences of managements during the productivity of sugarcane. The experiment was carried out in Guariba, SP, in a soil classified as Oxisol, and another one in Monte Alto, SP, in a soil classified as Ultisol. The experimental areas were composed of 20 plots each and the treatments were composed of soil tillage in the planting line and another one in total area. The samples were performed in the layers of 0.00-0.10 m, 0.10-0.20 m and 0.20-0.40 m in the planting line and in the interline. The productivity ($t\ ha^{-1}$) was determined in each of the plots. The analysis of variance was performed in the design of paired large plots and the comparison of the means of the variables was performed using the Tukey test, at a significant level of the probability of 5% ($p < 0.05$). The T test was performed to verify the effects of the treatments in the soil resistance against penetration, evaluated through the differences between the values related to the features at the moment before the soil tillage. In both soils, soil tillage in the planting line showed similar results to soil resistance against penetration, as soon as sugarcane productivity is an alternative of substitution for conventional management with soil tillage in total area. The effects of the soil tillage operation were not persistent over time, presenting results at six months after planting, were similar to those observed before soil tillage, both in the Oxisol and in the Ultisol.

Keywords: compaction, soil management, no tillage, minimum tillage

1. INTRODUÇÃO

O aumento da demanda agrícola vem estimulando esforços e investimentos em mecanização, biotecnologia, manejo de água e solos, buscando o aumento da produtividade das culturas. Com isso, cada vez mais se faz importante o conhecimento para gerar respostas às questões ambientais, econômicas, assim como aumentar a eficiência dos processos.

O Brasil vem demonstrando capacidade de crescimento e modernização no agronegócio, que atualmente se apresenta como setor estratégico na economia, representando 21% do PIB nacional (CEPEA, 2018). O país é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, tendo grande importância para o agronegócio brasileiro. A produção da cultura, estimada para a safra 2018/19, é de 635,51 milhões de toneladas (CONAB, 2018), e as estimativas mostram uma redução da produtividade da cultura na safra 2018/19, em meio a condições climáticas desfavoráveis (FAO, 2018).

A cana-de-açúcar destaca-se como uma das principais culturas de interesse econômico para o Brasil, fornecendo matéria-prima para a produção de açúcar, etanol e energia (Trentin et al., 2011), pela eficiência na produção de biocombustíveis e a consequente mitigação da intensificação do efeito estufa.

O advento da mecanização tem contribuído com importantes ferramentas para a implantação de novas tecnologias e inovações, capazes de aperfeiçoar o manejo da cultura e otimizar os ganhos produtivos e econômicos. Porém, o intenso tráfego de equipamentos agrícolas durante todo o ciclo pode provocar alteração da qualidade física, acarretando mudanças no comportamento do solo e impactos negativos sobre a produtividade do canavial.

A mecanização na cultura da cana-de-açúcar tem apresentado elevado crescimento nas últimas décadas, principalmente em razão da necessidade de manejos de colheita em larga escala das extensas áreas produtivas (Rossini, 2014), fator que pode ter influenciado a redução da produtividade das últimas safras em razão do pisoteio e da compactação, assim como de processos, tais como a sistematização,

o controle de tráfego e a utilização de agricultura de precisão ainda em fase de desenvolvimento e implementação.

Com isso, as operações de preparo de solo, que criam condições ideais para a implantação e desenvolvimento das culturas (Tavares et al., 2010), passaram a ser amplamente utilizadas antes da instalação de novos cultivos. Entretanto, se manejadas incorretamente nos diferentes tipos de solo, algumas dessas práticas podem tornar-se inadequadas e gerar efeitos indesejados, podendo alterar a resistência do solo à penetração, como também a porosidade, a infiltração de água e a densidade do solo, o que resultaria em aumento da erosão, em perda na condutividade hidráulica e na redução do alongamento radicular das plantas (Shi et al., 2012).

A manutenção da qualidade física do solo é imprescindível para a preservação do ambiente e a maximização da produtividade, a fim de se obter sucesso no cultivo das culturas. No entanto, o solo, por ser o suporte da produção agrícola, sofre alterações significativas em seus atributos físicos, sendo a compactação apontada como uma dessas alterações, em virtude do tráfego de tratores (Cortez et. al., 2014).

A compactação do solo tem sido considerada um fator limitante para o aumento da produtividade na cultura da cana-de-açúcar, e o setor vem buscando alternativas para o preparo do solo por meio de sistemas que sejam capazes de melhorar a produtividade dos canaviais e, conseqüentemente, sua competitividade no mercado (Marasca et. al, 2015). Isso mostra a importância de ter informações precisas e detalhadas sobre os solos, fator que pode ajudar a tomar decisões sobre o manejo de culturas (Peluco et al., 2013). Cortez, 2013, salienta que a resistência à penetração e a densidade do solo, por estarem diretamente envolvidos no crescimento das plantas, têm sido atualmente priorizadas para avaliar os sistemas de uso e manejo.

O sistema de manejo do solo também pode influenciar as correlações espaciais (Schaffrath et al., 2015), justificando a redução de preparos de solo convencionais e a adoção de sistemas conservacionistas, sendo que o baixo ou o não revolvimento do solo pode acarretar maior estabilização dos atributos físicos do solo (Bertol et al., 2000).

No preparo do solo para a cultura da cana-de-açúcar, destacam-se os sistemas intensivos de preparo com maior número de operações mecanizadas, porém diversos

segmentos do setor sucroenergético estão passando a adotar práticas com menor mobilização do solo, objetivando a implementação de sistemas conservacionistas aliados à possibilidade de redução dos custos operacionais.

Diversos estudos apontam que os resultados obtidos após o preparo do solo são efêmeros e nem sempre são eficientes para mitigar a sua compactação, uma vez que seus atributos retornam aos valores originais em períodos variantes de poucos meses a quatro anos.

Tim Chamen et al. (2015) constataram que intervenções mecânicas, como subsolagens ou escarificações, possuem efeitos temporários e nem sempre são eficientes para mitigar a compactação do solo. Esses resultados são associados à habilidade intrínseca do solo em recuperar-se da degradação e retornar a um novo equilíbrio, semelhante ao estado antecedente, denominado de resiliência do solo (Blanco e Lal, 2010).

Assim, a hipótese da pesquisa foi de que os efeitos do preparo do solo localizado na linha de plantio são equivalentes aos do preparo do solo em área total, no decorrer do tempo, possibilitando as mesmas condições físicas, promovendo, pois, produtividades semelhantes de cana-de-açúcar. Dentro desse contexto, este trabalho foi realizado em um Latossolo e em um Argissolo, que são os solos com maior representatividade no cultivo da cana-de-açúcar, com o objetivo de avaliar a qualidade física dos solos, por meio da avaliação do comportamento da resistência do solo à penetração, suas alterações e a persistência no tempo, em decorrência do preparo com subsolagem na linha de plantio e em área total e das possíveis interferências dos manejos na produtividade da cana-de-açúcar.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Aspectos gerais da cultura da cana-de-açúcar

A agroindústria sucroenergética nacional, na condição de maior produtora mundial de cana-de-açúcar, projeta ao segmento crescente relevância para o agronegócio brasileiro. O aumento da demanda mundial por etanol, além das grandes

áreas cultiváveis e condições edafoclimáticas favoráveis à cana-de-açúcar, tornam o Brasil um participante na comercialização mundial com elevada competitividade (CONAB, 2018).

Atualmente, a cana-de-açúcar é considerada uma das grandes alternativas para o setor de biocombustíveis devido ao grande potencial na produção de etanol e seus respectivos subprodutos. Além da produção de etanol e açúcar, as unidades de produção têm buscado aumentar sua eficiência, na geração de energia elétrica, auxiliando no aumento da oferta e na redução dos custos, contribuindo para ampliar a sustentabilidade do setor (CONAB, 2018).

O setor tem contribuído para o destaque mundial no uso das energias renováveis, tem-se mostrado como importante fonte de geração de empregos e renda, pilares considerados estratégicos (Mazaron, 2013), apresentando um papel social e ambiental para o país (Vitti e Mazza, 2002).

O sistema de produção agrícola da cultura é um dos mais tecnificados e capacitados no que diz respeito ao uso de técnicas para seu gerenciamento (Mendonça et al., 2011) sendo que, dentre os fatores de produção relacionados com a modernização da canavicultura brasileira, destaca-se o crescimento da demanda pela mecanização (Severiano et al., 2010).

A produção da cultura deverá atingir 635,51 milhões de toneladas na safra 2018/19, com uma área colhida de 8,66 milhões de hectares, sendo 4,47 milhões de hectares no estado de São Paulo, com uma produção de 34,25 milhões de toneladas de açúcar e 30,41 bilhões de litros de etanol (CONAB, 2018).

As estimativas mostram uma redução da produtividade da cultura em meio a condições climáticas desfavoráveis e a redução da produção de açúcar em detrimento do etanol, pois a relação entre os preços de ambos se tornou mais forte recentemente através de políticas públicas que tornaram a produção de etanol estreitamente ligada aos preços internacionais de petróleo (FAO, 2018).

No Sudeste a área colhida deverá ser inferior à safra passada, reflexo dos problemas climáticos ocorridos e da devolução de terras arrendadas. O desempenho do clima afetou as lavouras, trazendo diminuição nos patamares de produtividade em relação à safra anterior. A produção estimada em 396,2 milhões de toneladas de cana-

de-açúcar processada apresentou redução de 5,11% em relação à safra 2017/18 (CONAB, 2018).

Com o iminente acréscimo da demanda por produtos provindos da cana-de-açúcar, grandes esforços e investimentos em mecanização, melhoramento genético, química, estudos sobre ambientes de produção, manejo de água e solos vêm sendo desenvolvidos buscando o aperfeiçoamento da produtividade da cultura que hoje atinge patamares abaixo de seu potencial (Mazaron, 2013).

2.2 Mecanização e compactação

A mecanização é um dos principais elementos dentre os processos de implementação de tecnologias que permitem ampliar o ganho produtivo. Porém, o intenso tráfego de máquinas agrícolas pode provocar intensa alteração da qualidade física, acarretando mudanças no comportamento do solo (Iaia et al., 2006), o que promove condições inadequadas para o crescimento de raízes, transporte e armazenamento de ar e água, com impactos negativos sobre a produtividade do canavial.

A utilização dos diferentes sistemas de manejo ocasiona, principalmente, alterações na estrutura do solo, as quais, a longo prazo, podem estar associadas à formação de camadas compactadas (Lima et al., 2013), podendo elevar a densidade e reduzir o volume de poros no solo, o que resultaria em aumento da erosão, perda na condutividade hidráulica e redução do alongamento radicular das plantas (Shi et al., 2012).

A compactação do solo não é uma propriedade, mas sim o efeito da variação de algumas de suas propriedades, devido à redução do espaço poroso do solo em razão de cargas ou pressões exercidas em sua superfície (Hamza e Anderson, 2005), relacionadas a ações de cargas externas, tais como o tráfego de máquinas e a ação de ferramentas agrícolas (Lanças et al., 2000).

As alterações na estrutura do solo, advindas do processo de compactação, podem ser visualizadas por alterações nos valores de densidade do mesmo, resistência mecânica à penetração, porosidade total, armazenamento e disponibilidade de água às plantas (Cortez, 2013).

A colheita mecanizada tem proporcionado mudanças nas práticas de cultivo da cana-de-açúcar em razão das sucessivas operações mecanizadas de colheita e transporte dos colmos que podem ocasionar a compactação do solo e comprometer a produtividade da cultura (Otto, 2012).

No Brasil, a mecanização na cultura da cana-de-açúcar atingiu 91,6% e 97,8% no estado de São Paulo na safra 2017/18 (CONAB, 2018), fator que pode ter exercido influência na redução da produtividade das últimas safras em razão do aumento do pisoteio e da compactação (Bordonal et al., 2018).

As modificações de importância agrônômica de crescimento e rendimento de culturas que ocorrem em solos compactados são consequência do aumento da resistência mecânica do solo à penetração radicular, redução da aeração, alteração do fluxo de água e calor e da disponibilidade de água e de nutrientes (Soane e Ouwerkerk, 1994; Miransari et al., 2009). Desse modo, o estudo dos atributos físico-hídricos ao longo do tempo permite quantificar não só a magnitude, mas também a duração das alterações causadas pelos diferentes sistemas de manejo (Reichert et al., 2009).

