

Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"

Avaliação do sistema radicular da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) sob diferentes
quantidades de palha mantidas na superfície do solo

Paul Lineker Amaral de Melo

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Solos e
Nutrição de Plantas

Piracicaba
2017

Paul Lineker Amaral de Melo
Engenheiro Agrônomo

**Avaliação do sistema radicular da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) sob diferentes
quantidades de palha mantidas na superfície do solo**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:

Prof. Dr. **CARLOS EDUARDO PELLEGRINO CERRI**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Solos e
Nutrição de Plantas

Piracicaba
2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Melo, Paul Lineker Amaral de

Avaliação do sistema radicular da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) sob diferentes quantidades de palha mantidas na superfície do solo / Paul Lineker Amaral de Melo. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2017.

77 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Enraizamento 2. Cana crua 3. Manejo da palhada 4. Bioenergia I.
Título

AGRADECIMENTOS

Agradecer a Deus acima de tudo pela graça divina, por todas as bênçãos a mim concebidas e por ser sempre ser minha luz.

À Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (USP-ESALQ) e ao programa de Solos e Nutrição de Plantas por todas as oportunidades e caminhos que segui, importantes para meu crescimento profissional assim como pessoal.

Ao meu orientador Prof. Dr. Carlos Eduardo Pellegrino Cerri por sempre estar disposto a ouvir meus questionamentos e ideias, e conseguir encaminhar de maneira profissional toda sua orientação;

Ao Prof. Dr. Carlos Clemente Cerri (*In memoriam*) e a Prof. Dr. Brigitte J. Feigl por todas suas contribuições acadêmicas;

À Tâmara Cláudia de Araújo Gomes, para sempre minha mãe postiça, mãe acadêmica ou simplesmente mãe. Não há palavras para que eu possa agradecer à sua paciência, presteza e amizade durante todo meu período de pós e fora dele também;

Aos pós doutorandos Maurício Cherubin e Marcos Siqueira Neto por toda suas contribuições e disponibilidade;

A todos os meus professores do programa de Solos e Nutrição de Plantas por todo o conhecimento repassado e adquirido durante esses 2 anos de curso;

À minha mãe Elenilda Amaral Costa Melo e ao meu pai Benício José de Araujo Melo por tudo o que me representam, pelo meu porto seguro, por todo o apoio, crença e motivação. Vocês são tudo em minha vida;

Aos meus amigos alagoanos, minha família presente aqui em Piracicaba: Ana Paula, Arthur Belarmino, Geovanny Barroso, Lígia Broglio e Yane Caroline que sempre representam tão bem nosso estado e nossa universidade;

Aos estrangeiros mais brasileiros que eu conheci Camilo (COL) e Valentin (FRA) meu muito obrigado por ter conhecido pessoas especiais como vocês.

Aos amigos do LBA: Ana Luisa, Arthur Belarmino, Gustavo Popin, Henrique Guerra, Izafas Lisboa, Laisa Pimentel, Letícia Varanda, Lucas Satiro, Maria Regina, Maristela Moraes, Náissa e Silvia Paiva, por todo o companherismo e convívio diário. Foi uma excelente experiência conhecê-los e tê-los como vizinhos de mesa/sala;

A todos os técnicos de laboratório e funcionários: Dagmar, José, Lílian, Margato, Ralf e Sandra que participaram ativamente nesse período, colaborando de diversas maneiras na execução desse trabalho;

Aos estagiários: Chico, Guilherme, Lana, Marcela, Mayara Icardi, Paulo Bosco e William por todo o apoio sempre que solicitado;

Ao Felipe Nitsu (Raízen) por toda sua disponibilidade e presteza no planejamento da implementação do experimento e organização do apoio às coletas;

À DeltaCO2 pela participação de parte das avaliações do experimento;

Ao BNDES e Raízen pelo financiamento do projeto SISPALHA, no qual esse estudo faz parte;

Ao CNPq pelo financiamento da bolsa;

A todos aqueles que contribuíram de maneira especial nesse estudo e participaram do meu crescimento meu mais sincero agradecimento.

EPÍGRAFE

“Há apenas uma maneira de evitar críticas:

não faça nada,

não diga nada,

e não seja nada”

(Aristóteles)

SUMÁRIO

RESUMO.....	7
ABSTRACT.....	8
LISTA DE FIGURAS.....	9
LISTA DE TABELAS.....	10
1. INTRODUÇÃO.....	11
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1 A CULTURA DA CANA DE AÇÚCAR.....	15
2.2 PLANTA DA CANA-DE-AÇÚCAR.....	18
2.3 SISTEMA RADICULAR DA CANA DE AÇÚCAR.....	20
2.4 FATORES QUE AFETAM O DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA RADICULAR.....	22
2.5 AVALIAÇÃO DO SISTEMA RADICULAR.....	24
2.5.1 Influência da palha no sistema radicular.....	26
3. HIPÓTESE.....	29
4. OBJETIVO GERAL.....	31
4.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	31
5. MATERIAL E MÉTODOS.....	33
5.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL.....	33
5.2 DEPOSIÇÃO DA PALHA.....	36
5.3 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL.....	37
5.4 AMOSTRAGEM DAS RAÍZES.....	37
5.5 ANÁLISES FÍSICAS DO SOLO.....	40
5.6 QUANTIFICAÇÃO DA BIOMASSA DA PARTE AÉREA E DO RENDIMENTO DE COLMOS.....	41
5.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	41
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43
6.1 ESPACIALIZAÇÃO DO SISTEMA RADICULAR NO PERFIL DO SOLO.....	43
6.2 DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL HORIZONTAL DAS RAÍZES NA LINHA E ENTRELINHA DE CULTIVO.....	51
6.3 RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO (ENTRELINHAS DE 0,90M E 1,50M).....	54
6.4 RELAÇÕES ENTRE SISTEMA RADICULAR E PARTE ÁREA DA CANA-DE-AÇUCAR.....	58
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	63
REFERÊNCIAS.....	65
APÊNDICES.....	77

RESUMO

Avaliação do sistema radicular da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) sob diferentes quantidades de palha mantidas na superfície do solo

A colheita mecanizada da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.* L.) deposita grande quantidade de palha sobre o solo, a qual é considerada uma excelente opção de matéria-prima lignocelulósica para a geração de energia. A quantidade de palha de cana-de-açúcar a ser retirada do campo e os impactos dessa prática no solo e no crescimento das plantas ainda não estão definidas. Assim, o objetivo desse estudo foi de avaliar os efeitos da remoção da palha de cana-de-açúcar do campo para fins energéticos na massa e arquitetura do sistema radicular e, sua relação com a produtividade da cultura. O experimento foi realizado no município de Capivarí (SP), utilizando a variedade CTC14, em um Latossolo Vermelho Distrófico típico, de textura média. Os tratamentos representaram quantidades crescentes de palhada mantidas sobre a superfície do solo, provenientes da colheita mecanizada, sendo esses: 0 Mg ha⁻¹ (remoção de 100% da palhada); 4,2 Mg ha⁻¹ (75% de remoção); 8,7 Mg ha⁻¹ (50% de remoção) e 18,9 Mg ha⁻¹ (sem remoção). As avaliações estimaram a distribuição (arquitetura) vertical do sistema radicular no perfil do solo, e a massa de raízes e sua distribuição horizontal na área. As amostras foram coletadas nas profundidades de 0-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm e 60-80 cm utilizando cavadores manuais. A densidade do solo foi determinada com amostras indeformadas de solo e a resistência à penetração por meio de penetrômetro de impacto. Os efeitos das diferentes quantidades de palha sobre o sistema radicular e sobre variáveis do solo foram avaliados por meio de análise de regressão, análise de correlação de Pearson, ANOVA e teste médias. A manutenção da palha diminui a resistência à penetração (RP) possivelmente devido à manutenção da umidade do solo. Altas quantidades de palha (18,9 Mg ha⁻¹) diminuíram a densidade radicular e a produtividade final da cana-de-açúcar. Mesmo que de forma discreta, a manutenção da palha de cana-de-açúcar sobre o solo é capaz de alterar a distribuição do sistema radicular e se apresenta como um importante fator para a redução da densidade do solo e da resistência à penetração, sendo uma estratégia viável para o sistema radicular e, conseqüentemente, na produtividade final. Quantidades intermediárias de palha sobre o solo (dentre as mantidas neste estudo) aparenta ser a melhor alternativa para utilização da biomassa da cana-de-açúcar, empregando seu excedente para a produção de energia.

Palavras-chave: Enraizamento; Cana crua; Manejo da palhada; Bioenergia

ABSTRACT

Evaluation of the root system of sugarcane (*Saccharum spp.*) under different amounts of straw retained on the soil surface

The mechanized harvest of sugarcane (*Saccharum spp. L.*) deposits a large amount of straw on the soil, which is considered an excellent choice of lignocellulosic raw material for the generation of energy. The amount of sugarcane straw to be removed from the field and the impacts of this practice on soil and plant growth are not yet defined. Thus, the aim of this study was to evaluate the effects of sugarcane straw removal from the field for energetic purposes in the mass and architecture of the root system and your relation with crop productivity. The experiment was conducted in Capivarí (SP), using the variety CTC14, in a sandy clay loam soil. The soil type of experimental area was a Rhodic Kandiudox (USDA Soil Taxonomy). The treatments represented increasing amounts of straw kept on the soil surface, from the mechanized harvest, being: 0 Mg ha⁻¹ (removal of 100% of the straw); 4.2 Mg ha⁻¹ (75% removal); 8.7 Mg ha⁻¹ (50% removal) and 18.9 Mg ha⁻¹ (without removal). The evaluations estimated the vertical distribution (architecture) of the root system in the soil profile, and the root mass and its horizontal distribution in the area. Samples were collected at depths of 0-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm and 60-80 cm using manual diggers. Soil density was determined with undisturbed soil samples and resistance to penetration by means of an impact penetrometer. The effects of the different amounts of straw on the root system and on soil variables were evaluated by means of regression analysis, Pearson correlation analysis, ANOVA and mean test. Straw maintenance reduces penetration resistance (PR) possibly due to the maintenance of soil moisture. High amounts of straw (18.9 Mg ha⁻¹) decreased the root density and final yield of sugarcane. Even though in a discrete manner, the maintenance of sugarcane straw on the soil is capable of altering the distribution of the root system and is an important factor for the reduction of soil density and resistance to penetration. feasible strategy for the root system and, consequently, the final productivity. Intermediate amounts of straw over the soil (among those maintained in this study) appear to be the best alternative for the use of sugarcane biomass, using its surplus for the production of energy.

Keywords: Rooting; Green cane; Management of straw; Bioenergy

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Sistema radicular da cana-de-açúcar mostrando os três tipos de raízes: raízes superficiais, raízes de fixação e raízes cordão. Adaptado de Smith et al (2005). 21
- Figura 2.** Caracterização climática durante o período de estudo (A) e balanço hídrico (B) na área de Capivarí, Usina Bom Retiro, nos anos de 2014 e 2015 durante a primeira soqueira da cana-de-açúcar. 34
- Figura 3.** Sequência de manejo na área experimental onde, M0: reforma do canavial (jan/2013), M1: colheita da cana planta (ago/2014), M2: colheita de cana soca (dez/2015). 35
- Figura 4.** Croqui da área, demonstrando a aleatorização dos tratamentos no campo. 37
- Figura 5.** Métodos de amostragem através da escavação do perfil do solo com a utilização de cavadores manuais..... 38
- Figura 6.** Estratégias de amostragem do sistema radicular da cana de açúcar; (A) distribuição (arquitetura) do sistema radicular e (B) massa de raízes por metro quadrado. 39
- Figura 7.** Esquema da localização dos pontos amostrados nas unidades experimentais para a densidade do solo (A) e resistência à penetração (B)..... 41
- Figura 8.** Massa de matéria seca de raízes de cana-de-açúcar para os nove pontos amostrados em que os pontos A, B e C representam às distâncias 0,75 m, 0,45 m e 0,15 m entre linhas duplas e os pontos D e E às distâncias 0,15 m e 0,45 m, respectivamente, dentro das linhas duplas para a variedade CTC14, onde (A) 0 Mg ha⁻¹, (B) 4,2 Mg ha⁻¹, (C) 8,7 Mg ha⁻¹, (D) 18,9 Mg ha⁻¹ (médias de 4 repetições e barras com erro padrão da média). 45
- Figura 9.** Espacialização em 2D (perfil) do sistema radicular da cana-de-açúcar no perfil do solo sob diferentes quantidades de palha mantidas sobre a superfície do solo onde: (A) 0 Mg ha⁻¹, (B) 4,2 Mg ha⁻¹, (C) 8,7 Mg ha⁻¹, (D) 18,9 Mg ha⁻¹. 47
- Figura 10.** Produtividade de massa de matéria seca de raízes de cana-de-açúcar (kg ha⁻¹) por profundidade, função da quantidade de palha removida da superfície do solo (média de quatro repetições). 48
- Figura 11.** Massa de matéria seca de raízes de cana-de-açúcar (kg ha⁻¹) por tratamento (quantidade de palha deixada sobre o um Latossolo Vermelho Distrófico típico), em função da profundidade do perfil (média de quatro repetições) **Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F. 49
- Figura 12.** Percentagem de raízes de cana-de-açúcar (variedade CTC14) no perfil do solo (cm). 50
- Figura 13.** Distribuição espacial da densidade de raízes entre as linhas de plantio de cana-de-açúcar em que à esquerda da linha de plantio se encontra a entrelinha de 0,90 m e à direita a entrelinha de 1,50 m. 52
- Figura 14.** Resistência do solo à penetração em profundidade para os tratamentos com 0 Mg ha⁻¹, 4,2 Mg ha⁻¹, 8,7 Mg ha⁻¹, 18,9 Mg ha⁻¹ de palha mantida dentro (A) e entre as linhas duplas (B) da cana-de-açúcar e teor de água do solo (C). As linhas horizontais indicam a diferença mínima significativa a 10% de probabilidade pelo teste tukey, e comparam médias dos tratamentos em cada camada. ^{ns}Não-significativo. *Significativo. 55
- Figura 15.** Curvas de regressão para as variáveis densidade de raízes e resistência à penetração para a camada 0-20 cm dentro e entre linhas duplas (A e B, respectivamente) e a camada 20-40 cm dentro e entre linhas duplas (C e D, respectivamente) por tratamento em um Latossolo Vermelho Distrófico típico (média de três repetições).. 57
- Figura 16.** Curvas de regressão ajustadas para a produtividade de massa de matéria seca de raízes e a massa fresca de colmos obtida ao final do ciclo da cana-de-açúcar de primeira soqueira (variedade CTC14), cultivada em função de diferentes quantidades de palha removida..... 60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Produção efetiva, potencial de demanda e déficit de etanol estimado (Bilhões/Litro) no Brasil.	16
Tabela 2. Características químicas do solo da área experimental no momento de instalação do experimento (Usina Bom Retiro, Capivarí, SP, setembro de 2014)	35
Tabela 3. Características físicas do solo da área experimental em primeira soqueira de cana-de-açúcar (Usina Bom Retiro, Capivarí, SP, dezembro de 2015).....	36
Tabela 4. Processo de deposição e quantificação da massa de palha sobre a superfície do solo (Usina Bom Retiro, Capivarí, SP, setembro de 2014).....	36
Tabela 5. Massa de matéria seca de raízes, parte aérea e relação raiz/parte aérea (RA/PA – massa de matéria seca da raiz/massa de matéria seca da parte aérea) de plantas de cana-de-açúcar sob diferentes quantidades de palha sobre o solo	62

1. INTRODUÇÃO

Cultivada em grandes extensões do território brasileiro, a cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) é considerada uma das principais culturas para a economia brasileira, ocupando cerca de 9 Mha e sendo responsável por mais de 17% das exportações nacionais (IBGE, 2017). Em relação à safra anterior, a área de cana-de-açúcar cresceu 5% na safra 2016/17 e a produção 4%, contudo, a produtividade do período recuou 1%. A expansão de cultivo da cana-de-açúcar e sua utilização para produção de biocombustível tem provocado preocupação com relação aos impactos que sua exploração possa causar na segurança alimentar e a sustentabilidade do ambiente agrícola.

A busca por fontes de energias renováveis tem sido impulsionada principalmente devido ao esgotamento das jazidas petrolíferas (recurso não-renovável) e, conseqüentemente, a elevação do preço do petróleo. Além da geração de energia, Leal e Walter (2010) afirmam que há uma redução de emissões de gases causadores do efeito estufa (GEE), assim como manutenção do emprego rural também são pontos chave relacionados à produção de biocombustíveis, tornando as fontes alternativas de produção, como a cana-de-açúcar, uma excelente possibilidade para geração de biocombustíveis.

Segundo o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDEE, 2015) até 2024 aproximadamente 45% da oferta interna de energia será resultante de fontes renováveis. Desse montante, 17% serão obtidos de derivados da cana-de-açúcar, fazendo desta a opção mais viável a fim de promover redução das emissões dos gases causadores do efeito estufa. Boa parte das emissões de GEE no país ainda decorre da agropecuária e geração de energia (queima de carvão, gás natural e petróleo) (IPCC, 2014; MCTI, 2016), indicando a crescente importância da adoção de práticas que visem à redução da emissão dos GEE e a manutenção de ambientes sustentáveis para a agricultura (Sá et al., 2017).

No caso da produção da cana-de-açúcar, a adoção do sistema de colheita mecanizada, que não necessita da queima prévia do canavial para a colheita; as folhas, bainhas, ponteiros, além de partes de colmo são depositados na superfície do solo, formando uma cobertura de resíduos vegetais denominado de palha ou palhada (Souza et al., 2005). No Estado de São Paulo, a colheita mecanizada de cana-de-açúcar atingiu 91,3% das áreas na safra 2015/16 (Cenário Agro, 2016) e, de modo geral, em cada colheita, entre 7,0 e 21 Mg ha⁻¹ de matéria seca de palha é depositado na superfície do solo (Leal et al., 2013).

Segundo Souza et al. (2005) a longevidade do canavial pode ser afetada devido ao sistema de colheita usado, tendo o manejo da cana crua, com colheita mecanizada e

consequente deposição de palha, proporcionado melhoria em atributos físicos do solo e aumento no potencial produtivo da cana-de-açúcar.

Por possuir elevados teores de materiais lignocelulósicos, essa biomassa é considerada uma matéria-prima sustentável capaz de atender a demanda em energia (Dias et al, 2009; Santos et al., 2014), reduzindo ainda mais a pressão sobre a mudança de uso da terra e, desta forma, sem competir em áreas para produção de alimentos (Canilha et al., 2012).

Áreas cultivadas com cana-de-açúcar são naturalmente utilizadas de forma intensiva, com a utilização de implementos e máquinas agrícolas. Esse uso intensivo da mecanização pode prejudicar os atributos físicos do solo, aumentando a densidade e reduzindo a porosidade do solo, além de aumentar a resistência à penetração (Otto et al., 2011; Couto et al, 2012; Marasca et al, 2015), provocando limitação do crescimento radicular.

A manutenção da palha sobre o solo pode apresentar pontos positivos, assim como negativos, devido à interação do solo, planta e atmosfera (Blanco-Canqui e Lal, 2007; Galdos et al, 2010; Carvalho et al, 2013; Cherubin et al, 2016). Para o sistema radicular, por exemplo, a distribuição espacial de raízes no solo varia de acordo com as condições climáticas, tipo de solo, umidade e temperatura do solo, variedades, entre outros (Korndörfer et al, 1989; Dourado Neto et al, 1999; Costa et al, 2007, Aquino et al, 2015).

De modo geral, a palha afeta atributos do solo (químicos, físicos e biológicos) e isso pode resultar em alterações no crescimento e produtividade das plantas. A adição de resíduos culturais promove a entrada de C no solo, afetando os teores de MOS, além do aumento na atividade biológica, e isso tem um efeito positivo sobre a agregação e a macroporosidade do solo (Herencia et al., 2011; Souza et al, 2012; Arthur et al., 2013) e por consequência no crescimento das plantas. A retirada da palha da mesma forma, pode favorecer a compactação do solo pelo tráfego de máquinas e isso afeta diretamente o crescimento radicular (Otto et al., 2011; Souza et al., 2015). Além de ser responsável pelo fornecimento de nutrientes, a palha da cana-de-açúcar também pode promover um microclima favorável no que diz respeito à umidade e temperatura do solo, melhorando a capacidade de retenção de água no solo (Aquino et al., 2015; Awe et al. 2015).

Há, no entanto, a possibilidade de que o acúmulo de palha venha proporcionar efeito deletério no sistema radicular através da liberação de substâncias aleloquímicas pela palha (Viator et al., 2006), ou mesmo, por manter um ambiente favorável à proliferação de pragas que atacam o sistema radicular e/ou parte aérea da cana-de-açúcar (Dinardo-Miranda e Fracasso, 2013). Todos esses fatores, portanto, indicam que pode haver um limite para tal

prática, que poderá auxiliar na determinação do percentual da palha a ser deixado sobre o solo de modo que não venha a afetar negativamente o desenvolvimento radicular das plantas.

Os estudos que avaliam o desenvolvimento das plantas, em especial o sistema radicular, são importantes ferramentas para o diagnóstico do impacto do manejo que buscam a otimização da produção agrícola (Neumann and Romheld, 1999; Li et al., 2008; Gao et al., 2014).

Neste sentido, o presente estudo parte da hipótese de que a presença da palha sobre a superfície do solo resultaria em alterações sobre as propriedades físicas e, junto com maior umidade do solo, refletiria em menor desenvolvimento do sistema radicular com maior concentração nas camadas mais superficiais do solo, afetando, conseqüentemente, na produtividade da cana-de-açúcar.

Assim, esse trabalho objetivou: 1. avaliar os efeitos da remoção da palha resultante da colheita da cana de açúcar sem queima, sobre a arquitetura e massa de seu sistema radicular e a relação com sua produtividade; 2. gerar subsídios que permitam a definição da quantidade mínima de palha deixada sobre a superfície do solo, que ao mesmo tempo, favoreçam o desenvolvimento radicular e produtivo da cana-de-açúcar.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A cultura da Cana de Açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) apesar de também ser cultivada em países sob condições temperadas e subtropicais, é considerada essencialmente como uma cultura de clima tropical. Desenvolve-se no mundo entre a latitude 36.7° N e 31.0° S, ao nível do mar ou até altitudes superiores a 1000 m (Rodrigues, 1995). Tem sua origem em Nova Guiné, ilha que integra dois continentes, a Ásia e a Oceania e é cultivada por cerca de 100 países, ocupando uma área de 26 milhões de hectares (FAO, 2014).

O Brasil é o maior produtor e exportador de cana-de-açúcar do mundo, com produção de cana-de-açúcar estimada para a safra 2017/18 de 647,6 milhões de toneladas, redução de 1,5% em relação à safra anterior. Para o etanol, na safra 2016/2017, o volume produzido ficou acima dos 30 bilhões de litros e estima-se que para a safra 2017/18 a produção de etanol seja de 26,45 bilhões de litros, com uma redução de 4,9%. Espera-se que a área plantada com cana de açúcar no Brasil na safra 2017/18 seja de 8,84 milhões hectares com uma produtividade estimada em aproximadamente 73 Mg ha⁻¹ (Conab, 2017).

Considerando os segmentos de insumos, atividades primárias, indústria e serviços, somente no ano de 2015 o setor sucroenergético foi responsável por mais de R\$ 110 bilhões agregado ao PIB do Brasil, além de impulsionar a geração de empregos, resultado que demonstra a significância do setor canavieiro para a economia do país (UNICA, 2016). A representatividade da cultura somente no estado de São Paulo ultrapassa os 50% do total de área produzida nacionalmente com uma produtividade estimada em 77 Mg ha⁻¹ para a safra 2017/2018.

O grande número de variedades de cana-de-açúcar obtidas através do melhoramento genético permite melhor aproveitamento do potencial produtivo da planta, para se alcançar maiores produtividades e garantir a rentabilidade da cultura, hoje, categorizada por região. O censo varietal de cana-de-açúcar realizado pelo IAC (2016) assinalou que a variedade RB 867515 é a mais difundida para a região Centro-Sul, apesar da perda de representatividade mediante a inserção de novas variedades. Essa categorização se dá através da análise de rendimento da planta avaliando algumas características como: exigência fertilidade do solo, maturação, colheita mecanizada, brotação de soca, brotação de soca com palha, florescimento, exigência à água, tolerância à seca, entre outras.

O uso da terra para as principais safras em 2024 (oleaginosas, grãos brutos, arroz, trigo, cana de açúcar e algodão), deve alcançar 69,4 milhões de hectares, destes, a expansão é principalmente impulsionada pelo aumento esperado de 37% (em relação ao ano de 2000) na terra destinada para a produção de cana de açúcar. Além disso, a utilização da cana de açúcar para a produção de etanol crescerá em torno de 532 Mt em 2024, superior a 60%, refletindo na redução de cana de açúcar destinada à produção de açúcar de 47% para 40% (OECD/FAO, 2015).

A rápida expansão do setor sucroenergético baseado na concentração de recursos e investimentos nas plantações e nas usinas provocou mudança de perfil do setor brasileiro da cana-de-açúcar mediante a crise financeira global. A utilização do bagaço e da palha da cana-de-açúcar para a produção de etanol é considerada alternativa viável para solucionar problemas de produtividade agrícola e menor demanda de terra, além de não ser necessário utilizar culturas alimentares para produção do etanol, críticas comumente direcionadas aos EUA e países da Europa que fazem uso desse meio para obtenção do combustível (ActionAid, 2015).

No entanto, a produção efetiva total de etanol no Brasil parece não acompanhar a demanda energética. A produção acumulada durante o período de 2011-2015 foi de 154,9 bilhões de litros com uma demanda potencial de 187,3 bilhões de litros, representando um déficit de 32,4 bilhões de litros de etanol (Tabela 1).

Tabela 1. Produção efetiva, potencial de demanda e déficit de etanol estimado (Bilhões/Litro) no Brasil.

	2011	2012	2013	2014	2015	Resultado acumulado 2011-2015
Produção efetiva - amostra	10,3	12,8	15,6	17,0	18,2	73,8
Produção efetiva - restante	14,7	15,6	16,5	16,9	17,3	81,1
Produção efetiva total	25	28,4	32,1	33,9	35,5	154,9
Demanda potencial	28,2	32,5	36,8	42,3	47,5	187,3
Déficit	3,2	4,1	4,7	8,4	12,0	32,4

Fonte: ActionAid (2015)

Estimativas apontam que, para atender as demandas domésticas de etanol, o Brasil precisa aumentar sua produção para 61 bilhões de litros até 2021. O aumento de área plantada com cana-de-açúcar nos últimos anos não foi suficiente, sendo necessário um acréscimo de cerca de 6,4 milhões de hectares de cana para atender a demanda nacional de etanol até 2021 (Goldemberg et al., 2014). Dentre as estratégias que possam ser utilizadas para alcançar essas

metas de produção, pode-se citar o aumento de produtividade, a expansão da área e o etanol de segunda geração (E2G).

Biocombustíveis de 2ª geração são produzidos bioquímica ou termoquimicamente utilizando materiais lignocelulósicos (Naik et al, 2010). No cultivo da cana-de-açúcar, através da colheita mecanizada, grande quantidade de biomassa lignocelulósica é gerada, como o bagaço e palhada. Essa biomassa é considerada uma matéria-prima sustentável capaz de atender a crescente demanda de energia (Wyman, 2007), devido seu alto teor de carboidratos e por não competir com as demandas por alimento (Canilha et al., 2012). A biomassa deve estar disponível a um baixo custo e serem produzidas em larga escala para satisfazer a demanda energética e ter um impacto significativo em sustentabilidade (Lynd et al, 2008).

O atual cenário do setor sucroenergético busca melhorias no sistema de cultivo, além da redução dos impactos ambientais promovidos pelo mesmo. Dentre essas melhorias a utilização da colheita mecanizada se apresenta como forma de atenuação dos danos causados pela queima da palha, prática recentemente abrandada, e como alternativa para maximizar a produtividade agrícola.

Após a exclusão da queima da palha da cana-de-açúcar durante sua colheita, a mesma é cultivada anualmente em um sistema de manejo de alta deposição de resíduos sobre o solo através da mecanização agrícola. A introdução de práticas conservacionistas no manejo da cana-de-açúcar como a colheita mecanizada e consequente deposição de resíduos sobre o solo assume papel estratégico na busca em identificar oportunidades de melhoria para uma produção mais sustentável (Duarte et al, 2013). Nesse sistema de colheita, a não utilização da queima da biomassa permite que as folhas, bainhas, ponteiros, além de pedaços de colmo que são cortados e triturados, sejam lançados sobre a superfície do solo, formando uma cobertura de resíduo vegetal comumente denominada palha ou palhada (Souza et al., 2005). Somente na safra 2015/16 no estado de São Paulo, por exemplo, cerca de 91,3% da área plantada com cana-de-açúcar foi colhida mecanicamente (Cenário Agro, 2016).

A palhada da cana-de-açúcar obtida através da colheita mecanizada é, em geral, subaproveitada (Rossetto et al., 2013), embora apresente grande potencial para geração de calor, eletricidade e para produção de etanol celulósico (Santos et al., 2014). É a partir da extração, fermentação e transformação da hemicelulose e celulose das matérias-primas que o etanol celulósico pode ser formado. Dentre outras matérias primas disponíveis, os resíduos da cultura da cana-de-açúcar, como o bagaço e a própria palha podem possuir até 75% de celulose e hemicelulose (Cardona et al, 2010).

Segundo Franco et al. (2013) para a tomada de decisão sobre qual a quantidade de palha ideal a ser mantida sobre o solo, deve-se levar em consideração não apenas à massa de resíduos produzida, mas também quanto de nutrientes que cada compartimento da planta é capaz de transferir para o solo. Os ponteiros, por exemplo, apresentam maior teor nutricional se comparado às folhas secas, com duas, sete e cinco vezes mais N, K e P, respectivamente, e com isso, seriam, preferencialmente, a parte a ser mantida sobre o solo.

A quantidade de palhada a ser retirada ainda não está definida e o conhecimento dessa pode permitir, além de toda contribuição para os atributos físicos do solo, a redução da dependência por recursos não renováveis e a consequente redução das emissões de gases de efeito estufa. Estima-se que para o ano de 2017 a participação de fontes não renováveis na produção de energia seja de 14% e que até 2024 essa participação sofreria um acréscimo de 2% em comparação às fontes renováveis (PDEE, 2015).

O desafio é definir quantidade de palha a ser removida para a produção de etanol celulósico e bioenergia e a ser mantida no campo, para promover a qualidade do solo e sua relação com a produtividade da cultura. Neste sentido, o sistema radicular se apresenta como uma ferramenta fundamental e complementar para o diagnóstico de sistemas de manejo que buscam a otimização agrícola (Neumann and Romheld, 1999; Li et al., 2008; Gao et al., 2014).

2.2 Planta da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é uma planta semiperene com ciclo em torno de seis anos, pertencente ao gênero *Saccharum*. É uma planta monocotiledônea, alógama, da família das *Poaceas* e tem como principal característica a conversão em sacarose para os colmos. Possui crescimento cilíndrico composto de nós e entrenós, com suas folhas anexadas aos nós, formando assim duas fileiras em lados opostos, que se situam aproximadamente no mesmo plano. Uma folha consiste em duas partes: uma lâmina e uma bainha (Van Dillewijn, 1952; Miller and Gilbert, 2009). A inflorescência da cana de açúcar é do tipo panícula, ampla, piramidal, flor hermafrodita, cuja ráquis (eixo principal) se constitui do prolongamento do último internódio do colmo (Almeida et al, 1945).

Seu metabolismo C4 permite uma maior eficiência no processo de conversão de energia luminosa em energia química durante o processo de fotossíntese. Esse melhor aproveitamento faz com que espécies de metabolismo C4, com o aumento da CO₂, elevem a

eficiência do uso da água e com isso promove um aumento na produção de biomassa (Morgan et al, 2011).

Comercialmente a cana-de-açúcar é multiplicada assexuadamente via propagação vegetativa, mesmo se tratando de reprodução sexuada (Caieiro et al., 2010). A propagação vegetativa da cana de açúcar ocorre a partir da germinação de cortes ou "gemas" presentes em seus colmos de até 1 m de comprimento, plantadas em sulcos (Netafim, 2013). A parte aérea da nova planta será produto das gemas, enquanto que as raízes serão produtos dos primórdios radiculares. Segundo Carneiro et al (1995) a reserva do tolete é um fator importante no desenvolvimento inicial da cana-planta, sendo o processo de germinação das gemas determinante no perfilhamento da touceira.

A cana-de-açúcar apresenta quatro estádios de crescimento bem definidos: (1) brotação e estabelecimento (colmos primários), (2) perfilhamento (da emergência dos brotos ao final do perfilhamento), (3) crescimento dos colmos (do perfilhamento final ao início de acumulação da sacarose) e, por fim, (4) a maturação (intensa acumulação de sacarose nos colmos) (Gascho e Shih, 1983).

Devido seu cultivo de longa duração, o desenvolvimento da cana-de-açúcar é influenciado pelas condições meteorológicas durante todo seu ciclo de vida, estando, portanto, sujeito às diferentes estações do ano, seja seca ou chuvosa, durante seu ciclo de vida que pode variar de 12 a 18 meses (cana ano e cana ano e meio, respectivamente). Segundo Scardua (1985) o déficit hídrico nas primeiras fases de produção da cana (brotação, perfilhamento e crescimento dos colmos) pode reduzir o perfilhamento e prejudicar o desenvolvimento radicular. A disponibilidade de água se apresenta como um dos principais fatores que influenciam o desenvolvimento da planta e sua produção de sacarose. Plantas submetidas ao déficit hídrico moderado na fase de maturação, por exemplo, têm a concentração de sacarose aumentada (Roberto et al, 2015).

O clima ideal para o bom desenvolvimento da cana-de-açúcar é definido por Caputo et al. (2008) como aquele que possui duas estações distintas, uma quente e úmida, outra fria e seca. A primeira, estação de longa duração e alta incidência solar para estimular a germinação, perfilhamento e o desenvolvimento vegetativo, enquanto a segunda atua na maturação e acúmulo de sacarose nos colmos.

A variabilidade genética da cana-de-açúcar alinhada à interação com o ambiente pode resultar em comportamentos diferenciados tanto na brotação da cana planta como na soqueira (Maule et al. 2001; Silva et al. 2014). Segundo Debret (1998) a cana-de-açúcar tem a exigência em solos profundos, bem estruturados, férteis e com boa capacidade de retenção de

água, são os ideais para a cana-de-açúcar. No entanto, se desenvolvem também em solos mais arenosos e menos férteis, devido sua rusticidade.

2.3 Sistema Radicular da Cana de Açúcar

O sistema radicular da cana-de-açúcar é do tipo fasciculado de modo que a raiz principal não se distingue das secundárias, sendo todas de origem adventícia (Ferri et al, 1978). Além de garantir a sustentação da planta e absorção de nutrientes, as raízes desempenham papel fundamental na regeneração de soqueiras e de resistência ao ataque de pragas (Vasconcelos e Garcia, 2005).

As raízes se desenvolvem durante praticamente todos os quatros estádios fenológicos da cultura. As raízes de fixação são as primeiras a se desenvolver, logo após o plantio da cana-de-açúcar, a partir dos primórdios radiculares situados na zona radicular do tolete plantado (Bacchi, 1983; Castro e Kluge, 2001). O desenvolvimento inicial da planta se dá através das reservas do tolete e da absorção de nutrientes a partir das raízes de fixação, até o desenvolvimento das raízes superficiais (Casagrande, 1991).

Esse período inicial pode se estabelecer de três formas: a primeira com o sistema radicular desenvolvendo-se antes do perfilho primário, a segunda com o perfilho primário desenvolvendo-se antes do sistema radicular numa condição de “baixa aeração do solo”, e a terceira com ambos se desenvolvendo ao mesmo tempo (Casagrande, 1991). Após a formação das raízes superficiais a partir dos perfilhos primários e secundários, a planta fica dependente apenas da atividade dessas raízes, fazendo com que as raízes de fixação inicialmente formadas se tornem menos importantes para o estabelecimento da planta (Bacchi, 1983).

A formação do sistema radicular da touceira é resultado do desenvolvimento das raízes de cada perfilho (Marin, 2009), em um processo de ramificação subterrânea, que se inicia aos 40 dias após o plantio e, pode durar até 120 dias (Diola e Santos, 2010). Na fase de crescimento dos colmos, o desenvolvimento do sistema radicular se intensifica em lateralidade e profundidade, algumas raízes fibrosas crescem unidas, formando as raízes-cordão que podem atingir grandes profundidades (Vasconcelos e Casagrande, 2008). Finalmente, no processo de maturação, que envolve a formação e armazenamento de açúcares no colmo, há uma gradativa restrição no desenvolvimento vegetativo, (Watt et al., 2014), com uma elevada atividade na translocação de elementos e água através do sistema radicular (Ferri et al, 1978; Casagrande, 1991; Otto et al, 2009).

Evans (1935) citado por Van Dillewijn (1952) separou as raízes de cana-de-açúcar em três tipos: (1) raízes superficiais, que ficam localizadas nas primeiras camadas do solo, são finas e com elevada capacidade de ramificação e são responsáveis pela sustentação da planta nas primeiras semanas após germinação; (2) raízes de fixação, formadas a partir das raízes superficiais, são brancas e mais espessas, e crescem lateralmente e em profundidade para dar suporte à planta; (3) raízes cordão, que tem como principal característica seu crescimento quase que exclusivo em profundidade (crescimento vertical), atingindo até 6 m, permitindo maior volume de solo a ser explorado para a absorção de água (Figura 1).

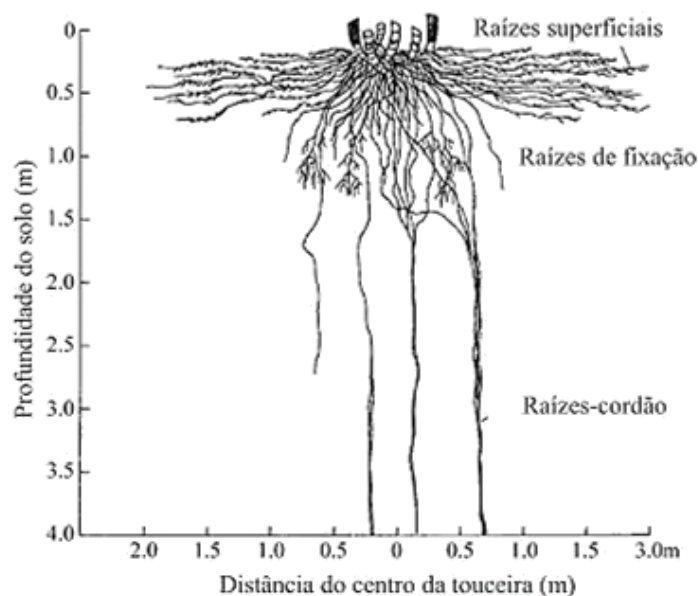


Figura 1. Sistema radicular da cana-de-açúcar mostrando os três tipos de raízes: raízes superficiais, raízes de fixação e raízes cordão. Adaptado de Smith et al (2005).

Segundo Smith et al (2005) como a maioria dos trabalhos não resultam de amostragens com profundidades superiores a 1,5 ou 2 m, é muito difícil a verificação e quantificação de raízes a 6 m de profundidade como as “raízes cordão”, encontradas por Evans (1935). Resultados obtidos por Otto (2012) salientam que as raízes de cana-de-açúcar que se concentram nas camadas mais profundas apresentam menor comprimento radicular e menor área radicular por unidade de peso de raiz, indicando assim que as raízes das camadas mais profundas são mais grossas do que as raízes das camadas mais superficiais.

Depois do corte da cana-planta, o sistema radicular antigo mantém-se em atividade por algum tempo e, durante esse período, é substituído pelas raízes dos novos perfilhos da soqueira, sendo esse processo lento e gradual. As raízes da soqueira são mais superficiais que as da cana-planta pelo fato de os perfilhos das soqueiras brotarem mais próximo da superfície

que os da planta. Pelo mesmo fato, quanto maior o número de cortes, mais superficial o sistema radicular das soqueiras (Bacchi, 1983).

A renovação do sistema radicular da cana-de-açúcar é dependente principalmente da condição hídrica na qual a cultura se estabeleceu, e não devido ao corte da cana (Vasconcelos et al. 2003). Em períodos de seca, as raízes superficiais são as primeiras a morrerem e também as primeiras a se renovarem em períodos de chuvas. Segundo Alvarez et al. (2000) a diferença na quantidade de raízes de cana-de-açúcar em diferentes cortes da planta se dá devido principalmente a fatores climatológicos. Da mesma forma Faroni e Trivelin (2006) ao quantificar as raízes metabolicamente ativas de cana-de-açúcar, não encontraram diferença da massa de raízes e de sua distribuição no perfil do solo, onde segundo os autores pode ter sido justificado à não deficiência hídrica encontrada no período de estudo.

Apesar de encontrar aumento da produção de raízes entre soqueiras, Silva Olaya et al. (2017) não observou diferença significativa entre os cortes da cana. Esse efeito também foi observado por Aquino et al. (2015) e Otto (2012), o que confirma dizer que afirma que a renovação do sistema radicular entre soqueiras sofre pouca alteração.

Com a adoção do manejo mais conservacionista (sem queima) da cana-de-açúcar e a consequente manutenção de resíduos sobre a superfície do solo, o crescimento e desenvolvimento, além da distribuição do sistema radicular, podem ser alterados e impactar na produtividade final da cultura.

2.4 Fatores que afetam o desenvolvimento do sistema radicular

A prática de deposição da palha sobre o solo pode apresentar pontos positivos, assim como negativos, devido à interação do ambiente, solo e atmosfera (Galdos et al, 2010).

- Físicos

Em áreas de uso intensivo da mecanização, como aquelas cultivadas com cana-de-açúcar, o sistema radicular pode ter seu crescimento limitado (Souza et al., 2015) em decorrência da degradação física do solo. O intenso tráfego de máquinas pode aumentar a densidade e reduzir a porosidade do solo, além de aumentar a resistência à penetração (Otto et al. 2011; Souza et al. 2012; Marasca et al. 2015), provocar redução da aeração do solo (Camargo e Alleoni, 2006) e diminuição no tamanho e continuidade dos poros (Souza et al., 2015; Głab, 2014; Kuncoro et al., 2014; Cherubin et al., 2016), além de alterar a estrutura anatômica de raízes de cana-de-açúcar (Souza et al, 2013).

A qualidade física de solos cultivados com cana-de-açúcar em virtude da mecanização agrícola é dita como um dos grandes fatores no rendimento da cultura. Souza et al (2005) observou que a colheita mecanizada da cana-de-açúcar pode provocar uma redução de mais de 50% do volume de macroporos do solo. A redução do número de macroporos ($> 0,08$ mm) exerce influência no crescimento e distribuição do sistema radicular, pois é através dos macroporos que a raiz se estabelece (Brady e Weil, 2013).

Os impactos da mecanização na compactação do solo e conseqüentemente na distribuição das raízes podem resultar em rendimentos mais baixos (Pryor et al, 2017). Maior densidade de raízes, atrelada à liberação de exsudatos orgânicos no solo, implica diretamente na formação e na estabilização de agregados do solo (Brandão e Silva, 2012). Souza et al (2005) em seu estudo concluiu que a maior concentração de raízes nas camadas mais superficiais do solo promoveu uma maior estabilidade de agregados. Raízes mais superficiais podem estar relacionadas ao microclima que o manejo da palha promove, encontrando maior biomassa radicular sob a palha do que em profundidade, com uma maior concentração de raízes finas e maior comprimento radicular, sendo essas variáveis prejudicadas em profundidade (Stirling et al, 2011).