Para Toledo et al. (2010), as operações agrícolas mecanizadas devem ser planejadas de forma racional, a fim de que haja o aumento da rentabilidade no campo. Neste sentido, Hunt (1995) relata que pequenas melhorias no gerenciamento das máquinas podem trazer maior retorno do que grandes economias em outros custos de produção.

2.3 Características e representatividade do Latossolo e Argissolo

O conhecimento das demandas agrônômicas de uma cultura agrícola é imprescindível para o sucesso na atividade e fator essencial para a obtenção de resultados agrícolas, econômicos e ambientais.

A cana-de-açúcar é cultivada em diversas regiões do País, estando, conseqüentemente, em solos com propriedades físico-químicas distintas. A cultura apresenta características de rusticidade adaptando-se a diversos tipos de solos; porém, o desenvolvimento da cultura pode ser favorecido quando esta é alocada em solos profundos e com elevada capacidade de armazenamento de água (Staut, 2006).

Solos com profundidade maior do que um metro são mais recomendados para o cultivo da cana-de-açúcar, visto que o desenvolvimento de suas raízes são dependentes de características físicas do solo, como por exemplo, a capacidade de retenção de água. (Marin, 2017).

Os Latossolos e Argissolos possuem as características recomendadas para o cultivo da cana-de-açúcar, e por terem maior representação geográfica no Brasil, sobre eles estão implementadas as maiores áreas com o cultivo da cultura (IAC, 2014). A representatividade da cana-de-açúcar em áreas de Latossolo é de 47%, no estado de São Paulo (Marin, 2017).

Latossolos são solos morfologicamente homogêneos, com pouca diferenciação entre os horizontes ou camadas, reconhecidos facilmente pela cor quase homogênea do solo com a profundidade. Os Latossolos são profundos, bem drenados e geralmente com textura média ou mais fina (IAC, 2014).

Argissolos são solos minerais com nítida diferenciação entre as camadas ou horizontes, reconhecidos em campo especialmente pelo aumento, por vezes abrupto, nos teores de argila em profundidade. Podem ser arenosos, de textura média ou argilosos no horizonte mais superficial, e apresentam cor mais forte (amarelada, brunada ou avermelhada), maior coesão e maior plasticidade e pegajosidade em profundidade, devido ao maior teor de argila. Sua retenção de água é maior nos horizontes abaixo da superfície (subsuperficiais), podendo constituir-se em um reservatório de água para as plantas (IAC, 2014).

Lepsch (2010) ressalta que, a respeito dos Argissolos, principalmente quando localizados em locais com declive acentuado, deve-se atentar quanto ao manejo relacionado à conservação do solo, pois está sujeito à erosão. Essa susceptibilidade à erosão é maior quando o horizonte A é arenoso e apresenta um aumento abrupto de argila em profundidade.

2.4 Atributos físicos e sistemas de cultivo

A qualidade física do solo e o desenvolvimento de plantas estão relacionados à compactação do solo (Strudley et al., 2008), sendo que essas alterações influenciam o fluxo de gases, de água, a resistência do solo à penetração (RP), o crescimento radicular e a produtividade das culturas (Lima et al., 2010).

A maioria dos estudos acerca do comportamento da estrutura dos solos agrícolas investiga a compactação das camadas do solo, utilizando principalmente a densidade do solo e a resistência à penetração. Tais estudos não são recentes e consideram as mais diversas variáveis e condições (Silva et al., 2003). Pinheiro, 2018, identificou que a densidade do solo e a resistência mecânica à penetração foram os atributos físicos que melhor se destacaram como indicadores para avaliar a qualidade física do solo.

A resistência do solo à penetração é um dos atributos físicos do solo que influenciam diretamente o crescimento radicular e a parte aérea das plantas, sendo que esta característica é a que melhor representa as condições para o desenvolvimento radicular (Furlani et al., 2003).

A RP tem sido um dos atributos físicos frequentemente utilizados na quantificação da qualidade estrutural adequada ao crescimento de plantas (Pringle e Lark, 2007; Suzuki et al., 2007) e a caracterização da RP tem apresentado relações positivas com os efeitos das máquinas sobre a compactação (Lima et al., 2010).

Segundo Busscher (1997), a medida da resistência mecânica imposta pelo solo pode ser uma medida mais sensível que a densidade e a porosidade para identificar a presença de camadas compactadas no perfil do solo (Abreu et al., 2004), podendo servir como base à avaliação dos efeitos dos sistemas de manejo do solo sobre o ambiente radicular (Freddi et al. 2006; Tavares Filho e Ribon, 2008).

A RP é altamente dependente da umidade do solo (Gomes e Peña, 1996). Em condição de baixa umidade, a água encontra-se num maior estado de tensão nos poros do solo (Cunha et al., 2002), em que, além dessa tensão, podem-se somar as forças de coesão e de adesão já existentes entre os sólidos do solo, ocasionando uma maior resistência à deformação ou à penetração de raízes em condição de baixa umidade (Assis et., al 2009).

A resistência do solo à penetração aumenta com a compactação do mesmo, sendo restritiva ao crescimento radicular acima de certos valores que variam de 1,5 a 4,0 MPa (Carvalho et al., 2011). Silva et al. (2004) afirmam que resistências à penetração em torno de 3,5 a 6,5 MPa, aparentemente, são as mais corretas para considerar que um solo está com possíveis problemas de impedimento mecânico.

laia et al. (2006) avaliaram a RP em dois tipos de solo com diferentes texturas: Latossolo Vermelho, de textura argilosa, e Latossolo Vermelho Amarelo, de textura média, submetidos ao cultivo da cana-de-açúcar. Observaram que a RP foi dependente do tipo de solo e do número de corte da cultura onde o maior número de tráfego levou à compactação em profundidades maiores.

Habitualmente são utilizados diferentes métodos de preparo de solo com o objetivo de realizar descompactações mecânicas e que possuem como benefícios imediatos o rompimento da camada compactada, com aumento da porosidade total e redução da densidade do solo (Drescher, 2015).

As operações de preparo do solo demandam alta potência do motor, alto consumo de energia e aumento nos custos de produção, e somente são necessárias se existir camada impeditiva ao fluxo de água e crescimento do sistema radicular (Chig et al., 2014). Nessa ocasião, utilizam-se implementos que efetivamente descompactam o solo, a exemplo do subsolador, com atuação em subsuperfície (Camilotti et al., 2005).

Durante o preparo do solo, podem ser empregadas técnicas, tais como o preparo convencional, o reduzido e o plantio direto (ASAE, 1997). O preparo convencional tem como base a realização de operações mecânicas com o uso de aração e gradagem, aumentando a degradação em razão do rompimento dos agregados e a decomposição da matéria orgânica (Bayer et al., 2004), ocorrendo maior exposição do carbono orgânico e, conseqüentemente, maior emissão de CO₂ do solo, além de perdas de carbono por erosão.

A escarificação e a subsolagem são alternativas recomendadas para melhorar a qualidade física do solo, pois possuem como resultado o aumento da porosidade e a redução da densidade (Reichert et al., 2009) e, ao mesmo tempo, rompem as camadas com impedimento físico.

Alguns autores separam a operação de escarificação e de subsolagem por meio da profundidade de trabalho, sendo a primeira com atuação até a profundidade 0,30 m e a segunda para profundidades acima desse valor (Silva et al., 2015).

Quando há presença de camadas compactadas em profundidades não atingidas por outros equipamentos, a subsolagem é uma prática recomendada para o rompimento destas (Camargo e Alleoni, 1997). Essa pode ser considerada uma

prática conservacionista em razão da não-inversão de camadas e por possibilitar a manutenção de restos culturais provenientes de cultivos anteriores.

Os sistemas de preparo do solo devem oferecer condições favoráveis ao crescimento e desenvolvimento das culturas. No entanto, dependendo do solo, do clima, da cultura e de seu manejo, eles podem promover a degradação da qualidade física do solo, com restrições ao crescimento radicular (Klute, 1982).

Silva Junior et al. (2013), avaliando o Latossolo Vermelho com textura argilosa, constataram que as diferentes formas de preparo do solo influenciaram os atributos densidade do solo (Ds), porosidade total (PT), macroporosidade (MAC) e resistência à penetração (RP). Os tratamentos constituídos de preparo convencional (duas gradagens aradoras, uma subsolagem até 0,45 m de profundidade e uma gradagem niveladora) apresentaram maiores valores de Ds, quando comparados ao tratamento mais conservacionista, cultivo mínimo (uma subsolagem até a profundidade de 0,45 m e abertura de sulco para semeadura do colmo semente).

Schaffrath et al. (2015) identificaram maior diversidade de ervas daninhas no sistema de plantio direto e maior biomassa de plantas daninhas em preparo convencional, demonstrando que o sistema de manejo do solo também pode influenciar as correlações espaciais. Tais correlações podem justificar a redução de preparos de solo convencionais e a adoção de sistemas conservacionistas, em que o baixo ou o não revolvimento do solo pode acarretar maior estabilização dos atributos físicos do solo (Bertol et al., 2000).

O uso periódico do preparo convencional tem causado graves problemas para a qualidade física do solo e, conseqüentemente, para a longevidade dos canaviais (Melo, 2018), sendo constatado que algumas áreas do Estado de São Paulo têm enfrentado problemas de perda de solo e de produtividade, fato que impulsiona a discussão por sistemas de manejo conservacionistas, além da busca por inovações (IAC, 2016).

Monteiro et al. (2017) salientam que a subsolagem pode ser considerada como uma ferramenta para o preparo do solo conservacionista, visto que sua operação não promove inversão das camadas do solo, deixando maior cobertura vegetal quando comparada a outras práticas.

Dessa forma, operações agrícolas que realizem o mínimo revolvimento do solo têm sido cada vez mais utilizadas, por promover diversos benefícios, como melhoria da estrutura, porosidade, retenção e infiltração da água no solo (Duarte Junior e Coelho, 2008).

A adoção de manejos conservacionistas, como o preparo mínimo, com menor mobilização do solo, torna-se indispensável, 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 (Nagahama et al., 2016).

O preparo localizado consiste em realizar operações somente sobre as linhas onde será implantado o canavial, mantendo as entrelinhas como um local para o tráfego de máquinas. Essa técnica visa impedir a compactação causada pela pressão exercida pelos rodados das colhedoras na linha da cana (Marasca, 2014).

Souza (2016), estudando o preparo com subsolagem em área total e o preparo com subsolagem apenas na linha de plantio em Latossolo Vermelho e Argissolo Amarelo cultivados com cana-de-açúcar, verificou que a operação na linha de plantio proporciona menor alteração da estrutura do solo e cria condições físicas adequadas para o cultivo da cana em ambos os solos.

Tavares et al. (2010) avaliaram, em um experimento de longa duração (16 anos), instalado em um Argissolo Amarelo com textura arenosa/média, as alterações referentes ao preparo convencional e ao cultivo mínimo com cana crua e cana queimada e não constataram diferenças significativas para a produtividade de colmos. Camilotti et al. (2005) estudaram sistemas de preparo do solo, cultivo da soqueira e épocas de amostragem, sendo que os resultados não revelaram mudanças consistentes na densidade do solo, não afetando o perfilhamento e a produtividade da cultura. Carvalho et al. (2011) levaram em consideração a produtividade da cana-de-açúcar e os custos de cada sistema de preparo e verificaram que preparos com menores intervenções mecânicas se mostraram técnica e economicamente viáveis.

Tim Chamen et al. (2015) constataram que intervenções mecânicas de preparo de solo, como subsolagens ou escarificações, possuem efeitos temporários e nem sempre são eficientes para mitigar a compactação do solo. Diversos trabalhos também apontam a efemeridade dos benefícios relacionados às técnicas mecânicas

(Rosa, 2007; Veiga et al., 2008; Silva et al., 2012; Drescher et al., 2012), ocasionando efeitos residuais inferiores a um ano (Hamilton-Manns et al., 2002), enquanto outros trabalhos indicam durações por maiores períodos (Drescher et al., 2011), conforme as características do solo e das práticas de manejo.

Esses resultados podem estar associados à habilidade intrínseca do solo em recuperar-se da degradação ou do estresse aplicado e retornar a um novo equilíbrio, semelhante ao estado antecedente, denominado de resiliência do solo (Blanco e Lal, 2010). Sendo assim, processos naturais de contração e expansão do solo podem contribuir para dissipar a compactação causada pelo tráfego de máquinas e dispensar o consumo de tempo e energia com operações mecanizadas de descompactação (Drescher, 2015), agregando, assim, um caráter de sustentabilidade ao sistema agrícola e possibilitando ganhos de produtividade (Denardin et al., 2011).

3. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no estado de São Paulo, em duas áreas distintas, com uma distância de 27 km entre si e que estão destinadas à produção de cana-de-açúcar por mais de 20 anos. A primeira área está localizada no município de Guariba com 618 m de altitude e próximo às coordenadas geográficas 21°24'25''S e 48°12'12''W. A segunda área está localizada no município de Monte Alto com 735 m de altitude e próximo às coordenadas geográficas 21°15'23''S e 48°25'52''W (Figura 1)

O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é Aw, tipo mesotérmico com inverno seco, com a temperatura do mês mais quente superior a 22 °C e a do mês mais frio superior a 18° C. A precipitação média anual é de 1.400 mm, com concentração de chuvas no período de outubro a março e relativa seca entre abril e setembro. A precipitação acumulada no período do experimento foi de 2380 mm na área sob o Latossolo Vermelho (LV) e de 2792 mm na área sob Argissolo Amarelo (PA) (Figura 2).

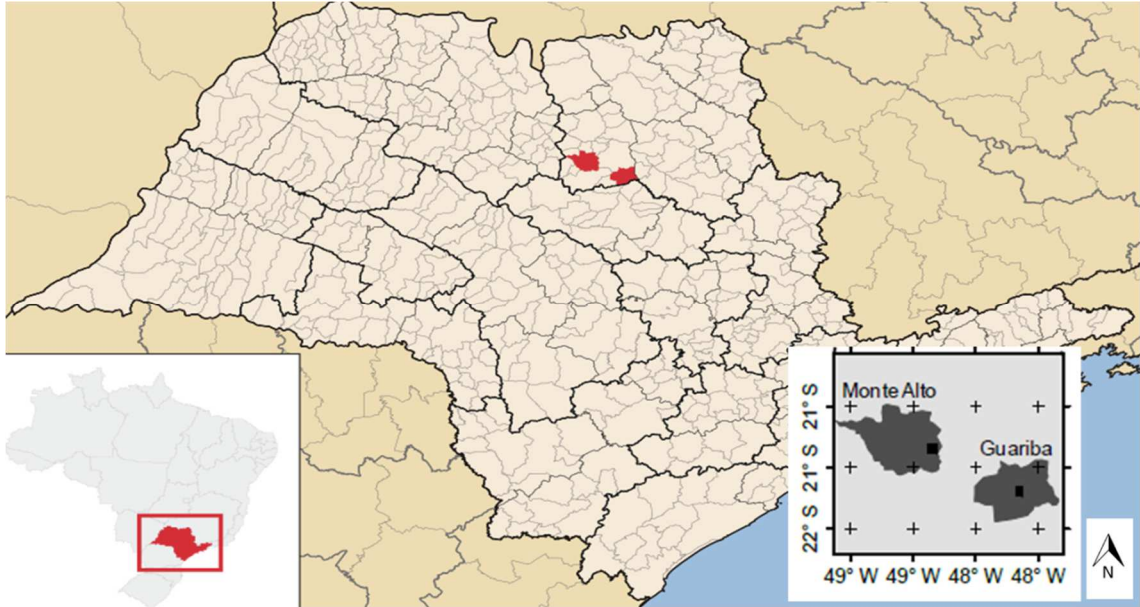


Figura 1. Localização geográfica das áreas experimentais, localizadas nos municípios de Guariba e Monte Alto.

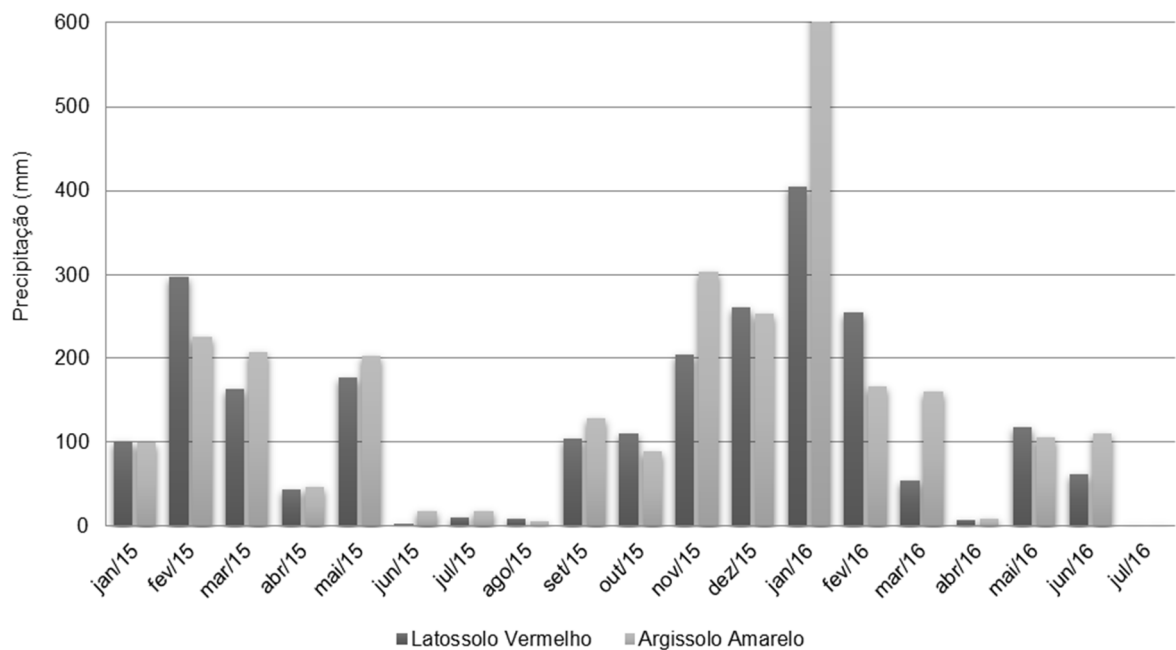


Figura 2. Precipitação mensal das áreas experimentais no período de janeiro/15 a julho/2016.

O solo da primeira área foi classificado como Latossolo Vermelho (LV) (Santos et al., 2018) de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos e está localizado próximo à transição arenito-basalto, sendo o arenito Vale do Rio do Peixe, antigo Grupo Bauru, Formação Adamantina, e o basalto da Formação Serra Geral (IPT, 1981). O solo é considerado como B pela classificação por ambientes de produção da cana-de-açúcar (Prado et al., 2008).

O solo da segunda área foi classificado como Argissolo Amarelo (PA), com o horizonte B iniciando a 0,35 m, sendo a geologia da área o arenito Vale do Rio do Peixe, antigo Grupo Bauru, Formação Adamantina (IPT, 1981), que na classificação para ambientes de produção da cana-de-açúcar (Prado et al., 2008) é considerado como C. Ambas as áreas possuem declividade inferior a 3 %.

A caracterização da textura do solo foi realizada por meio da análise granulométrica de acordo com Claessen (1997) (Tabela 1). Amostras de solo deformadas foram coletadas com auxílio de trado holandês, nas camadas 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 m, sendo 10 subamostras por parcela para formar uma amostra composta.

Tabela 1. Teores de argila, areia e silte nas camadas 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 m, do Latossolo Vermelho e Argissolo Amarelo submetidos ao preparo do solo na linha de plantio e em área total.

Camada (m)	Argila ----- g kg ⁻¹ -----	Areia	Silte
Latossolo Vermelho			
0,00 - 0,10	550	392	58
0,10 - 0,20	566	379	55
0,20 - 0,40	601	347	52
Argissolo Amarelo			
0,00 - 0,10	130	809	61
0,10 - 0,20	155	753	92
0,20 - 0,40	183	741	76

Tabela 2. Atributos químicos nas camadas 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m, do Latossolo Vermelho e Argissolo Amarelo submetidos ao preparo do solo na linha de plantio e em área total.

	Latossolo Vermelho		Argissolo Amarelo	
	Camada (m)			
	0,00-0,10	0,10-0,20	0,00-0,10	0,10-0,20
pH (H ₂ O)	5,7	5,5	5,6	5,5
CO (g Kg ⁻¹)	30,0	26,0	8,0	6,0
P (mg dm ⁻³)	37,0	31,0	16,0	14,0
K (cmol _c dm ⁻³)	0,2	0,1	0,1	0,1
Ca (cmol _c dm ⁻³)	3,9	3,5	2,3	2,1
Mg (cmol _c dm ⁻³)	1,7	1,4	0,8	0,7
Al (cmol _c dm ⁻³)	0,0	0,0	0,0	0,0
H + Al (cmol _c dm ⁻³)	2,2	2,5	1,6	1,7
SB (cmol _c dm ⁻³)	5,8	5,0	3,3	2,9
CTC (cmol _c dm ⁻³)	8,0	7,5	4,9	4,6
V (%)	72	67	66	63

O delineamento experimental utilizado foi em parcelas grandes pareadas (Perecin, 2008; Perecin et al., 2015) e a área foi composta por 20 parcelas (10 destinadas para cada tratamento), cada qual com aproximadamente 0,5 ha de área no LV e 0,45 ha no PA. Os tratamentos foram constituídos pelo preparo de solo com subsolagem na linha de plantio, denominado preparo localizado (PL), e outro com subsolagem em área total, denominado preparo em área total (PAT).

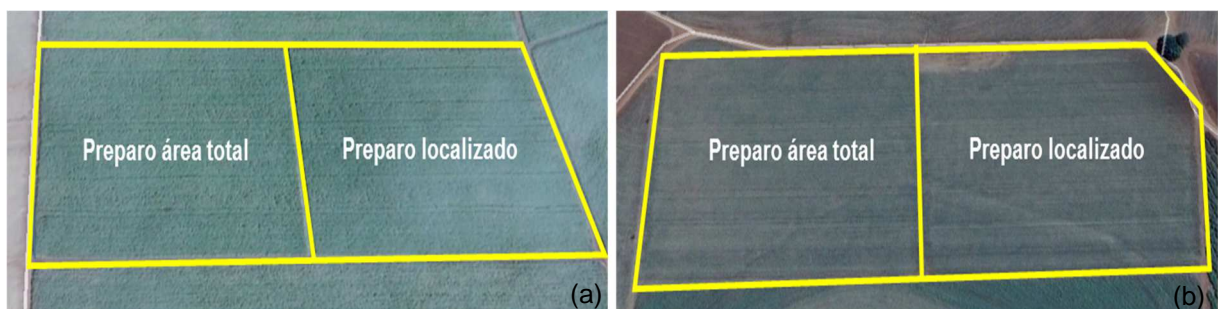


Figura 3. Croqui das áreas experimentais e divisão das parcelas grandes pareadas dos tratamentos no Latossolo Vermelho (a) e Argissolo Amarelo (b).



(a)

1° PARC	1° PARC
2° PARC	2° PARC
3° PARC	3° PARC
4° PARC	4° PARC
5° PARC	5° PARC
6° PARC	6° PARC
7° PARC	7° PARC
8° PARC	8° PARC
9° PARC	9° PARC
10° PARC	10° PARC

(b)

Figura 4. Área sob Latossolo Vermelho (a) e demonstração da metodologia de instalação das 10 parcelas pareadas (b).

A erradicação das plantas referentes ao cultivo anterior ocorreu antes da instalação do experimento. A operação foi realizada de forma mecanizada no Latossolo Vermelho, utilizando-se de um equipamento eliminador de soqueira, no mês de novembro/2014. No Argissolo Amarelo, a erradicação foi realizada através da aplicação de glifosato (dose de 4 L ha⁻¹), no mês de janeiro/2015, e ocorreu em função do manejo conservacionista adotado em solos com maior potencial de erosão. O manejo utilizado foi cana sobre cana, ou seja, não foi realizada rotação de culturas.

A correção química do Latossolo Vermelho ocorreu no mês de dezembro/2014 através da aplicação de 1,5 t ha⁻¹ de calcário (CaO: 35%, MgO: 15% e PRNT: 81%) e

1,0 t ha⁻¹ de gesso agrícola. No Argissolo Amarelo, a aplicação foi realizada no mês de janeiro/2015, com a dose de 3,0 t ha⁻¹ de calcário (CaO: 35%, MgO: 15% e PRNT: 81%) e 1,0 t ha⁻¹ de gesso agrícola.