Ao avaliar o crescimento e a distribuição do sistema radicular das variedades de cana-de-açúcar IACSP94-2094, IACSP94-2101 e SP79-1011 sob fertirrigação em sistema de gotejamento, Ohashi et al. (2015) encontraram maior parte das raízes nas primeiras camadas para todas as variedades. Cerca de 50% do total encontrado se concentrou na camada 0-20 cm e mais de 80% das raízes predominavam até os 40 cm, associando o padrão de distribuição ao sistema de irrigação empregado.

Segundo Rosolem (1994) citado por Barbosa (2010) a água é o principal fator para definir a profundidade do sistema radicular, sendo responsável pela concentração de raízes em camadas mais profundas quando a superfície do solo apresenta baixo conteúdo de água em períodos de seca. Segundo o autor, sob estresse hídrico e com a manutenção do sistema radicular em camadas mais superficiais (até 40 cm), a planta toleraria apenas 8 dias antes da queda de rendimento, enquanto que em camadas mais profundas do solo (até 1,10 m) esse período aumentaria para 22 dias.

Otto et al (2011) mostraram que a densidade de raízes da cana-de-açúcar diminui exponencialmente com a profundidade e distância a partir de plantas, e que as restrições ao crescimento radicular podem ocorrer com $D_s \geq 1,78$ g cm⁻³ com redução do crescimento radicular com valores de resistência à penetração (RP) entre 0,75 e 2,0 MPa em um Latossolo Vermelho Distrófico típico de textura argilosa.

A classe textural do solo representa um importante critério para se determinar a qualidade do solo e a densidade crítica ao desenvolvimento radicular. Compilado de trabalhos reportados por Reichert et al. (2003) apresentaram variações nos valores de densidade do solo crítica em diferentes classes texturais como: 1,25 a 1,3 Mg m³ para solos muito argilosos, 1,3 a 1,4 Mg m³ para solos argilosos, 1,4 a 1,5 Mg m³ em solo franco argiloso, 1,56 Mg m³ para os franco siltosos e 1,7 a 1,8 Mg m³ para solos franco arenosos. Por sua vez, valores de resistência à penetração considerados críticos para crescimento de raízes de cana-de-açúcar também são variados. De modo geral, atribui-se o valor superior a 2,0 MPa de resistência à penetração como crítico para o crescimento do sistema radicular da cana-de-açúcar (Tormena et al, 1998; Beutler et al, 2007; Otto et al, 2011; Baquero et al, 2012).

2.5 Avaliação do Sistema Radicular

Comparado aos estudos realizados para a parte aérea da cana-de-açúcar, há relativa escassez com relação ao sistema radicular da cultura. Isso em fato é devido aos procedimentos realizados para realização da amostragem e manipulação das amostras, que em geral são difíceis e demorados. A avaliação do sistema radicular de uma cultura pode ser considerada como essencial no diagnóstico de sistemas de manejo que visam a otimização da produtividade agrícola. A distribuição das raízes no solo é resultante de uma série de processos complexos e dinâmicos, que incluem as interações entre o ambiente, o solo e as plantas em pleno crescimento (Fante Junior, 1999).

Os estudos que avaliam o desenvolvimento morfofisiológico das plantas, em especial o sistema radicular, se apresentam como uma ferramenta fundamental para o diagnóstico do impacto do manejo que buscam a otimização da produção agrícola (Neumann and Romheld, 1999; Li et al., 2008; Gao et al., 2014). De maneira geral, o conhecimento do sistema radicular da cana-de-açúcar permite a utilização adequada das técnicas agrônômicas, tais como: espaçamento, local de aplicação dos fertilizantes, operações de cultivo, drenagem dos solos e sistemas de irrigação, controle da erosão, uso de culturas intercalares, entre outras (Casagrande, 1991).

Segundo Cesnik e Miocque (2004), na região sudeste, o máximo desenvolvimento fisiológico da cultura ocorre em dezembro, devido ao equinócio de verão, quando o comprimento do dia e os fatores hidrotérmicos são favoráveis a cultura e, desta forma, é necessário que sistema radicular da touceira esteja bem desenvolvido (Segato et al., 2006). Segundo Vasconcelos et al. (2003) o fator varietal, alinhado ao manejo da cultura e da

qualidade física do solo é que vai ser determinante para a quantificação da massa de raízes de cana-de-açúcar.

Além disso, o método escolhido para se realizar a amostragem é decisivo na obtenção de resultados significativos de biomassa de raízes da cultura. Uma grande quantidade de métodos para estimar a distribuição do sistema radicular das culturas e avaliar a qualidade dessas raízes é descrita em revisão de Böhm (1979). Vasconcelos et al. (2003) explica que para se determinar qual método utilizar na realização da amostragem de raízes é necessário antecipadamente se ter idéia do objetivo do trabalho, a cultura utilizada e as condições em que ela se desenvolve. O autor comparou três métodos de quantificação de massa de raízes de cana-de-açúcar (monólito, trado e perfil), e observou que os métodos dos monólitos e do trado por possuírem uma amostragem volumétrica através da extração de solo com raízes resultaram em uma melhor amostragem quando comparados aos métodos de perfis, que se baseiam no levantamento de imagens de um plano único. Em ambos os casos a desvantagem dos métodos de escavação e parede de vidro é que eles exigem uma grande quantidade de trabalho físico, além de serem muito demorados.

Ao avaliar a distribuição do sistema radicular através de dois métodos, monólito e sonda, Otto et al. (2009) observaram que para este último a quantidade de solo amostrado era pequena e com isso não era eficiente em avaliar a distribuição das raízes no perfil do solo.

Em condições de rhizotron, Ido (2003) afirma que as condições mais homogêneas (físicas e químicas) promovidas pela uniformização do solo, permitem ao sistema radicular uma distribuição mais uniforme. No entanto, é um método que já foi criticado por Wei e Yang (1987) devido ao fato de que a maioria das raízes principais e algumas ramificações maiores não apareceram tão bem ao longo da parte interna da janela como esperado. Elas retrocederam no solo depois de um período de crescimento.

A utilização de cavadores manuais para a amostragem de raízes não é comumente encontrada na literatura. Esta prática é mais difundida para o levantamento dos solos, através da tomada de amostras da terra e conseguinte avaliação da sua capacidade de uso, e também para a escavação manual de covas para o plantio de mudas. O uso do método do trado, no qual mais se aproxima ao utilizado nesse estudo, se apresenta como metodologia rápida, além de eficaz, e devido maior volume de solo amostrado (quando comparado ao método do cilindro volumétrico) promove maior uniformidade e confiança nos resultados (Fante Jr et al., 1999; Vasconcelos et al., 2003).

2.5.1 Influência da palha no sistema radicular

Apesar de o manejo da cana-de-açúcar através da mecanização agrícola já ser algo praticado, poucos são os estudos que avaliam o efeito deste para o sistema radicular da cultura. A manutenção da palha pode minimizar esses efeitos negativos do manejo sobre os atributos físicos do solo de modo que a deposição da palha sobre a superfície do solo tende a melhorar a estrutura do solo e a retenção de água que fica disponível para as plantas (Sparovek e Schnug, 2001; Awe et al, 2015). Segundo Surendran et al (2016) a manutenção da palha sobre o solo mostrou efeito significativo na densidade do solo, amenizando o efeito da compactação do solo. Além disso, o manejo da palha alinhado à manipulação do solo através tratos culturais promoveu maior qualidade do solo quando comparado com o cultivo convencional, e conseqüentemente, maior massa de raízes.

No entanto, mesmo quando a manutenção de resíduos culturais sobre o solo não tem efeito sobre o a biomassa de raízes, muitas vezes há fortes mudanças na distribuição do sistema radicular em resposta à disponibilidade de recursos (Smith e De Smet, 2012).

Vasconcelos et al. (2003), com o objetivo de comparar métodos de avaliação do sistema radicular nos dois sistemas de colheita: mecanizada de cana crua e manual de cana queimada, de modo geral, encontrou nas quatro profundidades estudadas, maior acúmulo de raízes sob o sistema de colheita de cana queimada. Em contrapartida, ao comparar o crescimento de raízes de cana colhida crua, mecanizada e de cana após a queima, colhida manualmente na primeira e segunda soqueira, Alvarez et al (2000) encontrou na cana crua maior acúmulo de raízes em superfície e na queimada em profundidade, e que as diferenças expressas do primeiro para o segundo ano são devido aos fatores climatológicos em ambos os manejos.

A presença de raízes sob a palha foi notada por Ball-Coelho et al. (1992). A partir de 3 meses após a deposição da palha, os autores observaram pequena quantidade de raízes finas sob a palha com massa correspondente a cerca de 1% e 3% da massa total de raízes e comprimento, respectivamente. Ainda segundo os autores, a grande variabilidade espacial encontrada foi conseqüência da grande variabilidade na densidade da camada de resíduos sobre o solo.

Ao estudar a influência de diferentes quantidades de palhada em dois ciclos da cultura (primeira e segunda soqueira) Aquino et al (2015) encontraram maior massa de raízes na primeira soqueira em comparação à segunda. A quantidade de 10 Mg ha⁻¹ proporcionou maior

umidade no solo e maior densidade de raízes. Os autores justificam que na primeira soqueira, houveram condições desfavoráveis para o desenvolvimento da cultura devido a estiagem prolongada, ocorrida até a metade do ciclo enquanto que na segunda soqueira as condições hídricas não foram restritivas.

Avaliando o efeito do cultivo da cana-de-açúcar em sistema convencional e plantio direto com diferentes doses de calcário na biomassa radicular Cury et al. (2014) observou que apesar de o tratamento com plantio direto e dose de calcário ser, a princípio, favorável ao desenvolvimento de raízes, o mesmo apresentou a menor amplitude da biomassa radicular entre as épocas de amostragem. Segundo o autor, estes resultados indicam que sob esse tratamento as plantas não necessitaram produzir maior massa de raízes, mantendo essa variável constante.

Com a manutenção da palha sobre o solo e conseqüentemente aumento do pH do solo e redução do teor de alumínio no solo (Fioretto et al, 2009), acredita-se que, alinhado à uma maior umidade do solo, a manutenção de resíduos provenientes da colheita da cana-de-açúcar, favoreça a atividade biológica do solo, tendo uma relação positiva entre o pH do solo e a densidade de esporos de FMA, bem como a taxa de colonização das raízes (Sivakumar et al., 2013; Aleixo et al, 2014). A simbiose de fungos micorrizicos arbusculares (FMAs) com a planta da cana-de-açúcar também provoca mudanças no seu crescimento e do sistema radicular (Berta et al.,1995).

Reis et al. (1999), por exemplo, mostrou que a colheita da cana-de-açúcar através da queima da palha provocou menor diversidade das espécies de FMA. Resultados semelhantes foram encontrados por Azevedo et al. (2014), mostrando que a prática de manutenção da palha (não queima) promoveu aumento na porcentagem de colonização por FMA em raízes de cana-de-açúcar. Apesar disso, o primeiro ciclo da cultura não foi suficiente para provocar alteração nos atributos químicos do solo e na comunidade de FMA (riqueza de esporos, a frequência de espécies comuns, a riqueza de espécies e índices de diversidade).

Após a deposição da palha de cana-de-açúcar, maior percentual de colonização FMA em amostras de raízes e maior número de esporos de FMA também foi encontrado por Surendran et al. (2016). Segundo o autor esses resultados indicam que a multiplicação de FMA ocorreu devida o substrato matéria orgânica suficiente, ajudando no processo de solubilização de nutrientes.

3. HIPÓTESE

O presente estudo parte da hipótese de que a presença da palha sobre a superfície do solo resultaria em alterações sobre as propriedades físicas e junto com maior umidade do solo, refletiria em menor desenvolvimento do sistema radicular com maior concentração nas camadas mais superficiais do solo, afetando, conseqüentemente, na produtividade da cana-de-açúcar.

4. OBJETIVO GERAL

Avaliar os efeitos da remoção da palha resultante da colheita da cana de açúcar sem queima, sobre a arquitetura e massa de seu sistema radicular e a relação com sua produtividade.

4.1 Objetivos específicos

- Avaliar os efeitos da palhada de cana-de-açúcar sobre propriedades físicas, como densidade do solo e resistência a penetração, e sua relação com o sistema radicular e a produtividade da cana;
- Gerar subsídios que permitam a definição da quantidade mínima de palha deixada sobre a superfície do solo, que ao mesmo tempo, favoreçam o desenvolvimento radicular e produtivo da cana-de-açúcar.

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Caracterização da área experimental

O experimento foi realizado em campo, no município de Capivarí, SP (22° 51' 08,3" S e 47° 30' 53,2" O, com altitude média de 636 m). O clima predominante é caracterizado como subtropical úmido, com inverno seco e verão chuvoso, do tipo Cwa, conforme a classificação de Köppen, com precipitação média anual de 1259 mm e temperaturas mínima e máxima de 15,4 e 28,1°C, respectivamente, e média anual de 21,8°C (CEPAGRI, 2016).

O regime pluviométrico registrado durante o período de condução do experimento seguiu o padrão histórico da região, com concentrações das chuvas durante as estações da primavera e verão (setembro a março) principalmente entre os meses de dezembro de 2014 e fevereiro de 2015. Nesse intervalo, os meses de fevereiro e março concentraram mais de 25% da precipitação total anual que acumulou aproximadamente 2000 mm. As temperaturas médias mais elevadas foram observadas nos meses de janeiro e dezembro de 2015, com 28,6 e 27,8°C, respectivamente (Figura 2A). O balanço hídrico durante o período de estudo apresenta precipitação acumulada de 1870,2 mm e déficit de 326,23 mm, com temperatura média de 24,2°C (Figura 2B).

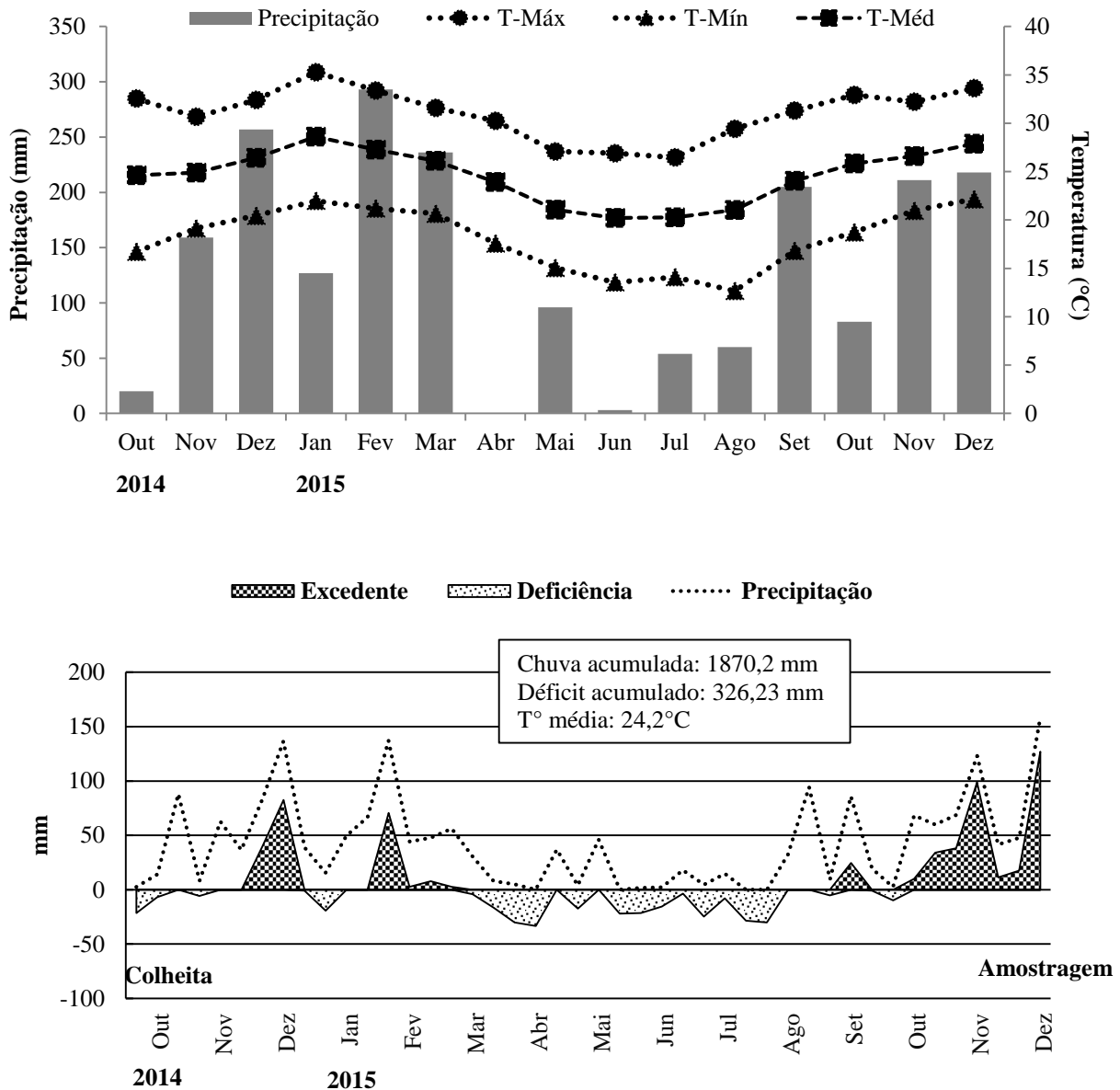


Figura 2. Caracterização climática durante o período de estudo (A) e balanço hídrico (B) na área de Capivarí, Usina Bom Retiro, nos anos de 2014 e 2015 durante a primeira soqueira da cana-de-açúcar.

A área é cultivada com cana-de-açúcar desde 1977 e há aproximadamente 10 anos não é realizada a queima do canavial para colheita. O plantio da cana-de-açúcar na área experimental foi realizado mecanicamente em 29/01/2013, em sistema de fileiras duplas, com espaçamento 1,50 m e 0,90 m, estando em seu segundo corte. A área experimental possui 3,0 ha, topografia plana com o início do experimento em outubro de 2014, a partir da colheita da cana-planta (Figura 3).

O preparo do solo foi realizado com a aplicação de herbicida para dessecação da soqueira antiga, seguido de gradagem intermediária e subsolagem. Os sulcos foram abertos

com 0,35 cm de profundidade para o plantio de toletes com comprimento médio de 20 cm, estes, sem qualquer tratamento prévio.

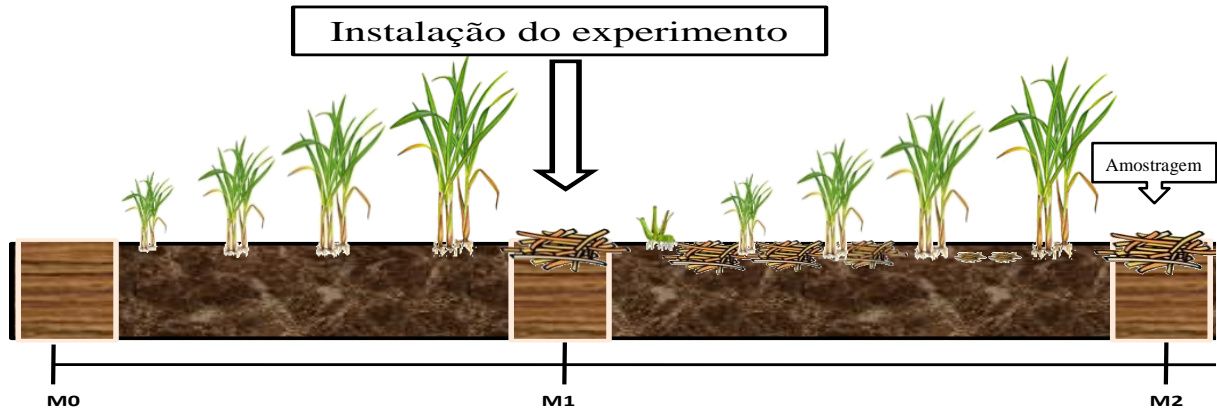


Figura 3. Sequência de manejo na área experimental onde, M0: reforma do canal (jan/2013), M1: colheita da cana planta (ago/2014), M2: colheita de cana soca (dez/2015).

O solo é classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico (Santos et al., 2013), de textura média, com 392 g kg^{-1} de argila, 64 g kg^{-1} de silte e 544 g kg^{-1} de areia na camada superficial (0,00 – 0,30 m). As análises químicas do solo foram realizadas nas camadas de 0–0,10, 0,10–0,20, 0,20–0,30 m, assim que o experimento foi instalado (Tabela 2), enquanto que as análises físicas foram realizadas após a colheita da cana-soca (Tabela 3).

Tabela 2. Características químicas do solo da área experimental no momento de instalação do experimento (Usina Bom Retiro, Capivari, SP, setembro de 2014)

Camada	pH	P	S	Ca	Mg	K	H+Al	Al	SB ⁽¹⁾	CTCp ⁽²⁾	V ⁽³⁾	M
cm	CaCl ₂	---mg/kg---		-----mmolc kg-----								----%----
0-10	5,2	29,3	18,0	26,2	7,7	9,4	19,4	0,5	43,2	62,6	68,9	0,8
10-20	4,9	24,9	33,0	19,1	5,9	5,2	24,6	1,9	30,1	54,7	54,8	3,5
20-30	4,5	22,1	68,6	12,5	2,9	3,0	31,5	2,1	18,5	49,9	36,8	4,2

⁽¹⁾ SB: soma de bases; ⁽²⁾ CTCp: capacidade de troca catiônica potencial; ⁽³⁾ V: saturação por bases;
Fonte: Guerra (2016).