O preparo localizado (PL) foi realizado por meio de um subsolador com quatro hastes para o preparo de duas linhas consecutivas, sendo cada linha preparada pela atuação de um par de hastes espaçadas em 0,5 m. O espaçamento entre as duas hastes centrais foi de 1,0 m e o espaçamento entre as duas hastes das extremidades foi de 2,0 m. O propósito da composição foi proporcionar o espaçamento de 1,5 m entre o centro das duas linhas preparadas (Figura 5).

O preparo em área total (PAT) foi realizado por meio de um subsolador com cinco hastes, com uma configuração que consiste em uma haste no centro do equipamento e mais duas hastes em cada lateral, sendo todas com espaçamento de 0,5 m entre si (Figura 5).

Os dois equipamentos subsoladores possuíam hastes com comprimento de 0,80 m e 0,04 m de largura; ponteira triangular com 0,25 m de comprimento e 0,1 m de largura; e rolos destorroadores localizados atrás das hastes com a função de destorroar e nivelar o solo. Para ambos os tratamentos, a profundidade executada de trabalho foi de 0,4 m de profundidade.

A subsolagem na área sob PL e PAT foi realizada em 31 de janeiro de 2015, com a umidade do solo igual a 0,18 g g⁻¹ no LV, e no PA, em 17 de fevereiro de 2015, com a umidade do solo igual a 0,11 g g⁻¹.

O plantio da cultura (variedade CTC 14) foi realizado no dia 07/03/2015 no LV e no dia 26/03/2015 (Variedade CTC 4) no PA. A operação foi realizada por um conjunto mecanizado composto por plantadora e trator, com sulcação a 0,30 m de profundidade, espaçamento de 1,5 m entre os sulcos, aplicação de 500 kg ha⁻¹ do fertilizante 10-25-25, distribuição das mudas e aplicação de defensivos e cobertura.

Nas duas áreas, imediatamente após o plantio, foi realizada a aplicação de herbicidas. No mês de junho/2015, foram realizadas a operação de quebra lombo e uma nova aplicação de herbicida.

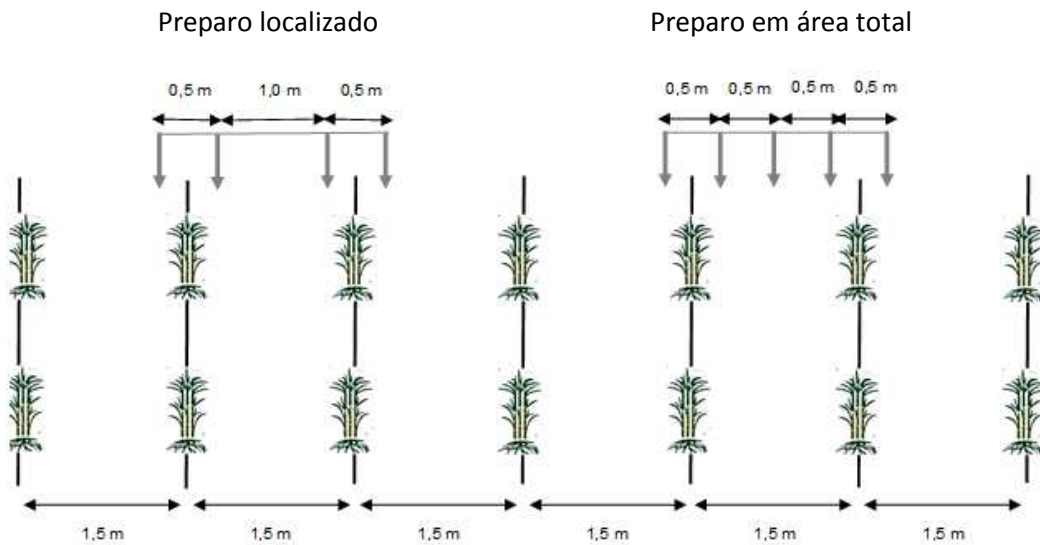


Figura 5. Esquema representativo da atuação e configuração dos equipamentos para o preparo localizado (PL) e preparo em área total (PAT).

As amostragens para a determinação da resistência do solo à penetração (RP) foram realizadas nas camadas de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 m na linha e entrelinha de plantio. As coletas na linha de plantio foram realizadas a 0,20 m distante do centro do sulco e, na entrelinha de plantio, foram realizadas aproximadamente a 0,75 m distante do centro do sulco.

Para a avaliação, foram realizadas três amostragens: 1ª amostragem, após a subsolagem do solo (E1); 2ª amostragem, após o plantio da cana-de-açúcar (E2) e 3ª amostragem, seis meses após o plantio (E3).

Amostras de solo indeformadas foram coletadas, utilizando-se anéis volumétricos (diâmetro: 0,05 m e altura: 0,05 m) coletados com o trado tipo Uhland. Em cada parcela, foram retirados três anéis volumétricos contendo as amostras de solo indeformadas. A resistência à penetração (RP) foi determinada com a utilização do penetrômetro eletrônico estático de laboratório, após aplicar em cada amostra a tensão de 100 hPa, conforme descrito por Tormena et al. (1998).

A cana-de-açúcar foi colhida crua e de forma mecanizada no dia 01/07/2016. Foi utilizada uma colhedora, que realizou o corte e transferiu os colmos em uma composição de dois transbordos equipados com células de cargas para mensuração da massa colhida. A produção de colmos foi determinada em cada uma das parcelas, o que permitiu calcular a produtividade de colmos ($t\ ha^{-1}$).

A análise de variância foi realizada no delineamento em parcelas grandes pareadas (Perecin, 2008; Perecin et al., 2015). A comparação das médias das variáveis em estudo foi realizada utilizando-se do teste de Tukey, ao nível de significância de 5% de probabilidade ($p < 0,05$) em cada camada de solo.

Foi realizado o teste T para verificar os efeitos dos tratamentos na RP, avaliados através das diferenças entre os valores relacionados ao atributo no momento inicial (E0), comparado com cada um dos tratamentos (preparo localizado e preparo em área total), em cada uma das posições (linha e entrelinha) e em cada tempo (E1, E2 e E3). A estatística para o teste T foi razão entre a média do atributo, pela raiz quadrada do quadrado médio do resíduo da análise das diferenças, pelo número de repetições, segundo a equação a seguir:

$$T = \frac{\text{Valor da média da diferença}}{\sqrt{\frac{\text{QM resíduo}}{\text{n}^\circ \text{ de repetições}}}}$$

Eq.1

De acordo com o T tabelado (T_{tab}), haverá diferença significativa no atributo ($p < 0,05$) quando T estiver fora do intervalo $[-2, 2]$. A diferença positiva (+) indicará que o atributo avaliado apresentou valores menores em relação àqueles em E0 e a diferença negativa (-) indicará que o atributo apresentou valores superiores em relação àqueles avaliados anteriormente ao preparo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Avaliação da RP no preparo de solo localizado (PL) e no preparo de solo em área total (PAT)

Os valores da resistência do solo à penetração (RP), no Latossolo Vermelho, avaliados nas camadas 0,00-0,10 e 0,20-0,40 m (Tabela 3), não foram influenciados pelo preparo localizado (PL) e preparo em área total (PAT). Entretanto, na camada 0,10-0,20 m, os valores de RP foram maiores no solo sob PL do que PAT.

Considerando-se os valores médios dos dois locais amostrados e das três épocas avaliadas, a diferença encontrada na camada 0,10-0,20 m foi em razão do maior valor do atributo na entrelinha e maior amplitude entre os valores da RP na entrelinha dos dois tratamentos (Figura 6.b), quando comparados aos valores das demais camadas.

Tal fato também pode explicar o comportamento da resistência à penetração (RP) no solo das camadas 0,00-0,10 m (Figura 6.d) e 0,20-0,40 m (Figura 6.f) do Argissolo Amarelo. No solo em questão, apenas a camada 0,10-0,20 m (Tabela 3) não foi influenciada pelo preparo localizado (PL) e pelo preparo em área total (PAT).

Em ambos os solos, após o preparo (E1), a entrelinha da cultura, onde foi realizada a operação de subsolagem em área total (PAT) e que sofreu ação das hastas subsoladoras, apresentou valores menores de resistência à penetração em todas as camadas avaliadas (Figura 6) quando comparados àqueles obtidos na entrelinha da cultura na área sob o preparo localizado (PL).

Na E1, observou-se no Latossolo Vermelho que o valor de RP na entrelinha do solo sob PL, quando comparado ao PAT (Figura 6), foi 92% maior na camada 0,00-0,10 m (EL-PL: 1,82 MPa e EL-PAT: 0,95 MPa) e 65% maior na camada 0,10-0,20 m (EL-PL: 1,97 MPa e EL-PAT: 1,19 MPa). Por sua vez, na camada 0,20-0,40 m, as diferenças não foram significativas (Tabela 3), mesmo com o valor de RP 30% maior (EL-PL: 2,23 MPa e EL-PAT: 1,71 MPa). Tal fato pode ser caracterizado pela redução na eficiência da operação de subsolagem em alterar a resistência do solo à penetração, em função da profundidade de atuação do implemento, ocasionando alterações principalmente nas camadas superficiais.

No Argissolo Amarelo, todos os valores de RP na entrelinha apresentaram diferenças entre os tratamentos PAT e PL (Tabela 3) na E1. Na camada 0,00-0,10 m, observou-se que o valor de RP na entrelinha do solo sob PL foi 100% maior (EL-PL: 2,65 MPa e EL-PAT: 1,32 MPa) quando comparado ao PAT, na camada 0,10-0,20 m foi 108% maior (EL-PL: 3,08 MPa e EL-PAT: 1,48 MPa) e na camada 0,20-0,40 m 70% maior (EL-PL: 2,88 MPa e EL-PAT: 1,69 MPa). Os resultados, assim como no Latossolo Vermelho, demonstram uma tendência de redução na eficiência da operação subsolagem em função da profundidade, porém esse efeito foi minimizado no Argissolo Amarelo por apresentar menores teores de argila em todas as camadas

(Tabela 1) resultando em menor resistência ao deslocamento da máquina e consequente ação das hastes subsoladoras.

Os valores de RP na entrelinha sob PAT aumentaram após a operação de plantio (E2), comparando com a E1, demonstrando o impacto das operações mecanizadas sobre a resistência do solo à penetração (Figura 6). Em todas as camadas avaliadas, houve redução na diferença dos valores de RP na entrelinha do solo sob preparo em área total em comparação com a entrelinha sob preparo localizado, demonstrando tendência à equidade (Figura 6). Segundo Souza (2016), esse comportamento pode estar associado à passagem de máquinas em solo que sofreu desestruturação pela subsolagem, resultando em maior transmissão de pressão, diminuindo a porosidade do solo e impactando os atributos do solo.

No Latossolo Vermelho, o comportamento pode ser observado pelos resultados não significativos da comparação EL-PL e EL-PAT na E2 (Tabela 3). O valor RP na entrelinha do solo sob PL na camada 0,00-0,10 (Figura 6.a), em comparação com o mesmo local no PAT, que foi 92% maior na E1, passou a 7% maior na E2 (EL-PL: 2,41 MPa e EL-PAT: 2,24 MPa), não apresenta diferenças (Tabela 3). Portanto, a entrelinha não subsolada demonstrou maior capacidade de resistência aos distúrbios causados pela mecanização, ao apresentar elevação de 0,49 MPa na RP, enquanto no PAT, o aumento foi de 1,29 MPa. O comportamento da variação na resistência do solo à penetração foi notado de maneira semelhante no solo da entrelinha das camadas 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 m (Figuras 6.b e 6.c). Na camada 0,10-0,20 m, o tratamento PL apresentou valor de RP 15% maior na E2 (EL-PL: 2,84 MPa e EL-PAT: 2,46 MPa) mediante 65% na E1 e com aumento na RP de 0,89 MPa, enquanto no PAT o aumento foi de 1,28 MPa. Na camada 0,20-0,40 m, os valores de RP na E2 foram congruentes (2,56 MPa). Entretanto, quando comparada com a E1, a RP aumentou em 0,31 MPa na entrelinha do solo sob PL e 0,82 MPa no local sob PAT.

No Argissolo Amarelo, as diferenças ocorreram em E2, nas camadas 0,00-0,10 e 0,20-0,40 m (Tabela 3). O valor da RP na entrelinha do solo sob PL na camada 0,00-0,10 m (Figura 6.d), em comparação com o mesmo local no PAT, que foi 100% maior na E1, passou a 39% na E2 (EL-PL: 2,46 MPa e EL-PAT: 1,77 MPa). Na camada 0,10-0,20 m, o valor foi 6% maior (EL-PL: 2,61 MPa e EL-PAT: 2,46 MPa) mediante 108%

em E1, e na camada 0,20-0,40 m foi 21% maior (EL-PL: 2,90 MPa e EL-PAT: 2,39 MPa), enquanto em E1, o valor da RP foi 70% maior, demonstrando, portanto, uma tendência de equalização em curto espaço de tempo. Os valores da RP no solo da entrelinha sob PL foram reduzidos em relação à E1 nas camadas 0,00-0,10 m (Figura 6.d) e 0,10-0,20 m (Figura 6.e); e se mantiveram semelhantes na camada 0,20-0,40 m (Figura 6.f), demonstrando maior capacidade de resistência aos impactos do trânsito de máquinas e equipamentos.

A terceira avaliação (E3) foi realizada seis meses após o plantio e, no Latossolo Vermelho, os valores de RP reduziram em relação à E2 no solo da entrelinha dos dois tratamentos nas camadas 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m, e no solo da entrelinha do PAT na camada 0,20-0,40 m (Figura 6). O fato pode ser explicado pelo processo de resiliência, que pode ser definido como a capacidade intrínseca do solo em retornar ao equilíbrio semelhante do estado antecedente (Blanco e Lal, 2010), estimulado por processos regenerativos, que podem incluir ciclos de umedecimento, secamento e ações de atividades biológicas, como o crescimento de raízes (Bavoso et al, 2012).

Pelas comparações entre PL e PAT na E3, observou-se que as diferenças não foram significativas na entrelinha na camada 0,00-0,10 m, porém foram significativas nas camadas 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 m (Tabela 3), em razão do aumento da diferença entre os valores da RP, ocasionado pela redução do valor do atributo na área sob PAT na camada 0,10-0,20 (Figura 6.b) m e pelo aumento da RP na área sob PL na camada 0,20-0,40 m (Figura 6.c).

A época 3 (E3) se caracterizou, no Argissolo Amarelo, por apresentar um aumento nos valores da RP no solo da entrelinha dos dois tratamentos e em todas as camadas, quando comparada à E2 (Figura 6). O aumento dos valores da RP pode ser explicado pelo comportamento natural e resiliente do solo. O fenômeno também foi observado por Busscher et al. (2002), que verificaram a reconsolidação de um solo franco-arenoso, pelo aumento dos valores da resistência à penetração, e que o fato possuía correlação com a quantidade de precipitação acumulada e sua infiltração no solo.

Tabela 3. Valor de p-value para a comparação das médias dos valores da resistência do solo à penetração nas três épocas de amostragem (E1, E2 e E3) nas camadas 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 m, nas linhas e entrelinhas de plantio do Latossolo Vermelho e Argissolo Amarelo submetidos à subsolagem na linha de plantio (PL) e em área total (PAT).

Tratamento	Latossolo Vermelho			Argissolo Amarelo		
	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,40	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,40
PL*PAT	0,20 ns	0,002 *	0,17 ns	0,01 *	0,10 ns	0,0002 *
EL-PL * EL-PAT - E1	0,003 *	0,008 *	0,07 ns	< 0,0001 **	< 0,0001 **	< 0,0001 **
EL-PL * EL-PAT - E2	0,54 ns	0,19 ns	0,99 ns	0,006 *	0,64 ns	0,05 *
EL-PL * EL-PAT - E3	0,39 ns	0,033 *	0,027 *	0,018 *	0,18 ns	0,02 *
L-PL * L-PAT - E1	0,45 ns	0,38 ns	0,48 ns	0,010 *	0,12 ns	0,072 ns
L-PL * L-PAT - E2	0,91 ns	0,51 ns	0,002 *	0,35 ns	0,27 ns	0,99 ns
L-PL * L-PAT - E3	0,27 ns	0,35 ns	0,09 ns	0,52 ns	0,94 ns	0,02 *

*Difere estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade ($p < 0,05$).

**Difere estatisticamente ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,001$).

ns - Não significativo ao nível de 5% de probabilidade

Na E3, os valores da RP foram maiores na entrelinha do solo sob PL em relação ao PAT (Figura 6), sendo diferentes nas camadas 0,00-0,10 m e 0,20-0,40 m (Tabela 3). Nas duas camadas, a amplitude dos valores de RP permaneceram desde a E2 maiores quando comparados à camada 0,10-0,20 m (Figura 6).

De modo geral, para ambos os solos, os dois tratamentos promoveram ações semelhantes nos valores da RP determinada na linha de plantio. Tal comprovação era esperada pois, nos dois tratamentos, o local foi resultante da atuação das hastes subsoladoras no momento do preparo e do sulcador da plantadora no momento do plantio. Os valores da RP, verificados após a operação de subsolagem (E1) na linha da área sob PL foram menores nas camadas 0,00-0,10 m (Figura 6.a e 6.d), 0,10-0,20 m (Figura 6.b e 6.e), 0,20-0,40 m (Figura 6.f) e congruentes na camada 0,20-0,40 m do Latossolo Vermelho (Figura 6.c), quando comparados à linha em que foi realizada a subsolagem em área total (PAT). Esse resultado pode ser explicado pela menor

resistência do solo à ação de 4 hastes (PL) quando comparada à ação de 5 hastes (PAT), otimizando, assim, a força de tração do trator, possibilitando maior velocidade do mesmo e ocasionando maior desagregação das partículas do solo. O número de hastes influencia o consumo específico operacional, apresentando menor desempenho em decorrência do aumento do número de hastes (Lanças, 1988; Bicudo, 1990).

No Latossolo Vermelho, não houve diferenças significativas nos valores da RP em todas as camadas na E1 e E3 (Tabela 3). Na avaliação após o plantio (E2), apenas a camada 0,20-0,40 m apresentou diferença (Tabela 3), sendo maior no local sob PAT (Figura 6.c). Essa constatação pode estar relacionada ao fato do sulcador da plantadora, com atuação na camada 0,00-0,30 m, ter ocasionado pequena compressão da camada logo abaixo, que posteriormente retornou ao estado inicial pelo processo de resiliência do solo.

Após o plantio, nas épocas E2 e E3, das camadas 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m e, na E3 da camada 0,20-0,40 m, os dois tratamentos não promoveram diferenças a respeito da resistência à penetração (Tabela 3). Provavelmente, a ação do sulcador da plantadora no Latossolo Vermelho, com teor médio de 572 g kg⁻¹ de argila na camada 0,00-0,40 m (Tabela 1), tenha uniformizado as condições físicas do solo, o que sugere a possibilidade de que o equipamento possa substituir, nas mesmas condições apresentadas, a operação de subsolagem.

No Argissolo Amarelo, não houve diferenças significativas nas camadas 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 m na E1; em todas as camadas na E2; e nas camadas 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m na E3 (Tabela 3). Na E1, os valores de RP na linha da área sob PL foram menores quando comparados com a área sob PAT (Figura 6) e diferentes na camada 0,00-0,10 m (Tabela 3). Apenas a camada 0,20-0,40 m apresentou diferenças significativas na E3, em razão de um maior aumento no valor da RP da área sob PL quando comparado ao mesmo local sob PAT (Figura 6.f).

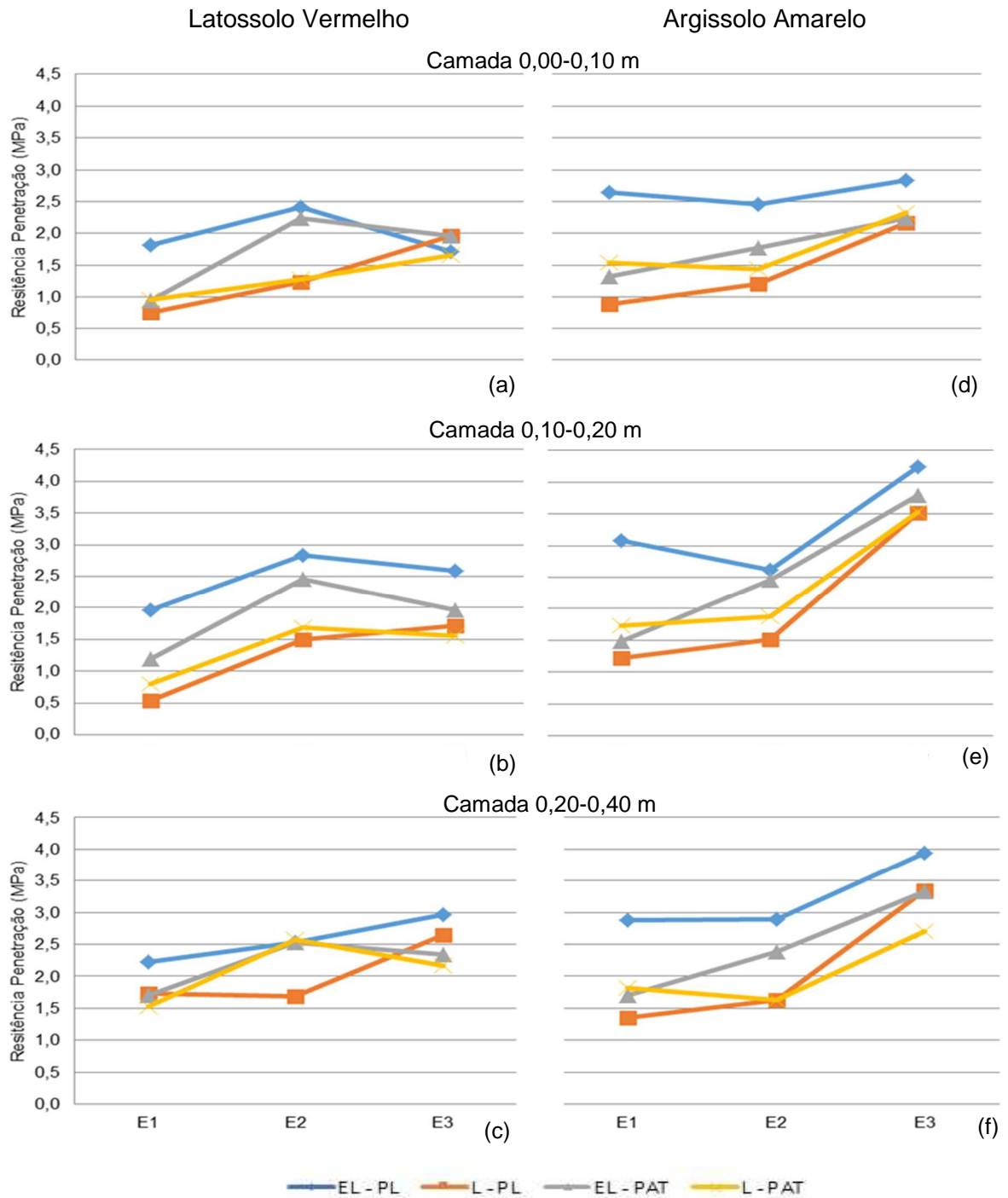


Figura 6. Valores da resistência do solo à penetração, avaliados nas linhas (L) e entrelinhas (EL) das áreas submetidas ao preparo do solo na linha de plantio (PL) e em área total (PAT), em três épocas de amostragem (E1, E2 e E3).

Para ambos os solos, os tratamentos demonstraram uma tendência à equidade para o atributo resistência do solo à penetração e suas diferentes ações não influenciaram os resultados de produtividade de colmos ($t\ ha^{-1}$) da cana planta. (Tabela 4).

Tabela 4. Produtividade de colmos da cana-de-açúcar ($t\ ha^{-1}$), no Latossolo Vermelho (CTC 14) e do Argissolo Amarelo (CTC 4) submetido à subsolagem na linha de plantio e em área total.

Tratamento	Latossolo Vermelho	Argissolo Amarelo
	Produtividade ($t\ ha^{-1}$)	
Preparo Localizado (PL)	103,97 a	109,40 a
Preparo Área Total (PAT)	101,09 a	111,22 a

*Letras iguais indicam que não houve diferença pelo teste de Tukey ($p>0,05$).