Tabela 3. Características físicas do solo da área experimental em primeira soqueira de cana-de-açúcar (Usina Bom Retiro, Capivarí, SP, dezembro de 2015)

Camada (cm)	Ds (g dm ⁻³)	
	Entrelinha 0,90 m	Entrelinha 1,50 m
0-20	1,40	1,63
20-40	1,40	1,60
40-60	1,38	1,38
60-80	1,18	1,18

5.2 Deposição da Palha

A variedade de cana-de-açúcar utilizada no experimento foi a CTC-14 que possui quantidade média de palha produzida de 15,3% (IDEA, 2014) e é considerada uma variedade de maturação média a tardia, porém, responsiva, ou seja, aumenta sua produção conforme melhora o ambiente de produção, muito indicada para a região centro-sul do Brasil. Destaca-se pela tolerância à seca, porte ereto, excelente opção para a colheita mecanizada, ausência de florescimento, boa brotação em soqueiras, média exigência à fertilidade, bom perfilhamento e por possuir alta produtividade, mesmo não sendo um material com alto teor de Açúcar Total Recuperável - ATR (COPLANA, 2016).

A quantificação da massa de palha depositada sobre a superfície do solo ocorreu segundo metodologia proposta por Lisboa et al. (2017). A deposição das diferentes quantidades de palha se deu através de distintas combinações de rotações do extrator primário com a manutenção do extrator secundário ligado ou não. A colheitadeira foi regulada para depositar aproximadamente 0, 25, 50, e 100% de palha da cana-de-açúcar no campo após a colheita (Tabela 4). Contrariamente, ao se tratar de remoção, as taxas são de aproximadamente 100, 75, 50 e 0%.

Tabela 4. Processo de deposição e quantificação da massa de palha sobre a superfície do solo (Usina Bom Retiro, Capivarí, SP, setembro de 2014).

Extrator Primário		Extrator Secundário	Taxa teórica de palha sobre o solo	Quantidade de palha depositada
Status	Velocidade Angular (rpm)	Status	(%)	Mg ha ⁻¹
Desligado	0	Desligado	0	0
Ligado	500	Desligado	25	4,2
Ligado	700	Ligado	50	8,7
Ligado	1100	Ligado	100	18,9

Adaptado de Lisboa et al. (2017).

5.3 Delineamento experimental

Utilizou-se o delineamento experimental em blocos completos casualizados, com quatro repetições. Os tratamentos representaram quantidades crescentes de palhada mantidas sobre a superfície do solo, provenientes da colheita mecanizada, sendo esses: 0 Mg ha⁻¹ (remoção de 100% da palhada durante a colheita mecanizada); 4,2 Mg ha⁻¹ (remoção de 75% da palhada resultante da colheita mecanizada); 8,7 Mg ha⁻¹ (remoção de 50% da palhada) e 18,9 Mg ha⁻¹ (sem remoção) (Figura 4). Cada parcela experimental possuía 50m de comprimento e 25m de largura.

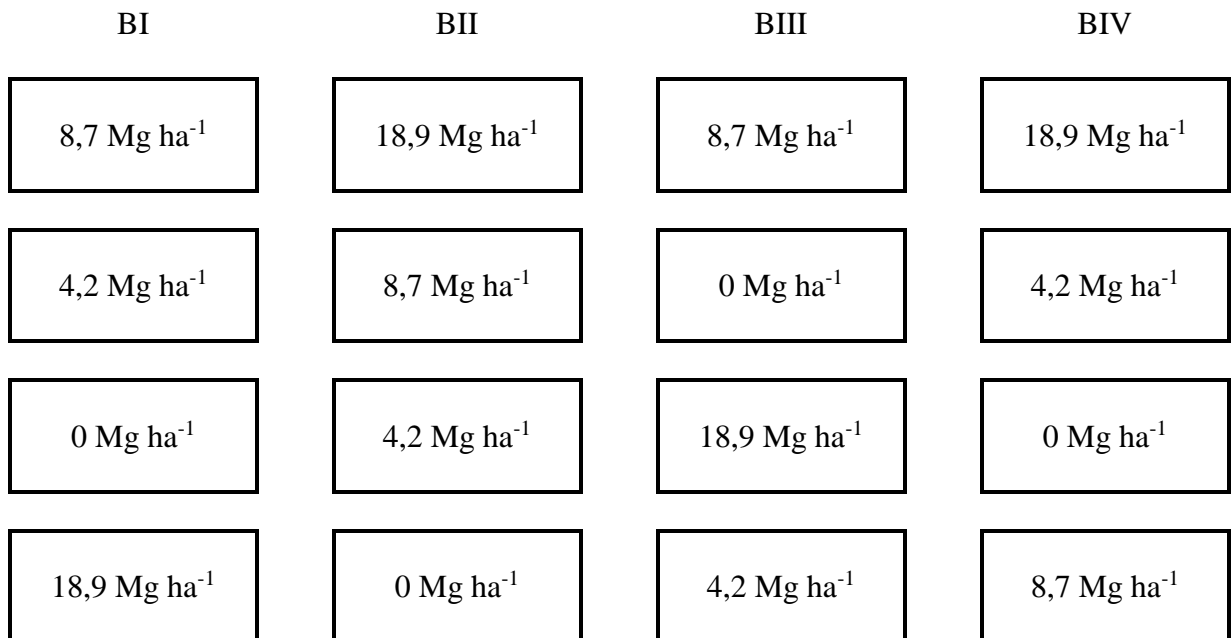


Figura 4. Croqui da área, demonstrando a aleatorização dos tratamentos no campo.

5.4 Amostragem das raízes

A amostragem foi realizada imediatamente após a segunda colheita mediante a utilização de cavadores manuais (Figura 5), os quais permitiram a avaliação satisfatória do sistema radicular da cana, com duas estratégias de amostragens utilizadas: na primeira estimou-se a distribuição (arquitetura) do sistema radicular vertical no perfil do solo enquanto que a segunda visou representar a massa de raízes e sua distribuição horizontal na área.

Para a primeira abordagem, dentro de cada unidade experimental, nove pontos, distanciados entre si em 0,30 m foram amostrados em linha, transversalmente às linhas de plantio (Figura 6), resultando em um total de 576 amostras (16 parcelas x 9 pontos x 4

profundidades). Uma vez que representam a mesma distância externa às fileiras duplas de plantio da cana, para fins de análise geoestatística, os resultados obtidos nos pontos A1 e A2, B1 e B2 e C1 e C2 (respectivamente, 0,75; 0,45 e 0,15 m de distância da linha de plantio, externos às fileiras duplas) foram tratados a partir da obtenção da média dos referidos pontos. O mesmo procedimento foi dispensado para os pontos D1 e D2 (0,15 m de distância da linha de plantio, dentro da fileira dupla). O ponto E (0,45 m de distância da linha de plantio, dentro da fileira dupla), foi tratado individualmente.



Figura 5. Métodos de amostragem através da escavação do perfil do solo com a utilização de cavadores manuais.

A segunda estratégia de amostragem visou representar a massa de raízes num plano horizontal dentro de cada parcela, os quais foram amostrados quatro pontos distanciados 0,45 m da linha de plantio de cada unidade experimental resultando em 256 amostras (16 parcelas x 4 pontos x 4 profundidades), que foram somados aos pontos “E” e “B₂”, estes, pontos simétricos localizados também a 0,45 m da linha de plantio (Figura 6). Para ambas as estratégias, as amostras foram coletadas nas profundidades de 0-0,20; 0,20-0,40; 0,40-0,60 e 0,60-0,80 m.

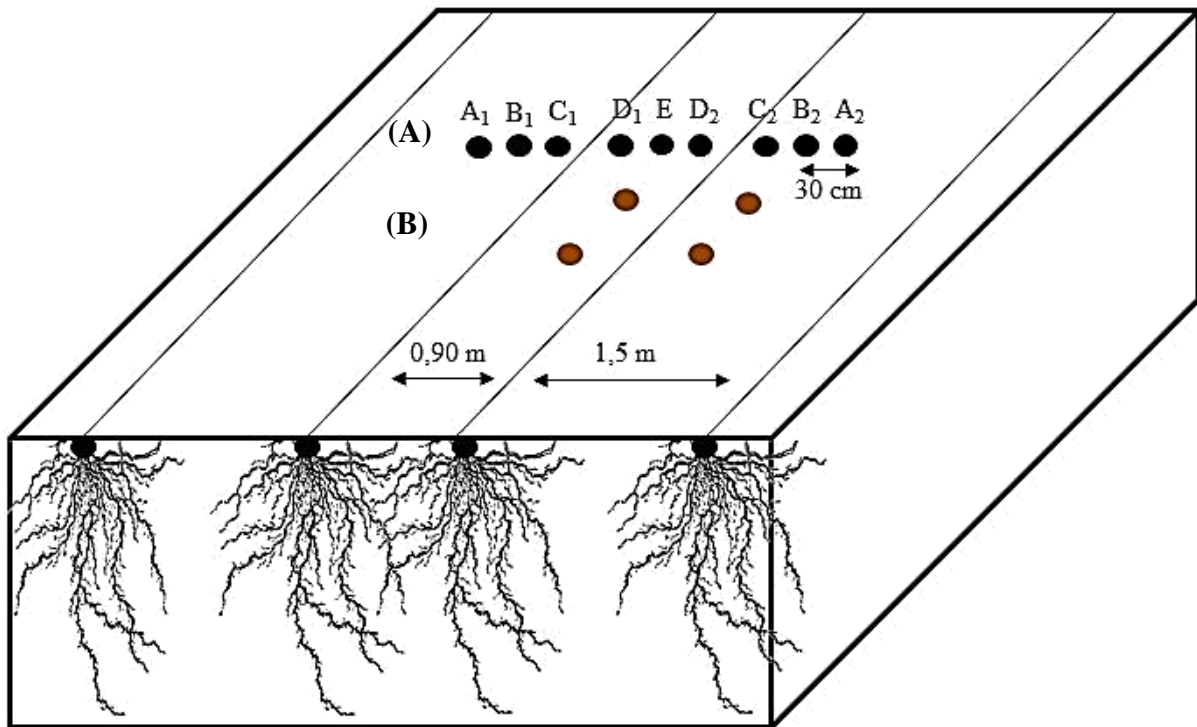


Figura 6. Estratégias de amostragem do sistema radicular da cana de açúcar; (A) distribuição (arquitetura) do sistema radicular e (B) massa de raízes por metro quadrado.

No laboratório, as amostras contendo entre 4 e 7 kg solo e raízes de cada camada (0,20 m de profundidade) tiveram o teor de água (umidade) determinado e, em seguida, foram lavadas em um conjunto de peneiras com malha de 5 e 2 mm de diâmetro. As raízes foram secas em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C até a manutenção de peso constante. Posteriormente, as raízes foram separadas das impurezas (solo e palha) através de catação e pesadas em balança analítica para quantificação da massa seca. Ressalta-se que a separação dos materiais de solo e raízes constituiu na maior dificuldade encontrada durante o período de estudo, tendo demandado enorme quantidade de esforço e tempo.

A biomassa de raízes foi calculada de acordo com a seguinte equação:

$$BR (kg/ha) = [(DR_{A1} * Vol_{A1}) + (DR_{B1} * Vol_{B1}) + (...) + (DR_{A2} * Vol_{A2})] * [(Vol_{ha}/Vol_{2,4})]$$

Onde:

DR = densidade de raízes ($kg\ m^{-3}$) em cada ponto amostral

Vol_{A1} a Vol_{A2} = volume de solo (m^3) na região de influência de cada ponto amostral (Figura X);

Vol_{ha} = volume de solo (m^3) numa camada de 0,20m de profundidade em um hectare;

Vol_{2,4} = volume de solo (m^3) numa camada de 0,20m de profundidade em um hectare (Figura 6).

5.5 Análises físicas do solo

Para determinação da densidade do solo (D_s) foram realizadas coletas de amostras indeformadas, em três pontos por parcela, nas profundidades de 0–0,20 e 0,20–0,40 m sendo dois pontos amostrados na entrelinha de 0,90 m e um ponto na entrelinha de 1,50 m em duas das quatro repetições estabelecidas. Nas demais repetições fez-se o inverso totalizando seis pontos amostrais por tratamento (Figura 7A). Admitindo-se que nas profundidades de 0,40–0,60 e 0,60–0,80 m, a densidade do solo não sofreria efeito da palha deixada na superfície do solo, para as referidas profundidades foram considerados os valores obtidos a partir de duas trincheiras de referência, abertas no centro das parcelas que não receberam a palha, por ocasião da instalação do experimento (agosto de 2014). A cada profundidade estabelecida, a amostragem foi conduzida com auxílio de anéis de aço de volume conhecido (100 cm^3), levadas para laboratório, onde se determinou a D_s , pelo método do anel volumétrico (EMBRAPA, 2011). Os dados obtidos foram utilizados para correção dos diferentes volumes de solo amostrados, a fim de quantificar a real massa de raízes por camada.

A resistência à penetração foi determinada por meio de penetrômetro de impacto (modelo IAA/Planalsucar STOLF) que apresenta uma haste de ponta cônica e introduzida por meio da promoção de uma massa de impacto em queda livre, conforme método proposto por Stolf (1991). As avaliações foram realizadas nas entrelinhas de 0,90 m e 1,50 m, sob a mesma condição de umidade, com quatro tomadas de dados próximos de cada ponto amostrado para D_s (Figura 7B).

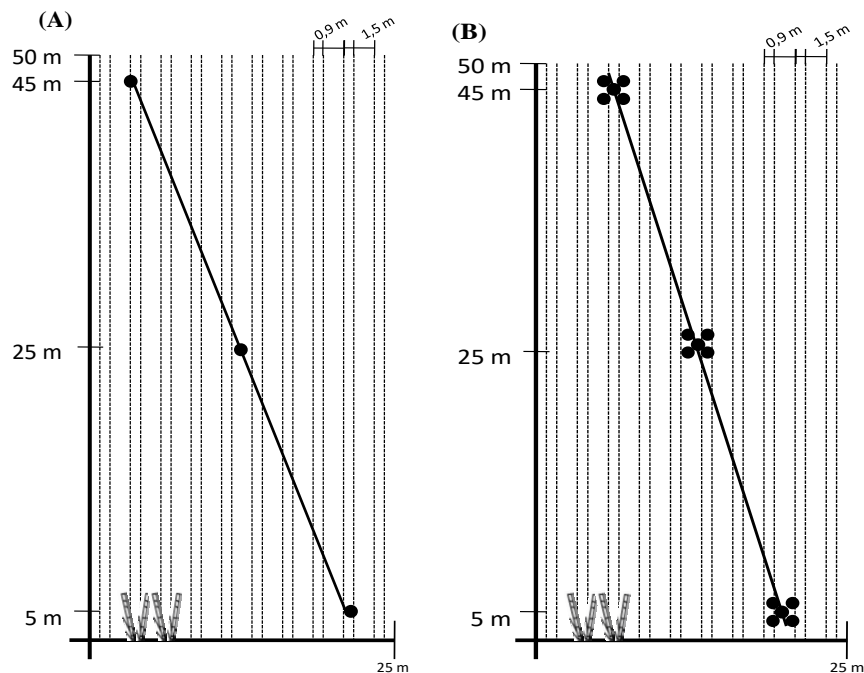


Figura 7. Esquema da localização dos pontos amostrados nas unidades experimentais para a densidade do solo (A) e resistência à penetração (B).

5.6 Quantificação da biomassa da parte aérea e do rendimento de colmos

Ao final do ciclo para a quantificação da biomassa da parte aérea da cana-de-açúcar, realizou-se o corte das plantas presentes em dois metros de linha de uma fileira dupla e a partir disso a cana foi seccionada em componentes como folhas verdes e ponteiros (Fv), colmos (CL) e folhas secas (Fs). Para determinação da massa de matéria seca de cada componente as amostras foram levadas para laboratório, pesadas com uma balança analítica (precisão de 0,01g) e colocadas para secar em estufas a 65 °C até obtenção de massa constante.

O rendimento de colmos foi quantificado no final do ciclo (ou seja, um ano após a colheita anterior). Para isso, cinco fileiras centrais (500 m de comprimento) de cada parcela foram colhidas mecanicamente e a massa fresca de colmos era pesada em um vagão acoplado a uma balança. Posteriormente, a massa fresca quantificada foi extrapolada para Mg ha^{-1} .

5.7 Análise estatística

Os efeitos das diferentes quantidades de palha deixadas como cobertura do solo sobre o sistema radicular e sobre variáveis do solo foram avaliados por meio de análise de regressão, tendo-se utilizados como critério para a escolha do modelo a magnitude dos

coeficientes de determinação e sua significância. A análise de correlação de Pearson foi utilizada para se avaliar a relação entre as variáveis do solo e o sistema radicular e, para comparação dos tratamentos utilizou-se a análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey ($p < 0.05$). Além disso, a distribuição do sistema radicular foi espacializada (plano 2D) através do uso do programa GS+™ Geostatistics for the Environmental Sciences.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Espacialização do sistema radicular no perfil do solo

Os resultados da distribuição das raízes no perfil do solo demonstraram que grande parte das raízes se concentrou nas camadas mais superficiais (0-20 cm e 20-40 cm) independente do manejo de remoção de palha testado (Figura 8). Observou-se que a remoção total da palha (0 Mg ha⁻¹) promoveu redução da massa do sistema radicular na entrelinha de 1,50 m em comparação aos pontos amostrados na linha de 0,90 m. O comportamento do sistema radicular nos pontos localizados em uma mesma distância em relação a linha de plantio foi semelhante entre si. A menor massa de raízes foi encontrada a 0,75 cm de distância da linha de plantio (pontos “A1” e A2), onde se observou um valor médio de 33,67 kg ha⁻¹ de massa de raízes.

À medida que os pontos de amostragem se aproximavam da linha da cana-de-açúcar, uma maior massa de raízes foi encontrada. Com isso, os maiores valores de massa radicular foram observados nos pontos localizados dentro das linhas duplas (pontos “D” e “E”), na entrelinha de 0,90 m, com valores em torno de 191,37 kg ha⁻¹ e 134,34 kg ha⁻¹, respectivamente.

Nesse sentido, observa-se que a manutenção da palhada proporcionou maior desuniformidade à distribuição da massa de raízes no perfil do solo, quando comparados com o tratamento com remoção total de palha (0 Mg ha⁻¹), o qual apresentou um padrão de distribuição mais simétrico (Figura 8A). Além disso, a palhada proporcionou redução na massa de raízes no centro da entrelinha de 0,90 m (ponto “E”), a qual se mostrou inferior inclusive àquelas obtidas nos pontos equidistantes (C1 e C2).

A manutenção de 8,7 Mg ha⁻¹ de palhada no solo (i.e., representa aproximadamente 50% de remoção da palha), de maneira geral, foi o que proporcionou maior massa de raízes em todos os pontos amostrados e em todas as camadas avaliadas (Figura 8C). Apesar de apresentar maior concentração na camada 0-20 cm, o comportamento do sistema radicular em relação a manutenção dessa quantidade de palha foi mais homogêneo para todas as camadas amostradas. Tal qual os demais tratamentos, a massa de raízes para o tratamento com 8,7 Mg ha⁻¹ de manutenção de palha se apresentou de forma mais expressiva nos pontos dentro da fileira dupla e próximo à linha de plantio (pontos “D”). O maior valor encontrado para esses pontos amostrados foi de 167,99 kg ha⁻¹. Nesse tratamento, as menores massas de raízes

também foram observadas nos pontos mais afastados das linhas de plantio (pontos “A”) com valor médio de 50,74 kg ha⁻¹.

Resultados semelhantes com quantidades intermediárias de palha foram obtidos no estudo realizado por Aquino et al (2015), que avaliando a influência de diferentes quantidades de palha de cana-de-açúcar sobre o sistema radicular da cultura de primeira e segunda soqueira verificaram que o tratamento com 10 Mg ha⁻¹ (que representa também 50% de manutenção de palha sobre o solo) foi suficiente para promover o crescimento das raízes de cana-de-açúcar em primeira soqueira, quando houve período de estiagem. Os autores salientam que a manutenção da palha apenas favorece o sistema radicular em períodos de baixa precipitação e déficit hídrico no solo.

A manutenção de 100% da palhada produzida como cobertura do solo (18,9 Mg ha⁻¹) promoveu uma redução da massa de raízes em relação ao tratamento com 0 Mg ha⁻¹, da mesma maneira para o tratamento com 8,7 Mg ha⁻¹, exceto para a camada 0-20 cm do ponto “D2”. Tal comportamento sugere a existência de uma quantidade de palha entre esses dois tratamentos a partir da qual se observa um efeito negativo ou desestímulo ao crescimento do sistema radicular da cana-de-açúcar. Tal fenômeno poderia estar associado a teores de umidade do solo e ao fornecimento de nutrientes suficientes ao adequado desenvolvimento da cana (Figura 8D).

Além disso, maior quantidade de palha sobre o solo favoreceu a redução da densidade do solo (dados não mostrados) e com isso pode ter influenciado positivamente na macroporosidade do solo. Dessa forma, do total de massa de raízes produzida sob o tratamento com 100% de palha mantida sobre o solo, quando alinhada à melhor qualidade física do solo, permitiu manter percentualmente maior quantidade de raízes em profundidade. Esse comportamento também foi observado por Chopart et al. (2010) que avaliando o sistema radicular da cana-de-açúcar em profundidade observou que a distribuição das raízes de cana-de-açúcar se aproveitou de condições físicas mais favoráveis (solo com menor resistência) para se desenvolver em profundidade.