A discussão apresentada referencia a prática da subsolagem localizada como importante alternativa em comparação com a subsolagem em área total, visto que as diferenças foram minimizadas em curto período de tempo e os resultados de crescimento da planta foram semelhantes. O atributo resistência do solo à penetração (RP) foi um bom sinalizador para demonstrar o comportamento do solo mediante os diferentes manejos. Abreu et al. (2004) demonstrou que a resistência à penetração foi o atributo mais sensível em detectar a compactação quando comparado aos atributos densidade e porosidades. Bonnin et al. (2010) encontraram elevada correlação entre a resistência à penetração e a profundidade do solo, sugerindo que a RP é mais homogênea na camada superficial, devido, principalmente, ao efeito significativo do tráfego. Pinheiro (2018), avaliando a mesma área desse estudo, concluiu que a RP pode ser considerada como um bom indicador para mensurar a qualidade física dos solos. Cortez (2013) afirmou que o conhecimento da RP e de sua distribuição espacial pode ser uma importante ferramenta para o estudo da compactação e do manejo do solo.

O preparo do solo com subsolagem apenas na linha onde será implementada a cultura se mostra como alternativa ao manejo convencional de subsolagem em área total, acarretando ganhos econômicos e ambientais sem impacto ao crescimento da

planta. Marcari (2010), avaliando sedimentos presentes em uma enxurrada nos dois sistemas de preparo, em um Latossolo, observou que a perda de solo e de fósforo foi 15 vezes menor e a de potássio, 19 vezes menor no local onde a subsolagem ocorreu apenas na linha de plantio. Cortez (2013) observou que a operação da subsolagem localizada, quando comparada com a de área total, ambas em profundidade fixa, apresentou economia de 43,5% em litros de combustível e incremento de 59,4% na capacidade operacional. Tim Chamen et al. (2015) avaliaram economicamente as operações de preparo de solo e concluíram que o preparo de solo localizado pode produzir benefícios econômicos aos produtores. Souza et al. (2017) identificaram, na mesma área do Latossolo Vermelho deste estudo, acréscimo na emissão de 315,4 kg CO₂ ha⁻¹ no local com subsolagem em área total quando comparado com a subsolagem localizada.

4.2 Avaliação da persistência do efeito da subsolagem no preparo de solo localizado (PL) e no preparo de solo em área total (PAT)

Os efeitos dos tratamentos nos valores da resistência do solo à penetração (RP) e sua permanência ao longo do tempo foram avaliados por meio das diferenças entre os valores da RP avaliada na linha e na entrelinha, no Latossolo Vermelho e Argissolo Amarelo, das áreas sob preparo localizado (PL) e sob preparo em área total (PAT), comparados com o valor inicial (E0), verificado anteriormente às operações de preparo do solo (Tabela 5).

No Latossolo Vermelho, os valores da RP avaliados sob preparo em área total (PAT) apresentaram comportamento semelhante nas três camadas avaliadas. Após a operação de subsolagem (E1), os valores da resistência à penetração (RP) foram reduzidos em relação a E0 (Tabela 6), porém, após o plantio (E2), os valores de RP ficaram semelhantes e permaneceram sem apresentar diferenças até a E3.

Tabela 5. Valores de resistência do solo à penetração (MPa) na época anterior ao preparo de solo (E0), no Latossolo Vermelho e Argissolo Amarelo.

Amostragem	Latossolo Vermelho			Argissolo Amarelo		
	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,40	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,40
Época inicial (E0)	1,91	2,12	2,24	2,51	3,23	3,04

Na camada 0,00-0,10 m (Figura 7.a), o impacto das primeiras operações mecanizadas de plantio (E2) na entrelinha da área sob preparo em área total (PAT) ocasionou aumento de 136% na RP (E1: 0,95 MPa e E2: 2,24 MPa), quando comparado à E1, e de 17% quando comparado com a E0. Na camada 0,10-0,20 m (Figura 7.b) o aumento nos valores da RP foi de 107% (E1: 1,19 MPa e E2: 2,46 MPa), na comparação com E1, e de 16% comparando com E0. Na camada 0,20-0,40 m (Figura 7.c), o aumento no valor do atributo foi de 48% (E1: 1,71 MPa e E2: 2,53 MPa), quando comparado à E1, e de 13% no comparativo com E0. As diferenças dos valores da resistência à penetração na entrelinha do PAT em relação a E0 foram reduzidas na E3 e não foram significativas (Tabela 6).

No Argissolo Amarelo, o solo da entrelinha sob PAT, em todas as camadas avaliadas, apresentou comportamento semelhante ao ocorrido no Latossolo Vermelho na E1, onde, após a operação de subsolagem, os valores da resistência à penetração foram reduzidos e apresentaram diferenças no comparativo com E0 (Tabela 6).

As operações mecanizadas de plantio (E2) acarretaram aumento no valor da resistência à penetração (RP) no solo da entrelinha sob PAT (Figura 7). Na camada 0,00-0,10 m (Figura 7.d), o impacto das primeiras operações ocasionou um aumento de 34% na RP (E1: 1,32 MPa e E2: 1,77 MPa), quando comparado à E1, porém permaneceu 29% menor no comparativo com E0. Na camada 0,10-0,20 m (Figura 7.e), o aumento na RP foi de 66% (E1: 1,48 MPa e E2: 2,46 MPa) quando comparado à E1, e permaneceu 24% menor à E0. Na camada 0,20-0,40 m (Figura 7.f), o aumento no valor do atributo foi de 40% (E1: 1,69 MPa e E2: 2,39 MPa), quando comparado à E1, e continuou 21% menor no comparativo com E0. Em todas as camadas, as diferenças com E0 continuaram significativas (Tabela 6), demonstrando maior capacidade do Argissolo Amarelo em resistir aos impactos das operações mecanizadas de plantio quando comparado ao Latossolo Vermelho, em razão da

menor plasticidade decorrente das diferenças texturais (menor teor de argila) entre os solos (Tabela 1).

Tabela 6. Estatística T para a diferença do atributo resistência do solo à penetração nas três épocas de amostragem (E1, E2 e E3) com a época inicial, nas camadas 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 m, nas linhas e entrelinhas de plantio do Latossolo Vermelho e Argissolo Amarelo submetidos à subsolagem na linha de plantio (PL) e em área total (PAT).

Tratamento		Latossolo Vermelho			Argissolo Amarelo		
		E1	E2	E3	E1	E2	E3
0,00 - 0,10 m							
PL	Entrelinha	0,48 ns	-2,86 *	1,04 ns	-0,73 ns	0,28 ns	-1,70 ns
	Linha	6,49 *	3,73 *	-0,33 ns	8,65 *	6,96 *	1,84 ns
PAT	Entrelinha	5,41 *	-1,87 ns	-0,32 ns	6,35 *	3,95 *	1,49 ns
	Linha	5,29 *	3,56 *	1,42 ns	5,20 *	5,72 *	1,00 ns
0,10 - 0,20 m							
PL	Entrelinha	0,81 ns	-3,93 *	-2,53 *	0,70 ns	2,88 *	-4,63 *
	Linha	8,56 *	3,35 *	1,99 ns	9,27 *	7,97 *	-1,28 ns
PAT	Entrelinha	5,06 *	-1,88 ns	0,83 ns	8,09 *	3,57 *	-2,57 *
	Linha	7,18 *	2,32 *	3,05 *	6,91 *	6,30 *	-1,40 ns
0,20 - 0,40 m							
PL	Entrelinha	0,06 ns	-1,47 ns	-3,66 *	1,07 ns	1,01 ns	-2,14 *
	Linha	2,56 *	2,78 *	-2,00 ns	5,70 *	4,86 *	-0,31 ns
PAT	Entrelinha	2,65 *	-1,45 ns	-0,49 ns	4,66 *	2,56 *	-0,30 ns
	Linha	3,55 *	-1,65 ns	0,35 ns	4,30 *	4,86 *	1,60 ns

*Difere estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade ($p < 0,05$), quando T estiver fora do intervalo [-2, 2].

ns – Não significativo ao nível de 5% de probabilidade.

Na E3, as diferenças dos valores da resistência à penetração na entrelinha do PAT foram reduzidas em relação à E0 (Figura 7) e não foram significativas nas camadas 0,00-0,10 m e 0,20-0,40 m (Tabela 6). Na camada 0,10-0,20 m, o valor negativo (Tabela 6) demonstra que a RP verificada na E3 apresentou valores maiores que em E0 (Figura 7.b).

No Latossolo Vermelho, a entrelinha que não sofreu ação das hastes subsoladoras na área sob preparo localizado (PL) apresentou aumento nos valores da resistência à penetração (RP) após o plantio (E2) nas três camadas, quando

comparada à E1 (Figura 7). Esses valores foram diferentes da E0, nas camadas 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m; entretanto, na camada 0,20-0,40 m, não houve diferença, demonstrando redução da capacidade de transferência de energia, pelo fato de o tráfego de máquinas alterar a RP em função do aumento da profundidade (Tabela 6).

No Argissolo Amarelo, na área sob preparo localizado (PL), os valores da RP do solo da entrelinha não apresentaram diferenças em relação à E0, após as operações mecanizadas de plantio (E2) nas camadas 0,00-0,10 e 0,20-0,40 m (Tabela 6). No mesmo período, a camada 0,10-0,20 m apresentou diferenças em relação à E0 (Tabela 6), em razão da redução do valor da RP do local. Tais fatos demonstram que a mecanização resultante das operações de plantio não influenciaram negativamente a RP da entrelinha sob PL.

Na E3, os valores de RP na entrelinha do Latossolo Vermelho sob PL aumentaram em relação à E2, nas camadas 0,00-0,10 m (Figura 7.a) e 0,10-0,20 m (Figura 7.b), e reduziram na camada 0,20-0,40 m (Figura 7.c). As diferenças dos valores da RP foram significativas na comparação com E0 nas camadas 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 m (Tabela 6), sendo esses valores maiores que os observados no momento anterior ao preparo de solo (E0). Na camada 0,00-0,10 m, os valores de RP não foram diferentes.

Em todas as camadas do Argissolo Amarelo, os valores de RP avaliados na E3 na entrelinha do solo sob PL aumentaram em relação à E2 e ficaram maiores que no momento anterior ao preparo do solo E0 (Figura 7). Os resultados foram semelhantes ao ocorrido no Latossolo Vermelho, onde as diferenças também foram significativas nas camadas 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 m e não significativas na camada 0,00-0,10 (Tabela 6). Tais respostas podem ser explicadas pela maior ocorrência do processo de natural rearranjo das partículas do solo (Drescher et al., 2016) nas camadas superficiais, em razão da maior exposição aos fatores ambientais, como temperatura e precipitação, e da maior presença de raízes das plantas.

Em ambos os solos, os valores da RP verificados na linha de plantio em E1 foram influenciados nas três camadas pelo preparo localizado (PL) e pelo preparo em área total (PAT) no comparativo com E0. No Argissolo Amarelo, as diferenças, nas três camadas, ocorreram em E1 e E2, porém, em E3 os valores da RP não foram

diferentes (Tabela 6). O mesmo comportamento foi verificado nos valores da RP no solo da linha de plantio do Latossolo Vermelho sob o preparo localizado (PL).