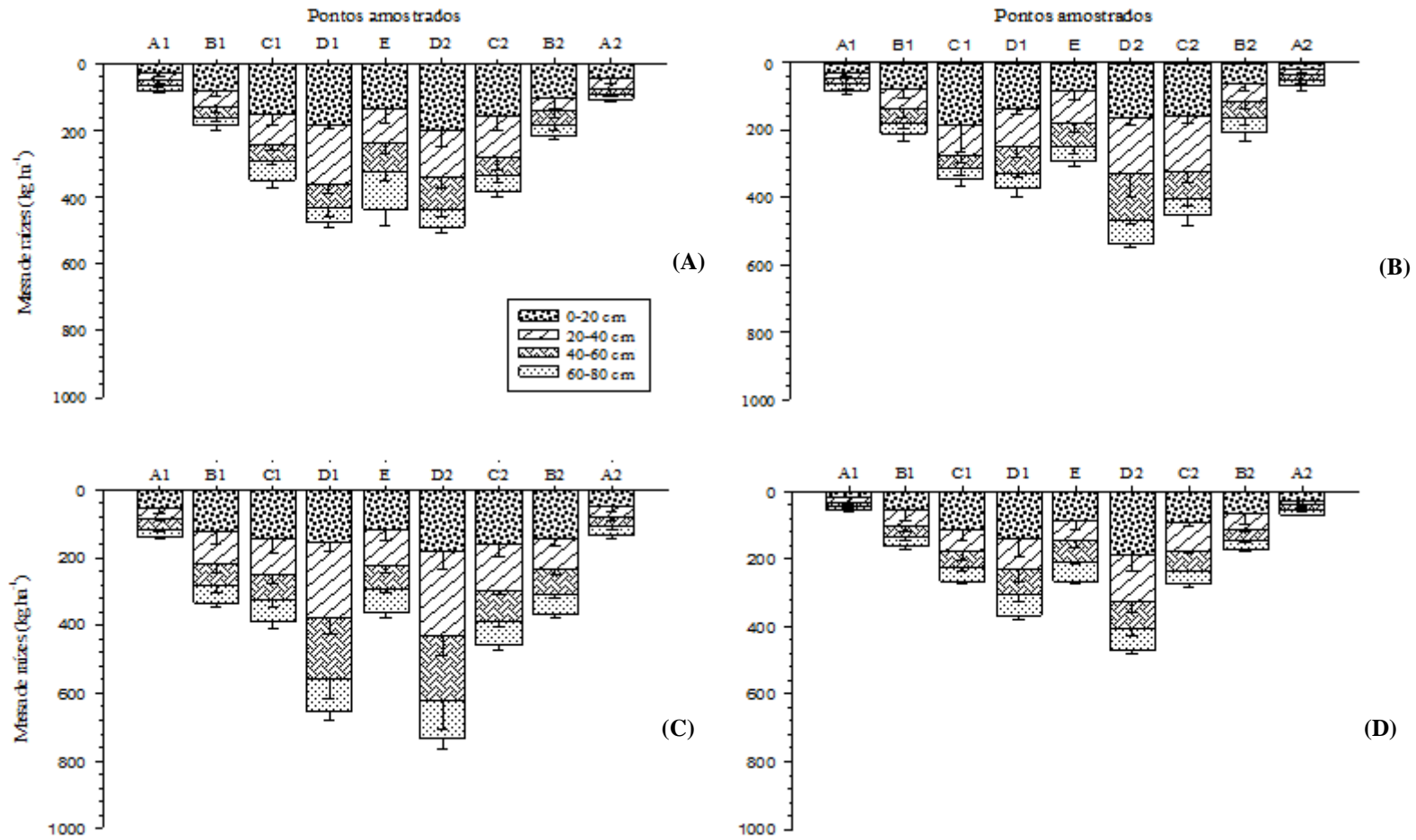


Figura 8. Massa de matéria seca de raízes de cana-de-açúcar para os nove pontos amostrados em que os pontos A, B e C representam às distâncias 0,75 m, 0,45 m e 0,15 m entre linhas duplas e os pontos D e E às distâncias 0,15 m e 0,45 m, respectivamente, dentro das linhas duplas para a variedade CTC14, onde (A) 0 Mg ha⁻¹, (B) 4,2 Mg ha⁻¹, (C) 8,7 Mg ha⁻¹, (D) 18,9 Mg ha⁻¹ (médias de 4 repetições e barras com erro padrão da média).

A capacidade do sistema radicular em responder a oferta espacial dos recursos provenientes da manutenção dos resíduos sobre o solo desempenha um papel importante na obtenção eficiente de água e nutrientes. A concentração de raízes nas camadas mais superficiais do solo, em virtude da maior umidade resultante da manutenção de palha, pode ser considerada um importante fator de redução da produtividade, já que, em períodos de seca, o sistema radicular fica suscetível ao estresse hídrico, principalmente em solos arenosos (Alvarez et al., 2000; Farias et al., 2008; Marques et al., 2014).

Não foi observado, no entanto, maior concentração do sistema radicular em camadas superficiais para os tratamentos em que houve manutenção de palha (Figura 9), fato que pode ter sido propiciado pela adequada suficiência hídrica para o desenvolvimento do cultivo durante o período de estudo, mesmo comportamento encontrado por Alvarez et al. (2000). Em um cenário de severo deficit hídrico, a manifestação de diferenças entre os tratamentos quanto à concentração do sistema radicular nas primeiras camadas do perfil seria mais provável.

A disponibilidade hídrica durante o ciclo de cultivo da cana-de-açúcar é um fator importante para avaliar o efeito da palhada sobre seu sistema radicular. Variedades de cana-de-açúcar respondem de forma variada à necessidade de água (Carvalho et al, 2008; Silva et al, 2014). No entanto, de modo geral a demanda hídrica para a cultura da cana-de-açúcar está em torno de 1500 e 2000 mm para um ciclo com duração de 365 dias (Doorenbos and Kassam, 1994). Com isso, a alta precipitação e, conseqüentemente, a maior disponibilidade hídrica para a cultura durante seu ciclo de cultivo (Figura 2), foi satisfatória para o crescimento da cultura e com isso o efeito da palhada sobre o sistema radicular pode não ter sido significativo.

A análise comparativa entre os quatro tratamentos sobre a densidade de raízes em profundidade mostrou que a distribuição horizontal do sistema radicular da cana-de-açúcar, de modo geral, ocorreu próximo à touceira da cana, dentro das fileiras duplas, com redução da densidade de raízes à medida que se afastava da linha de plantio, variando de $0,7 \text{ g dm}^{-3}$ até $0,04 \text{ g dm}^{-3}$ (Figura 9). Esses resultados se assemelham aos reportados por Ball-Coelho (1992), Alvarez et al. (2000), Cury et al (2014) e Otto et al (2009), os quais também observaram maior concentração radicular próximo à touceira da planta. Durante as quatro épocas de avaliação em um Latossolo Vermelho Eutroférico, Cury et al (2014) observou densidade de raízes variando de $0,45 \text{ g dm}^{-3}$, para os pontos mais próximos da linha de plantio, e $0,20 \text{ g dm}^{-3}$ quando a amostragem se localizou a 60 cm da linha. Da mesma forma, em seu trabalho Otto et al (2009), observou densidade de raízes em um m Latossolo Vermelho Eutroférico variando de $1,88 \text{ g dm}^{-3}$ na linha à $0,13 \text{ g dm}^{-3}$ na entrelinha de plantio.

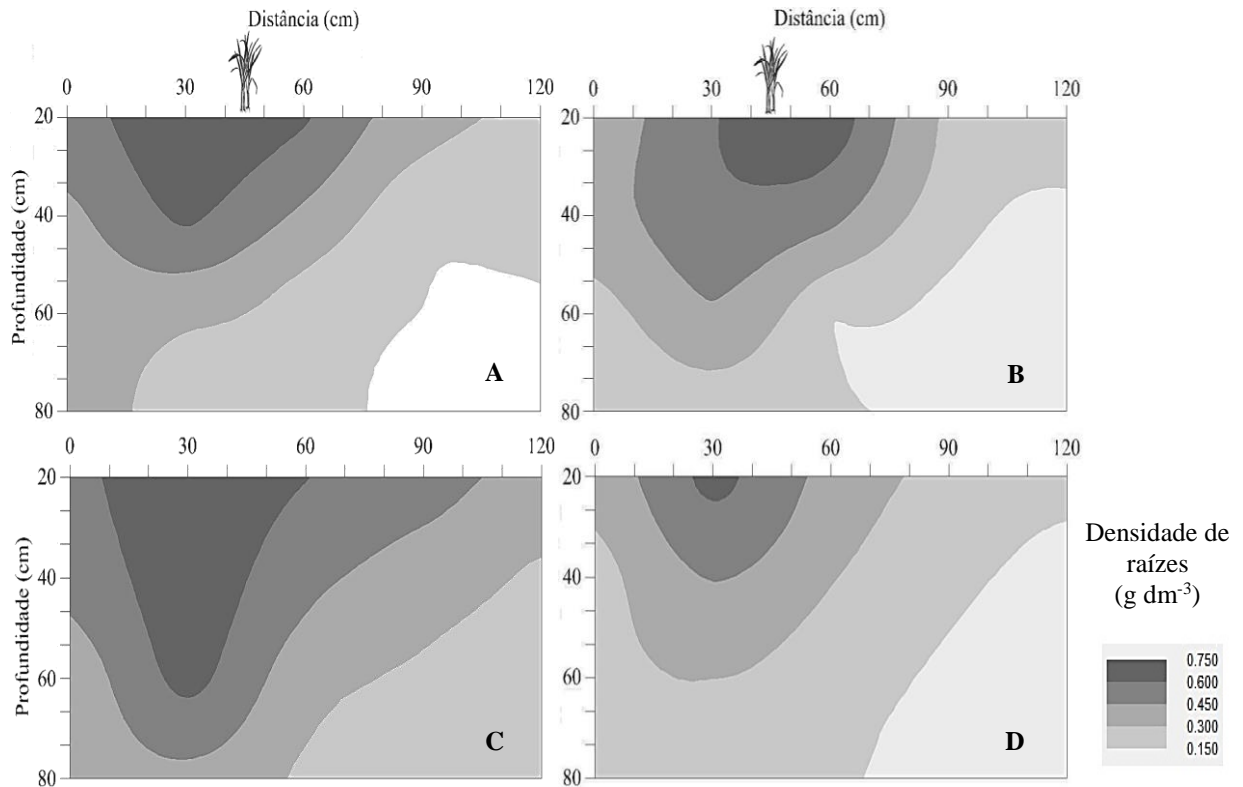


Figura 9. Espacialização em 2D (perfil) do sistema radicular da cana-de-açúcar no perfil do solo sob diferentes quantidades de palha mantidas sobre a superfície do solo onde: (A) 0 Mg ha⁻¹, (B) 4,2 Mg ha⁻¹, (C) 8,7 Mg ha⁻¹, (D) 18,9 Mg ha⁻¹.

Algumas diferenças da arquitetura do sistema radicular podem ser observadas em função dos tratamentos. Os gradientes espaciais para o tratamento com 8,7 Mg ha⁻¹, por exemplo (Figura 9C), indicam que esta quantidade de palha sobre o solo promoveu melhor ambiente para o sistema radicular em subsuperfície, permitindo um maior volume de solo explorado pelas raízes na busca de água e nutrientes, reduzindo um possível estresse hídrico à planta e aumentando, conseqüentemente, a produtividade da cultura (Barley, 1970; Cantarella, 1993). Por outro lado, o tratamento com 18,9 Mg ha⁻¹, apresentou redução da densidade de raízes (Figura 9D), enquanto que com 4,2 Mg ha⁻¹ de palha sobre o solo, a densidade de raízes apresentou um padrão de distribuição no perfil semelhante ao tratamento sem manutenção de palha (Figura 9A e 9B).

Relacionando-se a massa seca de raízes com a quantidade de palha mantida sobre o solo (Figura 10), observa-se que, em todas as profundidades, o modelo melhor ajustado (polinomial de segundo grau) sugere a existência, no intervalo estudado (0 a 18,9 Mg ha⁻¹) de uma quantidade ótima de palhada, que ao permanecer sobre o solo, favoreceria o aumento de massa seca de raízes. Os ajustes medianos e os níveis de significância maiores que 5% indicam apenas uma tendência de comportamento e refletem o efeito de tratamentos

empregados por apenas dois ciclos de cultivo, sendo necessária sua confirmação à medida que haja a continuidade do manejo do solo com a remoção da palhada.

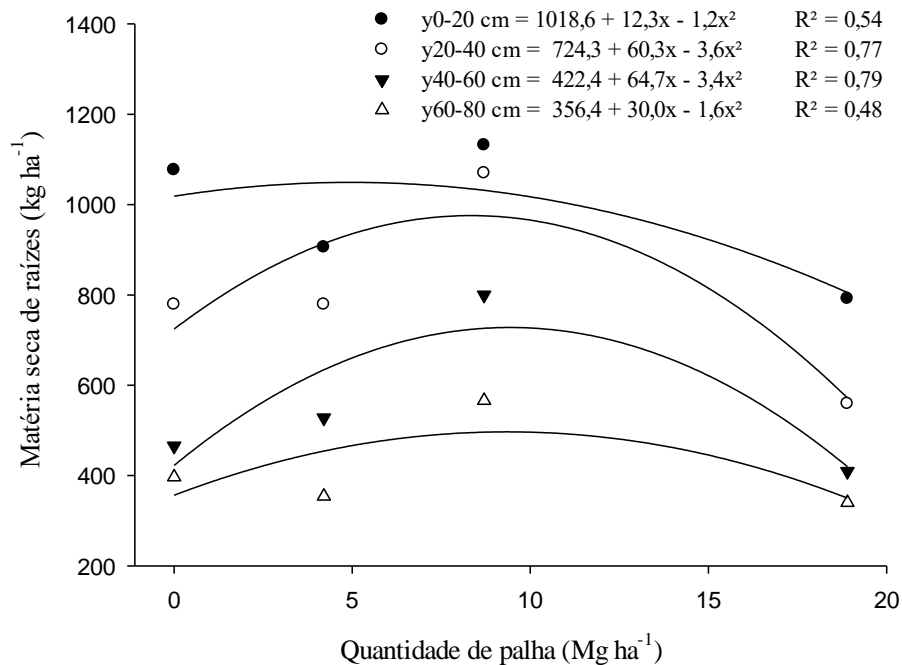


Figura 10. Produtividade de massa de matéria seca de raízes de cana-de-açúcar (kg ha⁻¹) por profundidade, função da quantidade de palha removida da superfície do solo (média de quatro repetições).

Melhores ajustes foram obtidos para os dados nas camadas de 20-40 e 40-60 cm de profundidade, com R² iguais, respectivamente a 0,77 e 0,79, contra 0,54 e 0,48, obtidos com os dados das camadas de 0-20 cm e 60-80 cm (respectivamente).

Considerando a curva ajustada aos dados obtidos na camada de 0-20 cm de profundidade, estimou-se que 4,95 Mg ha⁻¹ de palhada seriam suficientes para a obtenção de uma produtividade máxima de massa de matéria seca de raízes de 1049 kg ha⁻¹. No entanto, as quantidades de palha aumentaram à medida que se ajustaram os dados das camadas mais profundas: na camada de 20-40 cm de profundidade, a quantidade máxima de palha estimada foi de 8,34 Mg ha⁻¹; na de 40-60 cm, estimou-se 9,43 Mg ha⁻¹ de e na de 60-80 cm de profundidade, 9,35 Mg ha⁻¹, as quais resultariam, respectivamente em 976, 728 e 497 kg ha⁻¹ de massa seca de raízes.

Para todas as camadas foram ajustadas curvas de regressão polinomial que indicam uma quantidade de palha ideal que promove maior massa de raízes, ainda que efetivamente não foi apresentada nenhuma significância ($p < 0,05$) para os tratamentos avaliados, ou seja, o comportamento das raízes não refletiu o efeito das quantidades de palha. Tal ajuste pode estar relacionado, em determinado ponto, ao efeito negativo que determinada quantidade de palha

causaria, podendo-se observar uma crescente produção de raízes, indicando a melhor relação palha/raízes, até a inflexão da curva provocando perda na produção. A menor remoção de palha (18,9 Mg ha⁻¹), no entanto, pode ter desestimulado o desenvolvimento do sistema radicular, de modo que, comparativamente, aos valores do tratamento sem palha (0 Mg ha⁻¹), houve redução do crescimento radicular em todas as camadas.

De modo geral, a massa de matéria seca de raízes para todos os tratamentos apresentaram comportamento similar, reduzindo linearmente em função do aumento da profundidade do solo (Figura 11), a despeito do tratamento testado, o ajuste dos dados ao resultou em coeficientes de determinação superiores a 94% e altos níveis de significância ($p < 0,01$).

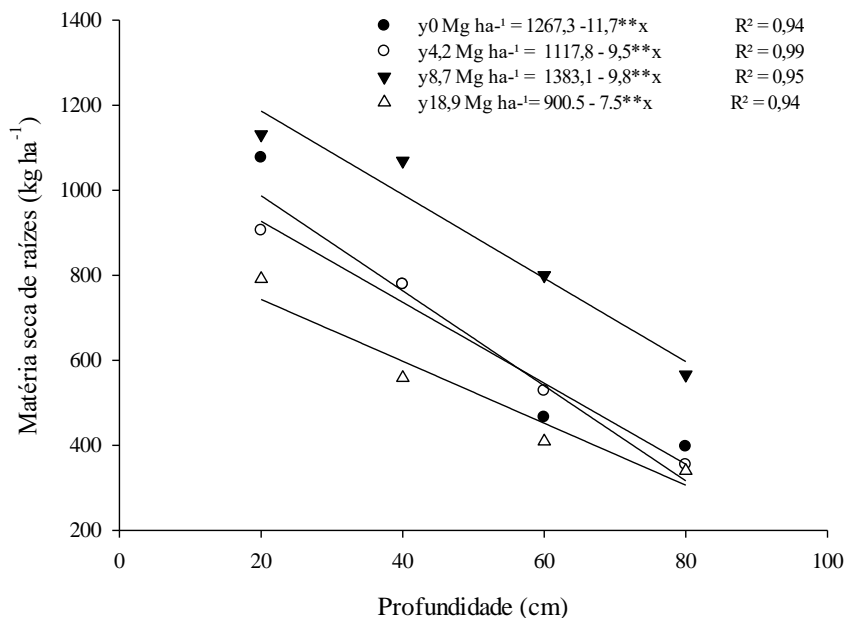


Figura 11. Massa de matéria seca de raízes de cana-de-açúcar (kg ha⁻¹) por tratamento (quantidade de palha deixada sobre o um Latossolo Vermelho Distrófico típico), em função da profundidade do perfil (média de quatro repetições) **Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

Em média, 2737,06 kg ha⁻¹ de raízes foram produzidas em todos os tratamentos e profundidades. Desse montante, aproximadamente 976,09 kg ha⁻¹ se mantiveram na camada 0-20 cm, o que equivale a aproximadamente 36% de toda a produção de raízes do estudo. A redução da produção de raízes em profundidade ocorreu de maneira linear com a biomassa do sistema radicular da cana-de-açúcar na camada de 20-40 reduzindo aproximadamente 6%, com 796,33 kg ha⁻¹ produzidos, mas ainda sendo uma camada bastante representativa com cerca de 30% do total produzido. O desenvolvimento de raízes foi ainda menor nas camadas mais profundas do solo (40-60 cm e 60-80 cm). Para a camada 40-60 cm mais de 550,46 kg ha⁻¹ foram produzidos, enquanto que para a camada 60-80 cm 414,17 kg ha⁻¹ de raízes foram

quantificados (representando aproximadamente 20% e 14% do total produzido, respectivamente) (Figura 12).

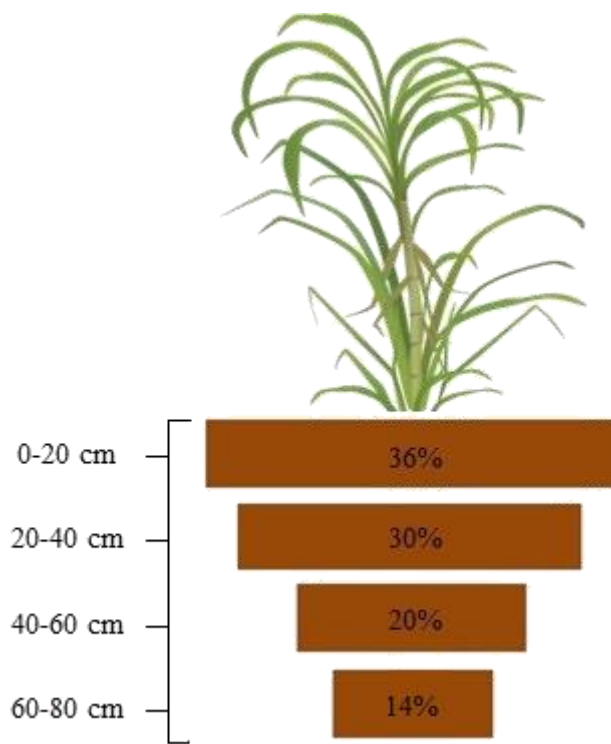


Figura 12. Percentagem de raízes de cana-de-açúcar (variedade CTC14) no perfil do solo (cm).

Considerando a profundidade total amostrada (0-80 cm), o tratamento com 8,7 Mg ha⁻¹ de palha deixada sobre o solo foi o que apresentou maior produção de raízes da cana-de-açúcar, resultando num total de 3566 kg ha⁻¹ de matéria seca de raízes. Em seguida aparecem os tratamentos sem palhada (0 Mg ha⁻¹) e com 4,2 Mg ha⁻¹, de palha, com 2716 kg ha⁻¹ e 2565 kg ha⁻¹, respectivamente e por último o tratamento onde deixou-se 100% da palhada produzida sobre o solo (18,9 Mg ha⁻¹), o qual resultou em valores em torno de 2099 kg ha⁻¹.