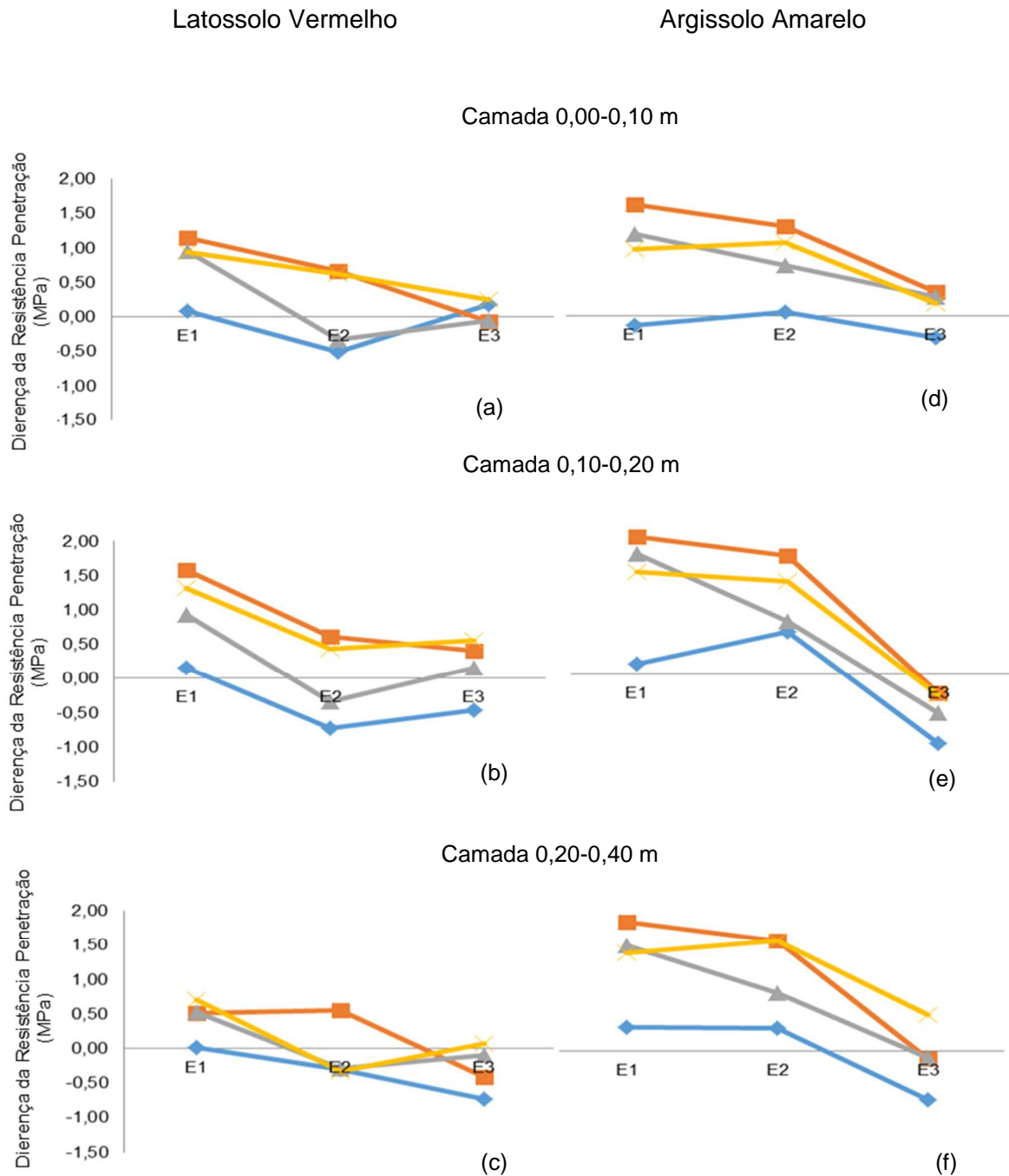


Figura 7. Valores da diferença da resistência do solo à penetração com a época inicial, avaliados nas linhas (L) e entrelinhas (EL) das áreas submetidas ao preparo do solo na linha de plantio (PL) e em área total (PAT), em três épocas de amostragem (E1, E2 e E3).

No solo da linha do Latossolo Vermelho sob PAT, na camada 0,00-0,10 m, a diferença permaneceu após o plantio (E2), porém os valores não diferiram de E0 na E3. Na camada 0,10-0,20 m, houve diferenças nas três épocas. Na camada 0,20-0,40 m, os valores da RP não foram diferentes de E0 após o plantio (E2) e na E3 (Tabela 6).

De modo geral, o comportamento da RP na linha de plantio onde houve ação das hastes subsoladoras foi semelhante para o preparo localizado (PL) e para o preparo em área total (PAT). Os valores apresentaram tendência de aumento no tempo (Figura 7) e se aproximaram dos obtidos antes das operações de preparo de solo (E0), demonstrando o efeito temporário e de curto prazo que a operação de subsolagem exerce sobre a resistência do solo à penetração.

O impacto do preparo de solo no atributo se mostrou pouco persistente no decorrer do tempo, o que levanta hipóteses sobre a eficiência desse manejo sobre o crescimento da cultura. Os resultados corroboram os observados por outros autores. Reichert et al. (2017) verificaram o efeito temporário e de curto prazo da subsolagem sobre solos de textura arenosa a franco argilo-arenoso. Silva et al. (2012), em um Latossolo Vermelho, observaram aumento nos valores de Ds e grau de compactação seis meses após as operações de preparo de solo. Ambos relacionam os resultados aos ciclos de umedecimento e secagem do solo como principais causas do rearranjo dos solos.

Segundo Crusciol et al. (2010), em canas de 18 meses, o período correspondente a 200-400 dias após o plantio é caracterizado por rápido crescimento e pelo acúmulo 75% do total de sua massa. Melo, 2019, na mesma área desse estudo, identificou um aumento na taxa de crescimento dos colmos após o mês de setembro, época denominada E3 nesse trabalho. O mesmo trabalho verificou que o desenvolvimento da cultura antes do período de maior crescimento também não apresentou diferenças entre os tratamentos com diferentes preparos.

Sendo assim, é possível afirmar que no período anterior ao ciclo de maior desenvolvimento da cultura, o solo apresentou, de modo geral, propriedades físicas de resistência do solo à penetração semelhantes ao momento anterior ao preparo do solo, não acarretando diferenças significativas de produtividade ($t\ ha^{-1}$), conforme verificado na tabela 4. Sá et al. (2016) avaliaram o efeito da subsolagem sobre a

resistência à penetração e densidade do solo no crescimento da planta em um Latossolo Vermelho, textura muito argilosa, e não encontraram diferenças entre os tratamentos com e sem subsolagem.

Em razão do exposto e dos resultados desse estudo, sugere-se que as operações de preparo de solo não possuam relações diretas com a produtividade, visto que seus efeitos foram minimizados em curto espaço de tempo. Observou-se que os valores de RP, antes do momento de maior desenvolvimento da cultura, foram semelhantes ao período anterior ao preparo de solo. O trabalho também indica, baseado na característica de implantação da cultura da cana-de-açúcar, que a operação de sulcação para o plantio, realizada até 0,30 m de profundidade, apresenta ação semelhante à das hastes dos subsoladores, possibilitando, assim, substituir a operação de preparo de solo. Desse modo, destaca-se a importância de novos estudos que avaliem a possibilidade de utilização do manejo com plantio direto (ausência de preparo) na cultura da cana-de-açúcar.

5. CONCLUSÕES

Nos dois solos avaliados, o preparo de solo com subsolagem na linha de plantio apresentou resultados semelhantes de resistência do solo à penetração e de produtividade da cana-de-açúcar, apresentando-se como alternativa para a substituição do manejo convencional com subsolagem em área total.

Os efeitos da operação de subsolagem não foram persistentes no decorrer do tempo, apresentando resultados, aos seis meses após o plantio, semelhantes aos verificados antes do preparo do solo, tanto no Latossolo Vermelho, quanto no Argissolo Amarelo.

6. REFERÊNCIAS

Abreu SL, Reichert JM, Reinert DJ (2004). Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em argissolo franco-arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 28(3), 519-531.

ASAE - American Society of Agricultural Engineers. **Terminology and definitions for agricultural tillage implements**. In: ASAE Standards 1997: Standards Engineering Practices Data, St. Joseph, 1997. p. 254-75.

Assis RL, Lazarini GD, Lanças KP, Cargnelutti A (2009). Avaliação da resistência do solo à penetração em diferentes solos com a variação do teor de água. **Engenharia Agrícola**, 29(4), 558-568.

Bavoso, MA, Silva, AP, Figueiredo, GC, Tormena, CA, Giarola, NF Balarezo (2012). Resiliência física de dois latossolos vermelhos sob plantio direto. **Revista Brasileira Ciência do Solo**. 36:1892-1904.

Bayer C, Martin-Neto L, Mielniczuk J, Pavinato A (2004). Armazenamento de carbono em frações lábeis da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, p. 677-683.

Bertol I, Schick J, Massariol JM, Reis EF (2000). Propriedades físicas de um cambissolo húmico álico afetadas pelo manejo do solo. **Ciência Rural**, 30:91-95.

Bicudo, SJ. **Subsolador: algumas relações entre profundidade de trabalho, largura das sapatas e número de hastes** (tese). Jaboticabal: Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - Universidade Estadual Paulista; 1990.

Blanco H, Lal R (2010). Soil resilience and conservation. In: Blanco, H. & Lal, R., editor. Principles of soil conservation and management. **Springer Science Business Media**, p.15-33.

Bonnin JJ, Mirás-Avalos, JM, Lanças KP, González AP, Vieira SR (2010). Spatial variability of soil penetration resistance. **Bragantia**, v. 69, p. 163-173.

Bordonal RO, Carvalho JLN, Lal R, Figueiredo EB, Oliveira BG, Scala Júnior NL (2018). Sustainability of sugarcane production in Brazil. A review. **Agron Sustain**, 38:13.

Busscher WJ, Bauer PJ, Frederick JR (2002). Recompaction of a coastal loamy sand after deep tillage as a function of subsequent cumulative rainfall. **Soil Till Res**, 68:49–57.

Busscher, WJ. et al (1997). Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil. **Soil Tillage Research**, v.43, n.3-4, p.205-217.

Camargo O, Alleoni LRF (1997). Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas. Piracicaba: ESALQ, 132 p.

Camilotti F, Andrioli I, Dias LF, Casagrande A, Silva AR, Mutton MA, Centurion JF (2005). Efeito prolongado de sistemas de preparo do solo com e sem cultivo de soqueira de cana crua em algumas propriedades físicas do solo. **Engenharia Agrícola**, 25(1), 189-198.

Carvalho LA et al., (2011) Produtividade e viabilidade econômica da cana-de-açúcar em diferentes sistemas de preparo do solo no centro-oeste do Brasil. **Revista de Ciências Agrárias**, 34(1), 199-211.

Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada – CEPEA. **PIB do agronegócio brasileiro**, Piracicaba, SP: 2018. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx>.

Chig LA, Oliveira EF, Crestani AB (2014) Zonas de manejo da compactação do solo. **Uniciências**, v. 18, n. 2, p. 85-90, 2014.

Claessen MEC (1997). **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 212 p.

Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar. Safra 2018/19 - Segundo levantamento**. Brasília, DF: 2018. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>.

Cortez JW, Olszewski N, Pimenta WA, Patrocínio AP, Souza EB, Nagahama H (2014). Avaliação da intensidade de tráfego de tratores em alguns atributos físicos de um argissolo amarelo. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, 38:1000-1010.

Cortez, LA. **Subsolagem em profundidade variada com base no mapeamento de áreas de manejo específico** (dissertação). Jaboticabal: Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - Universidade Estadual Paulista; 2013.

Crusciol CAC, Silva MA, Rossetto R, Soratto RP. **Tópicos em ecofisiologia da cana-de-açúcar**. Botucatu: FEPAF; 2010. 111 p.

Cunha JPAR, Vieira LB, Magalhães AC (2002). Resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes densidades e teores de água. **Engenharia na Agricultura**, v.10, n.1-4, p.1-7, 2002.

Denardin JE, Kochhann RA, Faganello A (2011). 15 de abril dia nacional da conservação do solo: a agricultura desenvolvida no Brasil é conservacionista ou não? **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p.10-15.

Drescher MS, Reinert DJ, Denardin JE, Gubiani PI, Faganello A, Drescher GL (2016). Duração das alterações em propriedades físico-hídricas de Latossolo argiloso decorrentes da escarificação mecânica. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, 51:159-168.

Drescher, M.S. **Estratégias para descompactação do solo por escarificação e hastes sulcadoras em sistema plantio direto**. 2015.118 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

Drescher, MS et al. (2011). Persistência do efeito de intervenções mecânicas para a descompactação de solos sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 5, p. 1713-1722.

Drescher, MS et al. (2012). Resistência à penetração e rendimento da soja após intervenção mecânica em Latossolo vermelho sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 6, p. 1836-1844.

Duarte Junior JB, Coelho, FCA (2008). Cana-de-açúcar em sistema de plantio direto comparado ao sistema convencional com e sem adubação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 6, p. 576-583.

Food and Agriculture Organization of the United Nations – FAO. **Food Outlook Biannual report on global food markets**. Roma: 2018. Disponível em: <http://www.fao.org/3/ca0239en/CA0239EN.pdf>.

Freddi OS et al. (2006). Produtividade do milho relacionada com a resistência mecânica à penetração do solo sob preparo convencional. **Engenharia Agrícola**, v. 26, n. 1, p. 113-121.

Furlani CEA, Gamero CA, Levien R, Lopes A. Resistência do solo à penetração em preparo convencional, escarificação e semeadura direta em diferentes manejos da cobertura vegetal. **Engenharia Agrícola**, v.23, n.3, p.579-587.

Gomes AS, Peña YA (1996) Caracterização da compactação através do uso do penetrômetro. **Lavoura Arrozeira**, v.49, n.1, p.18-20, 1996.