Esses resultados estão abaixo do encontrado por Silva-Olaya et al. (2017) que encontraram resultados acima dos 7000 kg ha⁻¹ de raízes para uma primeira soqueira de cana-de-açúcar com a variedade RB86-7515. No entanto, vale salientar que a amostragem realizada pelos autores contemplou a profundidade até 100 cm e considerou apenas as raízes próximas a linha de plantio, região que apresenta maior concentração as raízes. Além disso, é importante destacar que o solo no qual Silva-Olaya et al. (2017) realizaram a extração das raízes era de textura arenosa, na qual induz maior alongação do sistema radicular em busca de água, já que, diferente de um solo argiloso, sua capacidade de retenção é reduzida. Resultados

obtidos por Otto et al. (2012) mostram maior densidade de raízes em solo de textura média quando comparado à um solo com maior teor de argila.

6.2 Distribuição espacial horizontal das raízes na linha e entrelinha de cultivo

Estatisticamente não foram observadas diferenças quanto à densidade de raízes entre e dentro das linhas duplas de cultivo, comportamento também observado por Laclau e Laclau (2009) tanto na linha quanto na entrelinha de cultivo. A partir da distribuição espacial observada na figura 13, percebe-se tendência de maior concentração de raízes dentro das linhas duplas (entrelinha de 90 cm), principalmente nas camadas subsuperficiais. Na camada de 0-20 cm tal tendência foi apenas observada nas parcelas do tratamento com 4,2 Mg ha⁻¹, onde a densidade média de raízes para os pontos amostrados dentro e entre as linhas duplas foi de 0,35 g dm⁻³ e 0,25 g dm⁻³, respectivamente.

A partir da camada 20-40 cm, pode-se observar claramente maior densidade de raízes dentro das linhas duplas em comparação aos pontos amostrados entre as linhas duplas. As maiores diferenças foram verificadas nos tratamentos sem manutenção de palha e 4,2 Mg ha⁻¹ de palha, de modo que dentro das linhas duplas a densidade de raízes foi mais que o dobro do encontrado entre as linhas duplas; 0,42 g dm⁻³ e 0,20 g dm⁻³ (dentro e entre, respectivamente) para o tratamento sem palha, e 0,39 g dm⁻³ e 0,17 g dm⁻³ (dentro e entre, respectivamente) para o tratamento com 4,2 Mg ha⁻¹.

Em camadas mais profundas (40-60 cm) foi observada diminuição da densidade de raízes, embora a tendência à diferenciação entre as entrelinhas estudadas, principalmente, para os tratamentos sem manutenção de palha e 4,2 Mg ha⁻¹ de manutenção de palha, ainda fosse perceptível. Para a camada 60-80 cm, a distinção entre as entrelinhas foi menos nítida. Apenas para o tratamento sem manutenção de palha foi possível identificar, através das manchas, a distinção da densidade de raízes entre as entrelinhas, com 0,33 g dm⁻³ para os pontos amostrados dentro das linhas duplas e, 0,09 g dm⁻³ para os locais amostrados entre as linhas duplas.

Em todas as camadas de solo estudadas, a maior densidade de raízes e as menores diferenças dos valores médios de densidade de raízes entre as entrelinhas foram observadas no tratamento com 8,7 Mg ha⁻¹. Levando em consideração o maior impacto negativo da mecanização agrícola nas entrelinhas com 1,50 m, isso indica que essa quantidade de palha esteja mais próxima a quantidade ideal para melhorar a qualidade do solo e, assim favorecer o

desenvolvimento radicular. Essa influência da compactação do solo sobre sistema radicular será discutida na próxima sessão.

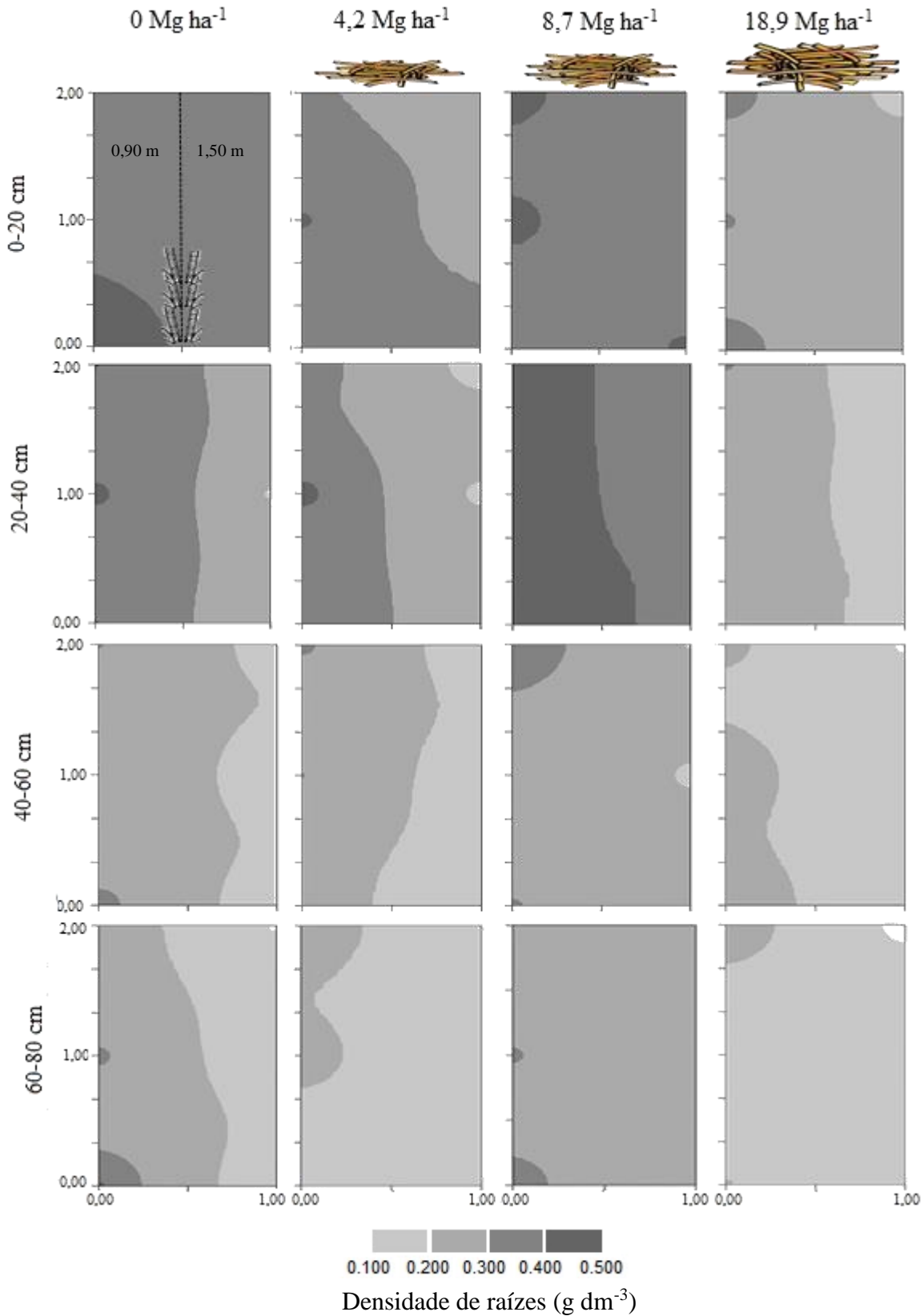


Figura 13. Distribuição espacial da densidade de raízes entre as linhas de plantio de cana-de-açúcar em que à esquerda da linha de plantio se encontra a entrelinha de 0,90 m e à direita a entrelinha de 1,50 m.

A densidade de raízes obtida através dessa estratégia de amostragem se assemelha às encontradas por Aquino et al. (2015) para os pontos localizados na entrelinha de 0,90 m. Os resultados encontrados pelos autores foram obtidos em estudos realizados também em Latossolo, para cana-de-açúcar em primeira soqueira da variedade SP80-1816.

A melhor distribuição radicular no solo para o tratamento com 8,7 Mg ha⁻¹, é encontrada nas camadas mais profundas (40-60 e 60-80 cm), que de maneira geral, superou a porcentagem encontrada em todos os outros tratamentos nessas camadas, principalmente, para a entrelinha de 0,90 m. Percentualmente o sistema radicular se encontrou melhor distribuído na entrelinha de 0,90 m, variando entre aproximadamente 60 e 68% das raízes concentradas até a camada 20-40 cm, enquanto que a variação para a entrelinha de 1,50 m ficou entre 64 e 72% na mesma camada em questão.

Para os tratamentos com 0 e 4,2 Mg ha⁻¹ de palha mantida, é onde se vê os maiores percentuais até os primeiros 40 cm de profundidade (tanto na entrelinha de 0,90 m quanto na de 1,50 m). E contrariamente, nos tratamentos com maior manutenção de palha (8,7 e 18,9 Mg ha⁻¹), se vê a tendência de se encontrar maior percentual de raízes entre 40 e 80 cm de profundidade. Esses resultados indicam que o tratamento com 8,7 Mg ha⁻¹ foi suficiente para melhorar a qualidade do solo e foi benéfica para maior produção de raízes.

Alvarez et al (2000) ao comparar o crescimento radicular em duas épocas de cultivo da cana-de-açúcar (1ª e 2ª rebrota da cana crua) mostraram que no primeiro ano 75% das raízes se distribuíram mais superficialmente, até 40 cm, enquanto que no segundo ano esse percentual cai para 70%. Silva-Olaya et al (2017) estudando a produção de biomassa radicular (até 1 metro de profundidade) em três estádios da soca encontraram maior biomassa de raízes secas na camada de 0-20 cm, mas com 77% da biomassa radicular até os 40 cm de profundidade, de modo que a quantidade de raízes nos diferentes tratamentos não diferiu nas camadas inferiores. Além disso, os autores observaram uma tendência de um aumento da massa de raízes em profundidade à medida que aumenta o número de cortes da cultura.

A despeito do manejo da palhada empregado, a distribuição do sistema radicular no solo pode variar de acordo com o tipo de solo e com qual variedade de cana-de-açúcar se está trabalhando. Costa et al. (2007) observaram que a distribuição vertical do sistema radicular para as variedades RB83-5486 e RB83-5089 foram diferentes em solos com textura contrastante. Os autores observaram que a variedade RB83-5486 apresenta melhor distribuição de raízes, com maior comprimento radicular em profundidade (ou menor redução do comprimento de raízes), em solo com menor teor de argila, garantindo à variedade um maior volume de solo explorado, com maior eficiência na absorção de água e nutrientes. Uma

vez que, no presente estudo, o solo da área experimental apresenta textura média, com teores de argila em torno de 392 g kg^{-1} de argila, acredita-se que a granulometria não tenha sido uma limitante para o alongamento vertical do sistema radicular em nenhum dos tratamentos considerados.

6.3 Resistência à penetração (Entrelinhas de 0,90m e 1,50m)

Um dos principais fatores associados à redução do crescimento radicular na entrelinha de 1,50 m é a compactação do solo induzida pelo intensivo tráfego de máquinas comumente existente em áreas de cana-de-açúcar. Para avaliação dos efeitos da compactação do solo sobre o crescimento radicular, utilizou-se a resistência mecânica do solo à penetração (RP), a qual, de modo geral, apresentou menores valores nos tratamentos com maior manutenção de palha, aumentando continuamente à medida que a quantidade de palha foi reduzida, tendo influência direta da umidade do solo (Figura 14). Esta tendência foi observada tanto para a entrelinha de 0,90 m quanto para a entrelinha de 1,50 m. Contudo, como a mecanização agrícola em cultivos de cana-de-açúcar com linhas duplas se concentra na entrelinha de 1,50 m, foi possível observar um nível de compactação superior em relação à entrelinha de 0,90 m.

Na camada de 0 – 10 cm de profundidade no tratamento sem manutenção de palha observou-se um aumento de quase 180% no nível de resistência a penetração do solo na entrelinha de 1,50 m em comparação à entrelinha de 0,90 m, partindo de 4,10 MPa para 11,4 MPa, sendo estas as maiores médias de resistência à penetração encontradas (Figura 14). Dessa mesma forma, nos estudos de Roque et al. (2010), a compactação do solo foi mais acentuada onde houve maior mecanização. No entanto, a distribuição vertical da resistência do solo à penetração apresentou redução dos valores em profundidade para a entrelinha de 1,50 m e, um comportamento inverso para a entrelinha de 0,90 m.

Na entrelinha de 0,90 m houve aumento da resistência do solo a penetração até 30 cm para o tratamento com $18,9 \text{ Mg ha}^{-1}$, enquanto que para os demais tratamentos esse aumento ocorreu até 40 cm de profundidade, com exceção do tratamento com remoção total de palha (Figura 14A). Estes resultados estão de acordo com Souza et al. (2005) que observaram aumento do nível de resistência a penetração de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico até os 30 cm de profundidade. Também em um Latossolo cultivado com cana, Marasca et al. (2015) encontraram valores de resistência à penetração para a entrelinha de

0,90 m entre 4,0 e 5,0 MPa até 45 cm de profundidade, quando avaliados em plantio convencional, comparável aos encontrados no tratamento sem palha desse estudo.

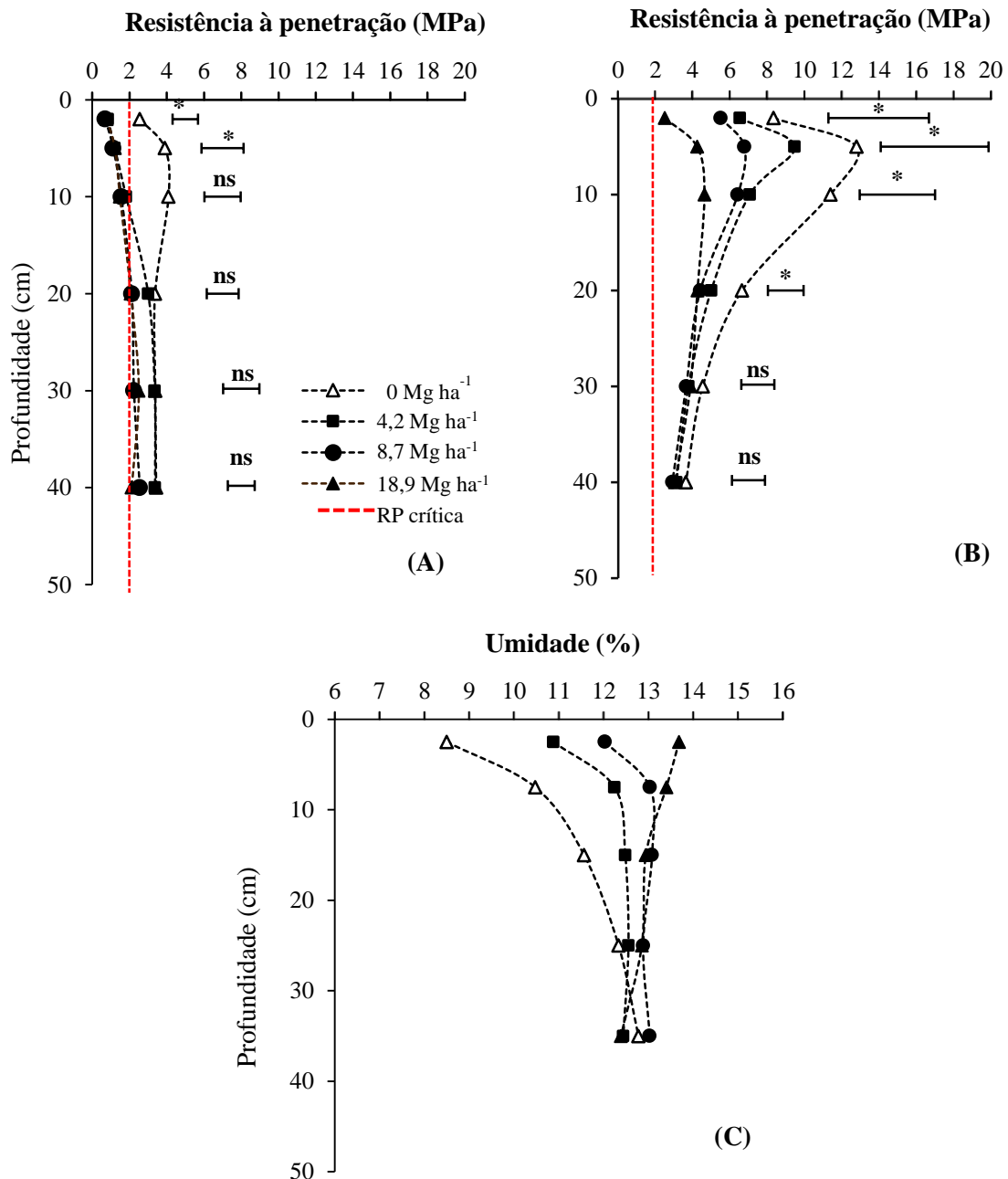


Figura 14. Resistência do solo à penetração em profundidade para os tratamentos com 0 Mg ha⁻¹, 4,2 Mg ha⁻¹, 8,7 Mg ha⁻¹, 18,9 Mg ha⁻¹ de palha mantida dentro (A) e entre as linhas duplas (B) da cana-de-çúcar e teor de água do solo (C). As linhas horizontais indicam a diferença mínima significativa a 10% de probabilidade pelo teste tukey, e comparam médias dos tratamentos em cada camada. ^{ns}Não-significativo. *Significativo.

Para a entrelinha de 1,50 m o efeito da palha foi observado até a camada 10-20 cm, havendo diferença significativa para o tratamento com 18,9 Mg ha⁻¹ de manutenção de palha ($p < 0,05$) (Figura 14B). Não houve diferença significativa entre os tratamentos ($p > 0,05$) para camadas a partir desta, apresentando valores de RP muito semelhantes, com variação máxima entre os tratamentos de 8,7 e 0 Mg ha⁻¹ representadas pelos valores de 3,7 e 4,5 MPa,

respectivamente. Estes valores refletem a menor resistência mecânica à penetração das raízes em profundidade. Para a entrelinha de 0,90 m esse efeito não foi significativo ($p > 0,05$) e foi verificado desde a profundidade de 10 cm, mostrando, mais uma vez, que o efeito do tráfego de máquinas no cultivo da cana-de-açúcar se deu estritamente para a entrelinha de 1,50 m. Solos compactados podem induzir a emergência e crescimento de raízes laterais, estas mais finas, capazes de penetrar pequenos poros (Tracy et al, 2012).

Os valores observados nesse estudo para a entrelinha de 1,50 m não são facilmente encontrados na literatura, uma vez que a maioria dos trabalhos com a cultura da cana-de-açúcar em cultivo de linhas duplas realiza a avaliação apenas na entrelinha de 0,90 m. Ainda assim, Oliveira Filho (2014) ao estudar a distribuição espacial da resistência à penetração de um solo arenoso em cultivos de cana-de-açúcar observou altos valores (próximos a 10 MPa) na entrelinha de cultivo.

O aumento da área de contato decorrente da manutenção da palha sobre o solo diminui a pressão de contato na interface rodado-solo (Silva et al., 2016). Dessa forma, foi possível observar que os tratamentos com maiores quantidades de palha (8,7 Mg ha⁻¹ e 18,9 Mg ha⁻¹) foram os que apresentaram maiores porcentagem de raízes em profundidade para a entrelinha de 1,50 m. Isso significa que a melhoria do ambiente radicular criada pela manutenção da palha, através da redução da resistência à penetração, apesar de ter sido incapaz de produzir maior massa de raízes, este para o tratamento com 18,9 Mg ha⁻¹ de palha, permitiu maior aprofundamento do sistema radicular.

Por outro lado, a maior quantidade de resíduos mantida em cobertura, também promoveu maior retenção de água (~13% de água), principalmente em camadas mais superficiais do solo (Figura 14C). A redução da resistência à penetração nos tratamentos com maiores quantidades de palha (Figuras 14A e 14B), associada ao maior conteúdo de água no solo, sugere que, nos primeiros anos de manejo da palhada, seu efeito sobre a resistência à penetração das raízes é indireto, sendo atenuado pelo teor de água armazenado no solo, influenciado diretamente pela cobertura do solo.

A associação da resistência à penetração ao comportamento da densidade de raízes como resultado do manejo da palhada apresentou ajustes não lineares e coeficientes de determinação elevados tanto para a camada 0-20 cm quanto para a camada 20-40 cm. Resultados semelhantes à densidade de raízes, observaram-se curvas de regressão com ajuste em geral quadrático para a resistência à penetração (Figura 15).