Hamilton-Manns M et al. (2002). Subsoil loosening does little to enhance the transition to no-tillage on a structurally degrade soil. **Soil and Tillage Research**, v. 68, p. 109-119.

Hamza MA, Anderson WK (2005). Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil and Tillage Research**, v. 82, n. 2, p. 121-145.

Hunt D (1995). Farm power and machinery management. **Ed. Ames: Iowa State University Press**, 363 p.

IAC – Instituto Agronômico de Campinas (2014). **Solos do Estado de São Paulo**. São Paulo: Secretaria de Agricultura e Abastecimento. Disponível em: <http://www.iac.sp.gov.br/solosp/> Acesso em: 15 jan. 2019.

IAC – Instituto Agronômico de Campinas (2016). **Recomendações gerais para a conservação do solo na cultura da cana-de-açúcar**. Campinas: IAC, 75 p. (Boletim Técnico IAC, 1).

laia AM, Maia JCS, Kim ME (2006). Uso do penetrômetro eletrônico na avaliação da resistência do solo cultivado com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 2, p. 523-530.

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT. **Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo**. São Paulo, 1981, p. 94.

Klute A (1982). Tillage effects on the hydraulic properties of soil: a review. In: Van Doren DM, Allmaras, RR, Linden DR, Whisler FD. Predicting tillage effects on soil physical properties and processes. **Madison: ASA**, cap.3, p.29-43.

Lanças, K.P (2000). Diagnóstico e controle localizado da compactação do solo. In: V Congresso internacional do agronegócio do algodão/seminário estadual da cultura do algodão. Cuiabá, **Anais...** : Fundação de Apoio à Pesquisa Agropecuária de Mato Grosso, p.25-32.

Lanças, KP. **Subsolador: desempenho em função de formas geométricas de hastes, tipos de ponteiros e número de hastes** (tese). Botucatu: Faculdade de Ciências Agrárias - Universidade Estadual Paulista; 1988.

Lepsch IF (2010). **Formação e conservação dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 216 p.

Lima CLR, Reinert DJ, Reichert JM, Suzuki LEAS (2010). Produtividade de culturas e resistência à penetração de Argissolo Vermelho sob diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 45(1), 89-98.

Lima RP, Leon MJ, Silva AR (2013). Compactação do solo de diferentes classes texturais em áreas de produção de cana-de-açúcar. **Revista Ceres**, v.60, p.16- 20.

Marasca IL, Silva SV, Guerra RB, Sebastião SP, Lanças KP (2015). Soil Compaction Curve of an Oxisol Under Sugarcane Planted After In-row Deep Tillage. **Revista Brasileira Ciência do Solo**. 39:1490-1497.

Marasca, I. **Avaliação dos atributos físicos de um argissolo cultivado com cana-de-açúcar em área com adequação de relevo, utilizando equipamento de preparo**

profundo e canteirizado do solo. 2014. 76 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2014.

Marcari, MA. **Perdas de solo, água e nutrientes em três sistemas de preparo de solo em cana-de-açúcar** (tcc). Ribeirão Preto: Centro Universitário Moura Lacerda; 2010.

Marin FR (2017). **Árvore do Conhecimento: cana-de-açúcar. Solos do Brasil e a cana-de-açúcar.** Agência Embrapa de Informação Tecnológica. Brasília: Embrapa: Brasília. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_18_3112006152934.html>. Acesso em: 22 fev. 2019.

Mazaron BH. **Crescimento da cana-de-açúcar em superfícies irrigadas, com diferentes exposições e declividades.** 2013. 55 f. (Dissertação). Jaboticabal: Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - Universidade Estadual Paulista, 2013.

Melo NC, Fernandes C, Soares ER, Coutinho ELM (2019). Growth and Productivity of Sugarcane Cultivated in Soils Submitted to Chiseling in the Planting Row and in Total Area. **Journal of Agricultural Science**; Vol. 11, No. 1.

Melo NC. **Atributos físicos do solo, crescimento e produtividade de cana-de-açúcar em solos submetidos à escarificação.** (tese). 2018. Jaboticabal: Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - Universidade Estadual Paulista; 2018.

Mendonça, JC et al. (2011). Mapeamento das áreas de cana-de-açúcar na região norte fluminense - RJ por uso de técnicas de sensoriamento remoto. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 3.

Miransari M et al. (2009). Effects of soil compaction and arbuscular mycorrhiza on corn (*Zea mays* L.) nutrient uptake. **Soil and Tillage Research**, v. 103, p. 282–290.

Monteiro, MAC, Zoz A, Limede AC, Oliveira CES, Zoz T (2017). Efeito do preparo do solo com diferentes implementos sobre a resistência do solo à penetração. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 4, n. 2, p. 63-68.

Nagahama HJ, Granja GP, Cortez JW, Ramos RL, Arcoverde SNS (2016) Efeitos da escarificação mecânica nos atributos físicos do solo e agrônômicos do capim elefante. **Revista Ceres** 63:741–746.

Otto, R. **Desenvolvimento radicular e produtividade da cana-de-açúcar relacionados à mineralização do N do solo e à adubação nitrogenada**. 2012. 118 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição De Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

Peluco RG, Marques Junior J, Siqueira DS, Pereira GT, Barbosa RS, Teixeira DB, Adame CR, Cortez LA (2013). Suscetibilidade magnética do solo e estimação da capacidade de suporte à aplicação de vinhaça. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. 48:661-672.

Perecin D, Ferraudo GM, Azania CAM, Schiavetto AR (2015). Statistical analysis for correlated paired-plot designs. **American Journal of Experimental Agriculture**. 9:1-7.

Perecin D. **Experimetação com cana-de-açúcar**. In: Miranda D, Vasconcelos ACM, Landell MGA (Eds.). *Cana-de-açúcar*. Campinas: Instituto Agrônômico de Campinas; 2008. p. 809-819.

Pinheiro DP. **Indicadores de qualidade de Argissolo submetido à escarificação em área mecanizada de cana-de-açúcar** (tese). Jaboticabal: Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - Universidade Estadual Paulista; 2018.

Prado H et al. **Solos e ambientes de produção: cana-de-açúcar**. Campinas: Intituto Agrônômico, 2008. p.179-204.

Pringle MJ, Lark RM (2007). Scale and location-dependent correlations of soil strength and the yield of wheat. **Soil and Tillage Research**, v.95, p.47-60.

Reichert JM et al. (2009). Variação temporal de propriedades físicas do solo e crescimento radicular de feijoeiro em quatro sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, n. 3, p. 310-319.

Reichert JM, Brandt AA, Rodrigues MF, da Veiga M, Reinert DJ (2017). Is chiseling or inverting tillage required to improve mechanical and hydraulic properties of sandy clayloam soil under long-term no-tillage? **Geoderma**. 301:72-79.

Reichert, J. M.; Kaiser, D. R.; Reinert, D. J.; Riquelme, F. B (2009). Variação temporal de propriedades físicas do solo e crescimento radicular de feijoeiro em quatro sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, n. 3, p. 310-319.

Rosa, D.P. **Comportamento dinâmico e mecânico do solo sob níveis diferenciados de escarificação e compactação**. 2007. 112 f. Dissertação. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

Rossini DB. **Resistência mecânica à penetração em latossolo vermelho após sucessivos cortes mecanizados de cana-de-açúcar**. 2014. 69 f. (Dissertação). Jaboticabal: Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - Universidade Estadual Paulista, 2014.

Sá MAC, Santos Júnior JDG, Franz CAB, Rein TA (2016). Qualidade física do solo e produtividade da cana-de-açúcar com uso da escarificação entre linhas de plantio. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, 51:1610-1622.

Santos HG, Jacomine, PKT, Anjos, LHC dos, Oliveira, VA de, Lumberras, JF, Coelho, MR, Almeida JA, Cunha TJF, Oliveira JB de (Eds.). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: EMBRAPA; 2018. 353p.

Schaffrath VR, Gonçalves ACA, Sousa AJ, Tormena CA (2015). Spatial correlation between physical properties of soil and weeds in two management systems. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, 39:279-288.

Severiano EC et al. (2010) . Compactação de solos cultivados com cana-de-açúcar: I -modelagem e quantificação da compactação adicional após as operações de colheita. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 3.

Shi XH, Yang XM, Drury CF, Reynolds WD, Mclaughlin NB, Zhang XP (2012). Impact of ridge tillage on soil organic carbon and selected physical properties of a clay loam in southwestern Ontario. **Soil and Tillage Research**. 120:1-7.

Silva Junior CA,; Carvalho, LA, Centurion JF, Oliveira, ECA (2013). Comportamento da cana-de-açúcar em duas safras e atributos físicos do solo, sob diferentes tipos de preparo. **Bioscience Journal**, v. 29, n. 5, p. 1489- 1500.

Silva RB, Dias Júnior MS, Santos FL, Franz CAB (2004). Resistência ao cisalhamento de um Latossolo sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, n.1, p.165- 173.

Silva RP, Furlani CEA, Tavares TO, Voltarelli MA (2015). **Compactação do solo, escarificação e subsolagem**. Material didático. Jaboticabal – SP – brasil. Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

Silva SGC, Silva AP da, Giarola NFB, Tormena CA, Sá JCM (2012). Temporary effect of chiseling on the compaction of a Rhodic Hapludox under no-tillage. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, 36:547-555.

Silva, R.B, Dias Júnior MS, Santos, FL, Franz, CAB (2003). Influência do preparo inicial sobre a estrutura do solo quando da adoção do sistema plantio direto, avaliada por meio da pressão de preconsolidação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, n.6, p.961-971.

Soane B.D, Ouwerkerk CV (1994). Soil compaction problems in world agriculture. In: Soane B.D, Ouwerkerk CV. Soil compaction in crop production. **Elsevier**, 1994. p.1-21.

Souza, FCA. **Atributos físicos de solos submetidos à escarificação na linha de plantio e em área total para cultivo da cana-de-açúcar** (dissertação). Jaboticabal: Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - Universidade Estadual Paulista; 2016.

Souza, LC. **Emissão de CO₂ do solo associada à escarificação em latossolo e em argissolo** (Tese). Jaboticabal: Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - Universidade Estadual Paulista; 2017.

Souza, LC. Fernandes, C, Nogueira, DCS, Moitinho, MR, Bicalho ES, La Scala, N. (2017). Can Partial Cultivation of Only The Sugarcane Row Reduce Carbon Dioxide Emissions in an Oxisol and Ultisol? **Agronomy Journal**, 109:1113-1121.

Staut, L.A. **Condições dos solos para o cultivo de cana-de-açúcar**. 2006. Artigo em **Hypertexto**. Disponível em: http://www.infobibos.com/Artigos/2006_2/CanaSolo/index.htm. Acesso em: 24/3/2019.

Strudley MW, Green TR, Ascough JC (2008). Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: state of the science. **Soil and Tillage Research**, v.99, p.4-48.

Suzuki LEAS, Reichert JM, Reinert DJ, Lima CLR (2007). Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.42, p.1159-1167.

Tavares Filho J, Ribon AA (2008). Resistência do solo à penetração em resposta ao número de amostras e tipo de amostragem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, n.2, p. 487-494.

Tavares, OCH; Lima, E, Zonta (2010). Crescimento e produtividade da cana planta cultivada em diferentes sistemas de preparo do solo e de colheita. **Acta Scientiarum. Agronomy**, 32:61-68.

Tim Chamen, WC, Moxey, AP, Towers, W, Balana, B, Hallett, PD (2015). Mitigating arable soil compaction: a review and analysis of available cost and benefit data. **Soil Tillage Research**.146:10-25.

Toledo A et al (2010). Comportamento espacial da demanda energética em semeadura de amendoim em latossolo sob preparo convencional. **Engenharia Agrícola**, v. 12, n. 30, p. 459-467.

Tormena, CA, Roloff, G, SA, JCM (1998). Propriedades físicas do solo sob plantio direto, influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. **Revista Brasileira Ciência do Solo**. 22:301-309.

Trentin, R. et al (2011). Transpiração e temperatura foliar da cana-de-açúcar sob diferentes valores de potencial matricial. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 6.

Veiga, M et al. (2008). Short and long-term effects of tillage systems and nutrient sources on soil physical properties of a Southern Brazilian Hapludox. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 4, p. 1437-1446.

Vitti GC, Mazza JA. (2002). Planejamento, estratégias de manejo e nutrição da cultura de cana-de-açúcar. **Informações Agronomicas**, 97: 1-16.