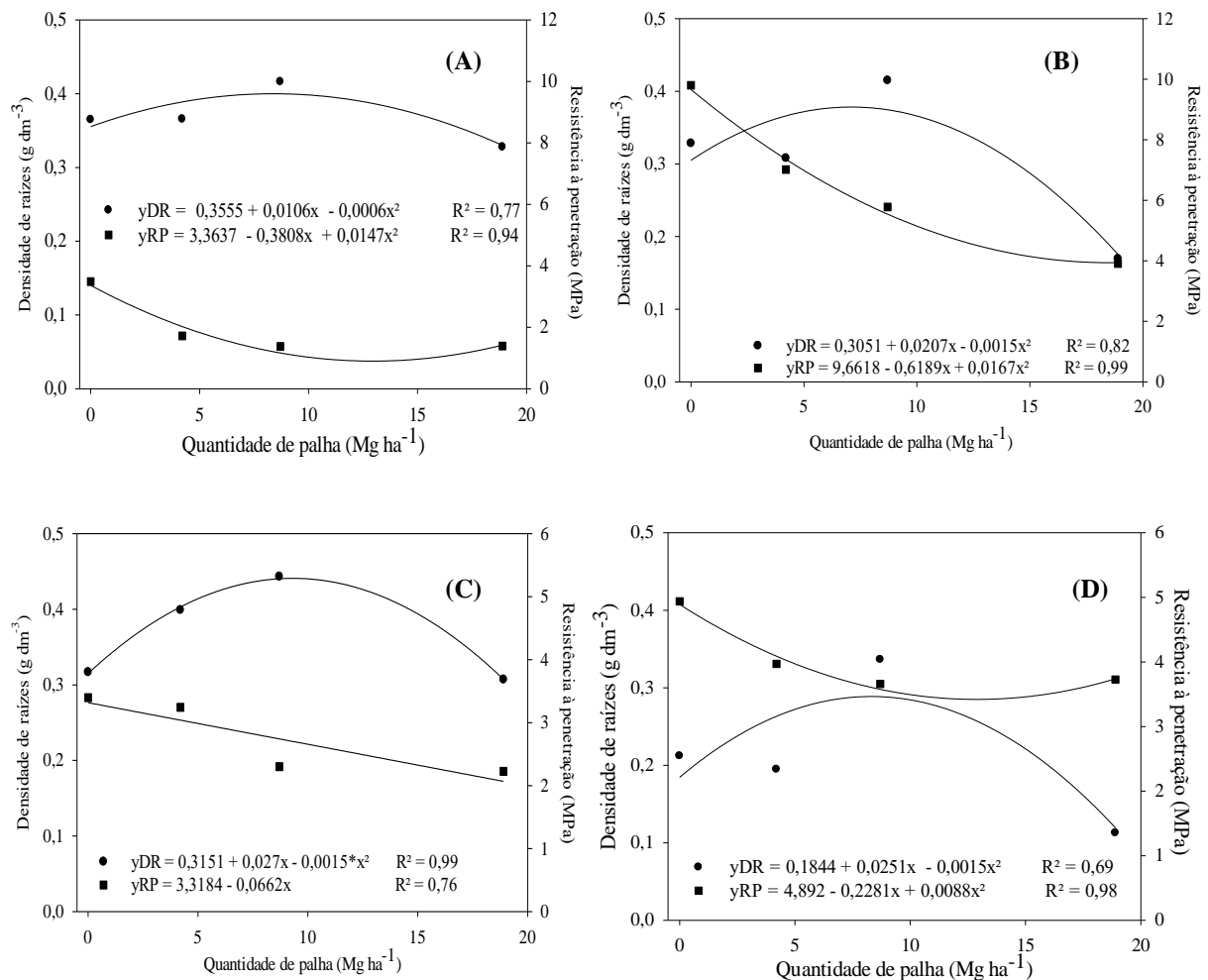


Figura 15. Curvas de regressão para as variáveis densidade de raízes e resistência à penetração para a camada 0-20 cm dentro e entre linhas duplas (A e B, respectivamente) e a camada 20-40 cm dentro e entre linhas duplas (C e D, respectivamente) por tratamento em um Latossolo Vermelho Distrófico típico (média de três repetições).

Em áreas de produção de cana-de-açúcar, os valores críticos para o desenvolvimento ideal do sistema radicular são variáveis. Alguns fatores são levados em consideração para o estabelecimento de valores críticos, os quais podem interferir no desenvolvimento das raízes, como a densidade do solo, teor de água do solo, textura, entre outros (Assis et al. 2009; Lima et al, 2013). Para a cultura do milho, Freddi et al. (2007) observaram que valores entre 1,03 e 5,69 MPa provocaram alterações na morfologia do sistema radicular da cultura, reduzindo sua produtividade.

Para a cana-de-açúcar, Lapen et al. (2004) considerou 2,5 MPa um valor crítico para o desenvolvimento das raízes, enquanto Rossini (2014) toma como 4 MPa de resistência ao solo à penetração o valor crítico ao crescimento das raízes. Alguns estudos como os de Tormena et al. (1998) e Beutler et al. (2007), realizados em Latossolos, consideraram valores de resistência a penetração acima de 2,0 MPa limitante para o crescimento radicular, valor

também acatado como limitante ao desenvolvimento das raízes de cana-de-açúcar nos estudos de Otto et al. (2011) e Baquero et al. (2012).

Para a camada 0-20 cm, as regressões tanto para os dados coletados na entrelinha de 0,90 m (Figura 15A) quanto na entrelinha de 1,50 m (Figura 15B) indicaram que a densidade de raízes apresentou uma correlação com ajuste negativo, enquanto que para a resistência à penetração o ajuste exposto foi positivo. Os dados se ajustaram bem a esses modelos, principalmente para a resistência à penetração, com coeficiente de determinação acima de 90%, porém com pouca significância.

Considerando 2 MPa o valor crítico ao crescimento de raízes, pode-se inferir que as quantidades crescentes de palha empregadas no presente estudo promoveram a redução da resistência à penetração na entrelinha de 0,90 m na camada 0-20 cm, à níveis considerados não limitantes para o desenvolvimento do sistema radicular (Figura 15A).

O ajuste para a camada 20-40 cm, expresso para a densidade de raízes em ambas as entrelinhas, foi significativo ($p < 0,05$) apenas para a entrelinha de 0,90 m (Figura 15C). Esse mesmo comportamento foi observado para a resistência à penetração na entrelinha de 1,50 m (Figura 15D), enquanto que para a entrelinha de 0,90 m a regressão linear foi a que apresentou melhor ajuste.

O pouco tempo de manejo de remoção da palha (apenas dois anos) e as condições climáticas favoráveis ao desenvolvimento radicular, com chuvas bem distribuídas e com poucos períodos de déficit hídrico, pode ter influenciado negativamente em não expressar a influência entre as variáveis a despeito dos tratamentos.

6.4 Relações entre sistema radicular e parte área da cana-de-açúcar

Em sistemas de produção sem irrigação, a manutenção ou remoção dos resíduos de colheita sobre o solo pode afetar a disponibilidade de água para a cultura e, conseqüentemente, resultar em diferentes efeitos sobre o desenvolvimento e rendimento das culturas. O efeito da manutenção de resíduos sobre a produtividade é variado, indicando que as respostas ao rendimento das culturas são específicas da cultura e do local. Sabe-se, no entanto, que o crescimento e a produção das culturas sob a manutenção de resíduos tende a variar de acordo com a região e dependem de fatores como o tipo de solo, condições climáticas, topografia, quantidade de resíduos e o tempo de cobertura do solo (Linden et al. 2000; Blanco-Canqui et al, 2014).

Para o tratamento sem manutenção de palha as produtividades de raízes (massa de matéria seca) e de colmos (massa de matéria fresca) foram de 2716 kg ha⁻¹ e 122000 kg ha⁻¹, respectivamente. O tratamento com 4,2 Mg ha⁻¹ de palha apresentou aumento de 3% na produtividade de colmos, ainda que a massa de raízes tenha sido reduzida em 6% (Figura 16). O motivo da redução da massa de raízes para este tratamento é desconhecido, tendo em vista um comportamento muito semelhante foi encontrado para o tratamento sem a manutenção de palha, onde, percentualmente, a quantidade de raízes encontrada para ambos foi bastante similar, tanto para a entrelinha de 0,90 m quanto para a entrelinha de 1,50 m.

Maiores produtividades de colmos e de raízes, foram encontrados no tratamento com 8,7 Mg ha⁻¹. Como já comentado anteriormente, aproximadamente 3566 kg ha⁻¹ de raízes foram quantificados para este tratamento, além de mais de 130000 kg ha⁻¹ de colmos. Essa produtividade de colmos representa um acréscimo de 9% em comparação ao tratamento sem palha e 22% a mais quando comparada ao tratamento com 18,9 Mg ha⁻¹ de manutenção de palha.

Uma abordagem quantitativa mais completa pode ser feita por meio do ajuste de funções de resposta (Figura 16). Observou-se a mesma tendência quadrática de incremento tanto da produtividade de massa de raízes quanto de colmo, a partir do aumento da quantidade de palha deixada sobre o solo. Assim, em função dos polinômios obtidos, foi possível o cálculo das quantidades de palha de máxima eficiência (respectivamente, 8,45 e 7,36 Mg ha⁻¹) e da produtividade máxima de raízes (3,23 Mg ha⁻¹) e de colmos (131,67 Mg ha⁻¹) esperadas.

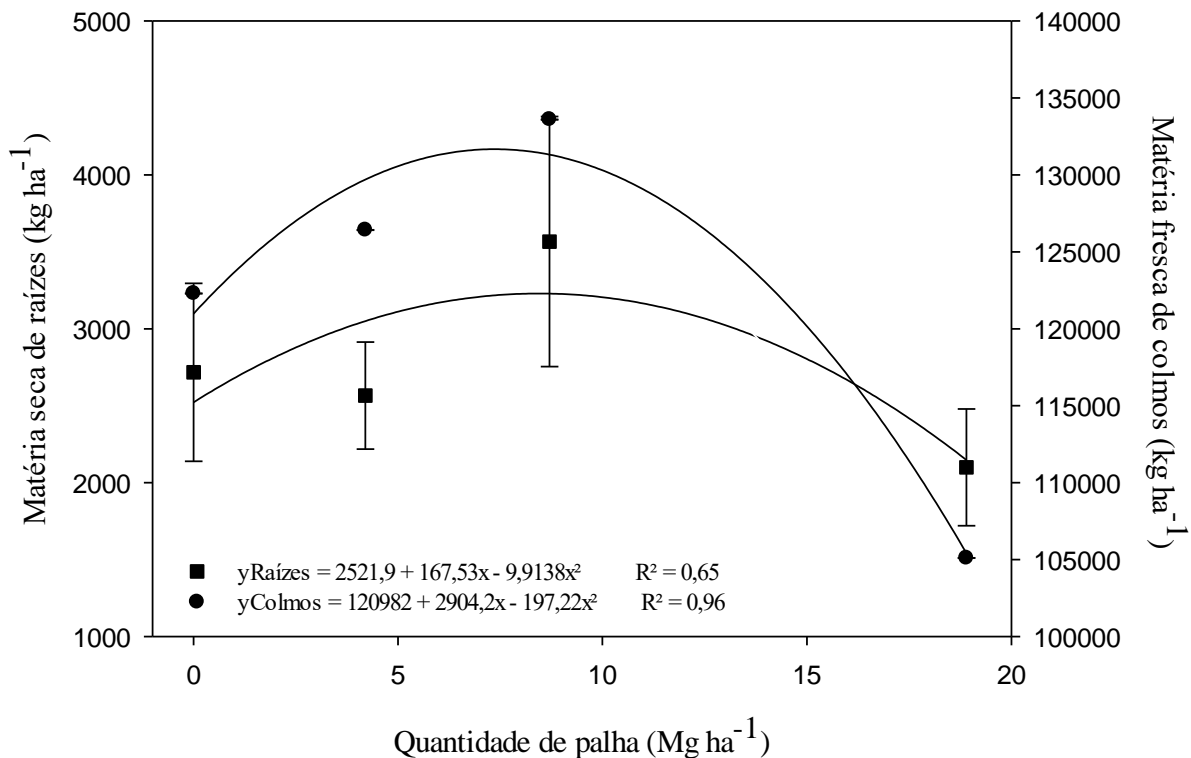


Figura 16. Curvas de regressão ajustadas para a produtividade de massa de matéria seca de raízes e a massa fresca de colmos obtida ao final do ciclo da cana-de-açúcar de primeira soqueira (variedade CTC14), cultivada em função de diferentes quantidades de palha removida.

Da mesma forma, Oliveira et al (2016) ao avaliarem durante dois anos o desempenho agrônomo da variedade RB92579 cultivada com diferentes quantidades de palha em um Latossolo Vermelho distrófico, observaram que, os resultados apresentaram ajuste quadrático com os maiores rendimentos de colmos em tratamentos com quantidades intermediárias de palha. Para o primeiro ano a maior produtividade de colmos foi obtida no tratamento com 9,6 Mg ha⁻¹ de palha, enquanto que para o segundo ano a quantidade de 4,7 Mg ha⁻¹ se mostrou suficiente para promover maior produtividade de colmos da cultura.

Os maiores valores de produtividade de cana-de-açúcar em sistema de manejo de palha também foram apresentados por Aquino et al (2015) com 10 Mg ha⁻¹ de palha sobre o solo (referente a 50% de manutenção) e Watanabe et al (2004) com 8,8 Mg ha⁻¹ de manutenção de palha sobre o solo (referente a 100% do total produzido). No entanto, o uso de quantidades elevadas de palha da cana pode apresentar desvantagens. Estudos realizados por Campos et al (2010) evidenciaram o efeito negativo da palhada, quando o total produzido (10 Mg ha⁻¹) foi deixado como cobertura de solo. Tais efeitos foram notados sobre a rebrota, o acúmulo da biomassa de colmos da cana-de-açúcar e, conseqüentemente, na produtividade

final da cultura. Da mesma forma Resende et al. (2006) observaram que a manutenção da palhada sobre o solo promoveu ganho de 15% na produção de açúcar, excluindo a colheita da cana-planta, e que ao se considerar os 12 ciclos de estudo, esse ganho aumenta para 28%.

Apesar da quantidade de 18,7 Mg ha⁻¹, em comparação ao tratamento com quantidade intermediária de palha, ter apresentado tendência à redução da massa de raízes e sua produtividade de colmos, não foi encontrada relação linear estatisticamente significativa entre essas duas variáveis ($p > 0,05$).

Os resultados de Marques et al (2014) apresentaram efeito significativo da palha com as variáveis biométricas, como número de perfilhos, altura e diâmetro. No entanto, efeitos sobre a produtividade da cana-de-açúcar não foram observados. Os autores justificam que a própria palha possa ter prejudicado a brotação e o perfilhamento da cana-de-açúcar em decorrência de impedimentos físicos, bioquímicos e fisiológicos que a palha poderia promover. Assim, as tendências observadas no presente estudo, decorrentes do tratamento com 18,9 Mg ha⁻¹, podem ter sido resultado de tais fatores.

Em condições de clima temperado, Birrel et al. (2014) alertam que a remoção total destes resíduos não deve ser considerada se não houver frequentes avaliações da fertilidade de solo. Além disso, a maior umidade do solo pode, em parte, compensar as reduções de temperatura se o conteúdo de água no solo for crítico. Neste caso, a manutenção de resíduos sobre o solo resultaria em maiores benefícios para a planta com maiores rendimentos das culturas (Blanco-Canqui and Lal, 2007; Wienhold et al., 2013).

A relação raiz:parte aérea é um indicador importante que reflete a coordenação do crescimento e acumulação de biomassa em raízes e fitomassa aérea. Não foram observadas diferenças estatísticas entre os tratamentos para as variáveis em questão (Tabela 5).

A não restrição hídrica do solo para as plantas sob o tratamento sem palha no período de estudo não foi determinante, e com isso, a tendência observada foi de que as plantas concentraram esforços no desenvolvimento do sistema radicular em relação à parte aérea, apresentando dessa forma um maior valor na relação raiz/parte aérea com 0,094. Além disso, segundo Zuo et al. (2017) o aumento da compactação do solo aumenta a relação raiz:parte aérea. No entanto não se observou relação linear da massa aérea com a resistência a penetração observada dentro ($r=-0,20$, $p>0,22$) ou entre as fileiras duplas ($r = -0,23$, $p>0,19$).

Os menores valores da relação raiz:parte aérea para os tratamentos com 4,2 Mg ha⁻¹ e 18,9 Mg ha⁻¹ (0,075 e 0,059, respectivamente), no entanto, indicam maior desenvolvimento da parte aérea das plantas em comparação ao sistema radicular.

Tabela 5. Massa de matéria seca de raízes, parte aérea e relação raiz/parte aérea (RA/PA – massa de matéria seca da raiz/massa de matéria seca da parte aérea) de plantas de cana-de-açúcar sob diferentes quantidades de palha sobre o solo

Tratamento	Massa seca		Relação
	Raízes	Parte aérea	MS _{raízes} / MS _{parte aérea}
	----- kg ha ⁻¹ -----		
0 Mg ha ⁻¹	2716,99 a	28996,27 a	0,094 a
4.2 Mg ha ⁻¹	2565,55 a	34356,78 a	0,075 a
8.7 Mg ha ⁻¹	3566,42 a	35477,41 a	0,101 a
18.9 Mg ha ⁻¹	2099,25 a	35399,27 a	0,059 a

Letras minúsculas comparam as variáveis dentro de cada tratamento pelo Teste Tukey a 5% de probabilidade.

Estudo realizado por Silva-Olaya et al (2017) observaram relação raiz:parte aérea maior que o observado nesse estudo, principalmente em cana-soca, quando os valores observados pelos autores foram de 0,15 para cana planta, 0,18 e 0,29 para a primeira e quarta soqueira, respectivamente, indicando maior crescimento radicular em virtude do corte da planta. Os maiores valores encontrados nesse estudo podem ser explicados pela profundidade total amostrada (1m) e também pela textura do solo, como comentado anteriormente.

Os resultados obtidos para o tratamento com 100% de remoção de palha (0 Mg ha⁻¹) foram menores somente quando comparados ao tratamento com 8,7 Mg ha⁻¹ de deposição de palha. Este último, além de apresentar maiores valores de massa seca de fitomassa aérea, proporcionou maior massa seca de raízes, refletindo numa maior relação raiz/parte aérea (Tabela 5). Em condições de deficiência hídrica e baixa fertilidade, maiores valores da relação raiz/parte aérea se torna uma vantagem para a cultura. Por outro lado, a relação raiz:parte aérea foi utilizada por Ashraf et al. (2015) como indicador do potencial da planta de translocação de nutrientes entre raízes e parte aérea, em que uma maior relação demonstra que as plantas mantiveram mais recursos nas raízes e, conseqüentemente, menos translocações para colmos.

Os valores encontrados nesse estudo estão de acordo com os resultados encontrados por Korndörfer et al. (1989) que avaliou a massa seca de raízes de cinco variedades de cana-de-açúcar (SP70-1143, SP71-799, SP71-6163, NA56-79 e RB72-5828) em cana planta e cana soca. Os autores encontram maior relação raiz/parte aérea em cana-soca quando comparada à cana-planta. Em ambas as épocas de amostragens a variedade que apresentou maior relação raiz/parte aérea foi a variedade SP70-1143 com 0,102%, mostrando que o comportamento varietal é um fator determinante para estimar essa relação.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Mesmo que de forma discreta, os efeitos sobre o sistema radicular e produtividade da variedade de cana-de-açúcar CTC 14, resultantes da remoção de diferentes quantidades de palhada da superfície do solo observados após a segunda colheita, já sinalizam para a permanência de uma quantidade mínima que favoreceria a cultura da cana.

Houve efeito da remoção da palha sobre a resistência a penetração do solo e a tendência à distribuição mais uniforme do sistema radiucular ao longo do perfil do solo onde 8,7 Mg ha⁻¹ de palha foi mantida. Os resultados obtidos indicam a tendência das produtividades máximas de raízes (3,23 Mg ha⁻¹) e de colmos (131 Mg ha⁻¹) serem obtidas respectivamente, com quantidades em torno de 8,45 e 7,36 Mg ha⁻¹ de palha.

Os resultados obtidos mostram que a realização de estudos a médio e longo prazos são necessários de forma a se obter resultados mais consistentes com relação à essa prática de manejo da palhada resultante da colheita mecanizada e sua influência no sistema radicular. Apesar de favorecer a qualidade física do solo, proporcionando a redução de sua densidade e da resistência à penetração, a curto prazo, não proporcionou aumento significativo da massa de matéria seca de raízes e de fitomassa aérea. Nas condições em que os resultados foram obtidos, a frequente presença das chuvas, em relação à demanda hídrica exigida pela cultura durante o ciclo de cultivo, pode ter sido determinante para o discreto efeito observado.

REFERÊNCIAS

- ActionAid. (2015) O setor sucroalcooleiro brasileiro na atual conjuntura nacional e internacional. Disponível em:
http://www.actionaid.org.br/sites/files/actionaid/setor_sucroalcooleiro_port_rev.pdf.
- Aleixo AP, Kaschuk G, Alberton O (2014) Soil fungal and bacterial biomass determined by epifluorescence microscopy and mycorrhizal spore density in different sugarcane managements. **Cien Rural** 44(4):588-594.
- Almeida JR, Valsecchi O, Gomes FP. (1945) O Florescimento da cana-de-açúcar. **Anais da E.S.A. Luiz de Queiroz**.
- Alvarez IA, Castro PRC, Nogueira MCS (2000) Crescimento de raízes de cana crua e queimada em dois ciclos. **Sci Agric** 57(4):653-659.
- Aquino GS, Medina CC, Porteira Jr AL, Santos LO, Cunha ACB, Kussaba DAO, dos Santos Jr JH, Almeida LF, Santiago AD (2015) Sistema Radicular e produtividade de soqueiras de cana-de-açúcar sob diferentes quantidades de palhada. **Pesq Agropec Bras** 50(12):1150-1159.
- Arthur E, Schjøning P, Moldrup P, Tuller M, de Jonge LW (2013) Density and permeability of a loess soil: Long-term organic matter effect and the response to compressive stress. **Geoderma** 193–194:236–245.
- Ashraf M, Shahzad SM, Arif MS, Riaz M, Ali S, Abid M (2015) Effects of potassium sulfate on adaptability of sugarcane cultivars to salt stress under hydroponic conditions **Journal of Plant Nutrition**, 38:2126–2138.
- Assis R, Lazarini GD, Lanças KP, Cargnelutti Filho, A (2009) Avaliação da resistência do solo à penetração em diferentes solos com a variação do teor de água. **Eng Agríc** 29(4):558-568.
- Awe GO, Reichert JM, Wendroth OO (2015) Temporal variability and covariance structures of soil temperature in a sugarcane field under different management practices in southern Brazil. **Soil Till Res** 150:93–106.
- Azevedo LCB, Sturmer SL, Lambais MR (2014) Early changes in arbuscular mycorrhiza development in sugarcane under two harvest management systems. **Braz J Microbiol** 45(3):995-1005.
- Bacchi OOS (1983) Botânica da cana-de-açúcar. In: Orlando Fo., J. Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil. Piracicaba, IAA Planalsucar, 1983. p.25-37.
- Ball-Coelho B, Sampaio EVSB, Tiessen H, Stewart JWB (1992) Root dynamics in plant and ratoon crops of sugar cane. **Plant Soil** 142(2): 297-305.
- Baquero JE, Ralisch R, Medina CC, Tavares Filho J, Guimarães MF (2012) Soil physical properties and sugarcane root growth in a red oxisol. **Rev Bras Ciênc Solo** 36(1):63-70.

- Barley, K. P. (1970) The configuration of the root system in relation to nutrient uptake. **Advances in agronomy**. 22:159-201.
- Berta G, Trotta A, Fusconi A, Hooker JE, Munro M, Atkinson D, Giovannetti M, Morini S, Fortuna P, Tisserant B, Gianinazzi-Pearson V, Gianinazzi S (1995) Arbuscular mycorrhizal induced changes to plant growth and root system morphology in *Prunus cerasifera*. **Tree Physiology** 15(5):281-293.
- Beutler AN, Centurion JF, Silva AP (2007) Comparação de penetrômetros na avaliação da compactação de latossolos. **Eng Agríc** 27(1):146-151.
- Birrel SJ, Karlen DL, Wirt A (2014) Development of Sustainable Corn Stover Harvest Strategies for Cellulosic Ethanol Production. **Bioenerg Res** 7:509-516.
- Blanco-Canqui H, Ferguson RB, Jin VL, Schmer MR, Wienhold BJ, Tatarko J (2014) Can Cover Crop and Manure Maintain Soil Properties After Stover Removal from Irrigated No-Till Corn? **Soil Sci Soc Am J** 78:1368-1377.
- Blanco-Canqui H, Lal R (2007) Soil and crop response to harvesting corn residues for biofuel production. **Geoderma** 141: 355-362.
- Böhm W (1979) Methods of studying root systems. New York: Springer-Verlag, 189p.
- Brady NC, Weill RR (2013) **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. Brady, Ray R. Well; Tradução técnica: Igo Fernando Lepsch. – 3 ed. – Porto Alegre: Bookman.
- Brandão ED, Silva IF (2012) Formação e estabilização de agregados pelo sistema radicular de braquiária em um Nitossolo Vermelho. **Cien Rur** 42:1193-1199.
- Caieiro JT, Panobianco M, Bessalho Filho JC, Ohlson OC (2010) Physical purity and germination of sugarcane seeds (caryopses) (*Saccharum spp.*). **Rev Bras Sementes** 32(2):140-145.
- Camargo AO, e Alleoni LRF (2006) Reconhecimento e medida da compactação do solo. Disponível em: http://www.infobibos.com/Artigos/2006_2/C6/Index.htm.
- Campos LHF, de Carvalho SJP, Christoffoleti PJ, Fortes C, da Silva JS (2010) Sistemas de manejo da palhada influenciam acúmulo de biomassa e produtividade da cana-de-açúcar (var. RB855453). **Acta Sci Agron** 32(2):345-350.
- Canilha L, Chandel AK, Milessi TSS, Antunes FAF, Freitas WLC, Felipe MGA, da Silva SS (2012) Bioconversion of Sugarcane Biomass into Ethanol: An Overview about Composition, Pretreatment Methods, Detoxification of Hydrolysates, Enzymatic Saccharification, and Ethanol Fermentation. **J Biomed Biotechnol**. 1-15.
- Cantarella, H. Calagem e adubação do milho. (1993). In: Büll, L. T.; Cantarella, H. (ed.) Cultura do milho: Fatores que afetam a produtividade. Piracicaba: POTAFOS, p.147-196.

- Caputo MM, Beauclair EGF, Silva MA, Piedade SMD (2008) Resposta de genótipos de cana-de-açúcar à aplicação de indutores de maturação. **Bragantia**, Campinas. 67:15-23.
- Cardona CA, Quintero JA, Paz IC (2010) Production of bioethanol from sugarcane bagasse: status and perspectives. **Bioresource Technol** 101(13):4754-4766.
- Carneiro AEV, Trivelin PCO, Victoria RL (1995) Utilização da reserva orgânica e de nitrogênio do tolete de plantio (colmo-semente) no desenvolvimento da cana-planta. **Sci. agric.** 52:199-209.
- Carvalho CM, Azevedo HM, Neto JD, Melo EP, Silva CTS, Gomes Filho RR (2008) Resposta dos parâmetros tecnológicos da terceira folha de cana-de-açúcar submetida a diferentes níveis de irrigação. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**. 3:337-342.
- Carvalho JLN, Otto R, Franco HCJ, Trivelin PCO (2013) Input of sugarcane post-harvest residues into the soil. **Scientia Agricola**. 70: 336-344.
- Casagrande AA (1991) Tópicos de morfologia e fisiologia da cana de açúcar. Jaboticabal: FUNEP, 157p.
- Castro PRC, Kluge RA (2001) Ecofisiologia de culturas extrativas: cana-de-açúcar; seringueira; coqueiro; dendezeiro e oliveira. Cosmópolis: Stoller do Brasil, 138p.
- Cenário Agro. (2016) [Em SP, mais de 90% da cana já é colhida sem emissão de poluentes](http://cenarioagro.com.br/tag/protocolo-agroambiental/2016)
Disponível em: <http://cenarioagro.com.br/tag/protocolo-agroambiental/2016>.
- CEPAGRI. Clima dos Municípios Paulistas. Capivari. Disponível em: http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_120.html
- Cesnik R, Miocque J (2004) Melhoramento da cana-de-açúcar. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica. 307p.
- Cherubin MR, Karlen DL, Franco ALC, Tormena CA, Cerri CEP, Davies CA, Cerri CC (2016) Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil. **Geoderma** 267:156-168.
- Chopart JL, Azevedo MCB, Lionel LM, Daniel M (2010) Sugarcane root system depth in three different countries. **Proc Int Soc Sugar Cane Technol** 27:7-11.
- CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar. – v. 4 – SAFRA 2017/18 N.1 - Primeiro levantamento. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>
- COPLANA. Características das Variedades CTC. Resumo. Disponível em: http://www.coplana.com/gxpfiles/ws001/design/Download/VariedadesCana/VariedadeCTC_115.pdf
- Costa MCG, Mazza JA, Vitti GC, Jorge LAC (2007) Distribuição radicular, estado nutricional e produção de colmos e de açúcar em soqueiras de dois cultivares de cana-de-açúcar em solos distintos. **Rev Bras Ciênc Solo** 31(6):1503-1514.

- Couto RF, dos Reis EF, Viana PMF, Holtz V, de Oliveira LA, Alves SMF (2012) Compactação e recalque superficial de um Latossolo Vermelho em condição de campo e laboratório. **Rev Bras Eng Agríc Ambient** 17(11):1239-1245.
- Cury TN, de Maria IC, Bolonhezi D (2014) Biomassa radicular da cultura de cana-de-açúcar em sistema convencional e plantio direto com e sem calcário. **Rev Bras Ciênc Solo** 38(6):1929-1938.
- Debret, J.B. Cana-de-açúcar (1998) In: Grande Enciclopédia Larousse Cultural. Santana de Parnaíba: v.5, Plural. 1240 p.
- Dias MOS, Ensinas AV, Nebra SA, Maciel Filho R, Rossell CEV, Maciel MRW (2009) Production of bioethanol and other bio-based materials from sugarcane bagasse: Integration to conventional bioethanol production process. **Chem Eng Res Des** 87(9):1206-1216.
- Dinardo-Miranda LL, Fracasso JV (2013) Sugarcane straw and the populations of pests and nematodes: a review. **Scientia Agricola**. 70:305-310.
- Diola V, Santos F (2010) Fisiologia. In: Santos F, Borém A, Caldas C (Eds.) Cana-de-açúcar: Bioenergia, açúcar e álcool – Tecnologias e perspectivas. Viçosa, 577 p.
- Doorenbos, J. and Kassam AH. (1994) Efeito da água no rendimento das culturas. Campina Grande: UFPB, 306p. FAO. **Estudos de Irrigação e Drenagem**, 33.
- Dourado Neto D, Timm LC, de Oliveira JCM, Reichardt K, Bacchi OOS, Tominaga TT, Cássaro FAM (1999) State-space approach for the analysis of soil water content and temperature in a sugarcane crop. **Sci Agric** 56(4):1215-1221.
- Duarte CG, Gaudreau K, Gibson RB, Malheiros TF (2013) Sustainability assessment of sugarcane-ethanol production in Brazil: A case study of a sugarcane mill in São Paulo state. **Ecol Indic** 30:119-129.
- EMBRAPA. (2011) Manual de métodos de análise de solo / Centro Nacional de Pesquisa de Solos. – Dados eletrônicos. — Rio de Janeiro : Embrapa Solos, 2011. 230 p.
- Evans H (1935) The root-system of the sugar-cane: I. Methods of study. **Empire J Exp Agric** 3:351-363.
- Fante Jr L, Reichardt K, Jorge LAC, Bacchi OOS (1999) Distribuição do sistema radicular de uma cultura de aveia forrageira. **Sci Agric** 56(4):1091-1100.
- FAO. (2014) Sugar cane. Disponível em:
<http://www.fao.org/docrep/003/w3647e/W3647E03.htm>
- Farias CHA, Fernandes PD, Azevedo HM, Dantas Neto J (2008) Índices de crescimento da cana-de-açúcar irrigada e de sequeiro no Estado da Paraíba. **Rev Bras Eng Agríc Ambient** 12(4):356-362.

- Faroni CE e Trivelin PCO (2006) Quantificação de raízes metabolicamente ativas de cana-de-açúcar. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, 41:1007-1013
- Ferri MG, Menezes NL, Monteiro-Scanavacca WR (1978) Glossário ilustrado de botânica. São Paulo: EBRATEC; EDUSP, 197 p.
- Fioretto RA, Carneiro CEA, Pavan MA, Fioretto CC, Büll LT (2009) The role of sugar cane straw on soil reaction. **Ciênc Agrotec** 33:2069-2074.
- Franco HCJ, Pimenta MTB, Carvalho JLN, Magalhães PSG, Rossell CEV, Braunbeck OA, Vitti AC, Kölln OT, Rossi Neto J (2013) Assessment of sugarcane trash for agronomic and energy purposes in Brazil. **Sci Agric** 70(5):305-312.
- Freddi OS, Centurion JF, Beutler AN, Aratani RG, Leonel CL (2007) Compactação do solo no crescimento radicular e produtividade da cultura do milho. **Rev Bras Ciênc Solo** 31:627-636.
- Galdos MV, Cerri CC, Cerri CEP, Paustian K, Antwerpen, RV (2010) Simulation of sugarcane residue decomposition and aboveground growth. **Plant Soil** 326(1):243-259.
- Gao Y, Xie Y, Jiang H, Wu B, Niu J (2014) Soil water status and root distribution across the rooting zone in maize with plastic film mulching. **Field Crop Res** 156(1):40-47.
- Gascho GJ, Shih SF (1983) Sugarcane. In: Teare L.D. and Peet, M. M. (Ed.). **Crop-water relations**. New York Wiley-Interscience, p. 445-479.
- Głab T (2014) Effect Of soil compaction and N Fertilization on soil pore characteristics and physical quality of sandy loam soil under red clover/grass sward. **Soil Till Res** 144:8-19.
- Goldemberg J, Mello FFC, Cerri CEP, Davies CA, Cerro CC (2014) Meeting the global demand for biofuels in 2021 through sustainable land use change policy. *Energy Police* 69:14-18.
- Herencia JF, García-Galavís PA, Maqueda C (2011) Long-Term Effect of Organic and Mineral Fertilization on Soil Physical Properties Under Greenhouse and Outdoor Management Practices. **Pedosphere** 21(4):443-453.
- IAC. Programa Cana – IAC - Informativo. Acesso em: 05/2017 - Disponível em: http://www.iac.sp.gov.br/areasdepesquisa/cana/page_flip/informativo_centro_cana_deze_mbro_2016.php
- Ido, OT (2003) Desenvolvimento radicular e caulinar, de três variedades de cana-de-açúcar, em rizotron, em dois substratos. **Tese de Doutorado**. Curso de Pós-Graduação em Agronomia – Produção Vegetal, Departamento de Fitotecnia e Fitossanitarismo, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.
- IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

- Korndörfer GH, Primavesi O, Oeuber R (1989) Crescimento e distribuição do sistema radicular da cana-de-açúcar em solo LVA.
- Kuncoro PH, Koga K, Satta N, Muto Y (2014) A study on the effect of compaction on transport properties of soil gas and water. II: Soil pore structure indices. **Soil Till Res** 143:180-187.
- Laclau PB, Laclau JP. (2009) Growth of the whole root system for a plant crop of sugarcane under rainfed and irrigated environments in Brazil. **Field Crops Research**. 114:351–360
- Lapen DR, Topp GC, Gregorich EG, Curnoe WE (2004) Least limiting water range indicators of soil quality and corn production, eastern Ontario, Canada. **Soil Till Res** 78(2):151-170.
- Leal MRLV, Galdos MV, Scarpore FV, Seabra JEA, Walter A, Oliveira COF (2013) Sugarcane straw availability, quality, recovery and energy use: A literature review. **Biomass Bioenergy** 53:11-19.
- Leal MRLV, Walter ADS (2010) Sustainability of the production of ethanol from sugarcane: the Brazilian experience. **Proc Int Soc Sugar Cane Technol** 27:1-11.
- Li H, Shen J, Zhang F, Tang C, Lambers H (2008) Is there a critical level of shoot phosphorus concentration for cluster-root formation in *Lupinus albus*. **Funct Plant Biol** 35(4):328-336.
- Lima RP, León MJ, Silva AR (2013) Compactação do solo de diferentes classes texturais em áreas de produção de cana-de-açúcar. **Rev Ceres** 60(1):16-20.
- Linden DR, Clapp CE, Dowdy RH (2000) Long-term corn grain and stover yields as a function of tillage and residue removal in east central Minnesota. **Soil Till Res** 56:167-174.
- Lisboa IP, Cherubin MR, Cerri CC, Cerri DGP, Cerri CEP (2017) Guidelines for the recovery of sugarcane straw from the field during harvesting. **Biomass Bioenergy** 96:69-74.
- Lynd LR, Laser MS, Bransby D, Dale BE, Davison B, Hamilton R, Himmel M, Keller M, McMillan JD, Sheehan J, Wyman CE (2008) How biotech can transform biofuels. **Nat Biotechnol** 26:169-172.
- Marasca I, Lemos SV, Silva RB, Guerra SPS, Lanças KP (2015) Soil Compaction Curve of an Oxisol Under Sugarcane Planted After In-row Deep Tillage. **Rev Bras Ciênc Solo** 39:1490-1497.
- Marin, F. R. *Árvore do conhecimento: Cana-de-açúcar*. (2009) Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_68_22122006154840.html

- Marques TA, Deltrejo Jr EL, Rampazo EM, Marques PAA (2014) Palhiço, polímero hidrogel e sistemas de plantio nos parâmetros de biometria, tecnologia, energia e produtividade de cana-de-açúcar. **Biosci J** 30:501-511.
- Maule RF, Mazza JA, Martha Jr, GB (2001) Produtividade agrícola de cultivares de cana-de-açúcar em diferentes solos e épocas de colheita. **Sci Agric** 58:295-301.
- MCTI (Ministério da Ciência, Tecnologia e Educação). (2016) Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil - 3ª edição.
- Miller JD. And Gilbert RA. (2009) **Sugarcane Botany: A Brief View**. University of Florida IFAS extension. <http://edis.ifas.ufl.edu/SC034>
- Morgan JA, LeCain DR, Pendall E, Blumenthal DM, Kimball BA, Carrillo Y, Williams DG, Heisler-White J, Dijkstra FA, West M (2011) C4 grasses prosper as carbon dioxide eliminates desiccation in warmed semi-arid grassland. **Nature** 476:202-205.
- Naik SN, Goud VV, Rout PK, Dalai AK (2010) Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review. **Renew Sust Energy Rev** 14:578–597.
- Netafim. Cana-de-açúcar. Disponível em: <http://www.netafim.com.br/crop/sugarcane>. Acesso em 13/06/2017.
- Neumann G, Romheld V (1999) Root excretion of carboxylic acids and protons in phosphorus-deficient plants. **Plant Soil** 211:121-130.
- OECD/FAO, “Perspectivas Agrícolas no Brasil: desafios da agricultura brasileira 2015-2024. 2015.
- Ohashi AYP, Pires RCM, Ribeiro RV, Silva ALBO (2015) Root growth and distribution in sugarcane cultivars fertigated by a subsurface drip system. **Bragantia** 74:131-138.
- Oliveira Filho, FX. (2014) Análise espacial da compactação do solo em área cultivada com cana-de-açúcar./ Francisco Xavier de Oliveira Filho - **Tese (Doutorado em Fitotecnia)**. Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Pró-Reitoria de Pós-Graduação. – Mossoró.
- Oliveira MA, Zucareli C, Neves CSVJ, Domingues AR, Medina CC, Moraes LAA (2016) Agronomic performance of sugarcane cultivated under different amounts of sugarcane straw on the soil surface. **Semin: Cien Agrar** 37(6):3983-3996.
- Otto R, Silva AP, Franco HCJ, Oliveira ECA, Trivelin PCO (2011) High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development. **Soil Till Res** 117:201-210.
- Otto R, Trivelin PCO, Franco HCJ, Faroni CE, Vitti AC (2009) Root system distribution of sugar cane as related to nitrogen fertilization, evaluated by two methods: monolith and probes. **Rev Bras Ciênc Solo** 33:601-611.
- Otto, R. (2012) Desenvolvimento radicular e produtividade da cana-de-açúcar relacionados à mineralização do N do solo e à adubação nitrogenada / 120 p. Piracicaba. **Tese (Doutorado)** – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

- PDEE - Plano Decenal de Expansão de Energia 2024 / Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2015 2v.: il.
- Pryor SW, Smithers J, Lyne P, van Antwerpen R (2017) Impact of agricultural practices on energy use and greenhouse gas emissions for South African sugarcane production. **J Clean Prod** 141:137-145.
- Reichert JM, Reinert DJ, Braida JÁ (2003) Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ci. Amb.**, 27:29-48.
- Reis VM, de Paula MA, Dobereiner J (1999) Ocorrência de micorrizas arbusculares e da bactéria diazotrófica acetobacter diazotrophicus em cana-de-açúcar. **Pesq Agropec Bras** 34(10):1933-1941.
- Resende AS, Santos A, Xavier RP, Coelho CH, Gondim A, Oliveira OC, Alves BJR, Boddey RM, Urquiaga S (2006) Efeito da queima da palhada da cana-de-açúcar e de aplicações de vinhaça e adubo nitrogenado. **R. Bras. Ci. Solo.** 30:937-941.
- Roberto GG, Cunha C, Sales CRG, Silveira NM, Ribeiro RV, Machado EC, Lagôa AMMA (2015) Variation of photosynthesis and carbohydrate levels induced by ethephon and water deficit on the ripening stage of sugarcane. **Bragantia** 74(4):379-386.
- Rodrigues, JD. (1995) Fisiologia da cana-de-açúcar. Botucatu: UNESP. 100 p.
- Roque AAO, de Souza ZM, Barbosa RS, de Souza GS (2010) Controle de tráfego agrícola e atributos físicos do solo em área cultivada com cana-de-açúcar. **Pesq Agropec Bras** 45(7):744-750.
- Rosolem CA (1994) Interpretação de análise de solo e desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar. Seminário sobre tecnologias de manejo do solo e adubação da cana-de-açúcar. Ribeirão Preto. **Anais** 53-73. In: Barbosa, FS. Resistência à seca em cana-de-açúcar para diferentes níveis de disponibilidade hídrica no solo / Fernando da Silva Barbosa. - - Piracicaba, 2010. **Dissertação (Mestrado)** - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2010.
- Rossetto R, Vitti AC, Gava GJC, Mellis EV, Vargas VP, Cantarella H, Prado H, Dias FLF, Landell MGA, Brancalião SR, Garcias JC (2013) Cana-de-açúcar-cultivo com sustentabilidade. **Informações Agronômicas**, nº 142, p. 8 – 13.
- Rossini, DB. (2014) Resistência mecânica à penetração em latossolo vermelho após sucessivos cortes mecanizados de cana-de-açúcar. **Dissertação (mestrado)** - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal.
- Sá JCM, Lal R, Cerri CC, Lorenz K, Hungria M, Carvalho PCF (2017) Low-carbon agriculture in South America to mitigate global climate change and advance food security. **Environ Int** 98:102-112.

- Santos FA, de Queiroz JH, Colodette JL, Manfredi M, Queiroz MELR, Caldas CS, Soares FEF (2014) Otimização do pré-tratamento hidrotérmico da palha de cana-de-açúcar. **Quim Nova** 37:56-62.
- Scardua, R. O clima e a irrigação na produção agro-industrial da cana-de-açúcar (*Saccharum ssp*). 1985, 122p. **Tese (Livre Docência)**. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- Segato SV, Mattiuz CFM, Mozambani AE (2006) Aspectos fenológicos da cana-de-açúcar. In: Segato, S. et al. **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: CP 2,p. 19-36.
- Silva MA, Arantes MT, Rhein AFL, Gava GJC, Kolln OT. Potencial produtivo da cana-de-açúcar sob irrigação por gotejamento em função de variedades e ciclos. *Rev. bras. eng. agríc. ambient.* vol.18 no.3 Campina Grande Mar. 2014
- Silva RB, Iori P, Souza ZM, Pereira DMG, Vischi Filho OJ, Silva FAM. (2016) Contact pressures and the impact of farm equipment on Latosol with the presence and absence of sugarcane straw. *Ciência e Agrotecnologia* 40(3):265-278
- Silva-Olaya AM, Davies CA, Cerri CEP, Allen DJ, Mello FFC, Cerri CC (2017) Quantifying above and belowground biomass carbon inputs for sugar-cane production in Brazil. **Soil Res** DOI: 10.1071/SR16090.
- Sivakumar N (2013) Effect of edaphic factors and seasonal variation on spore density and root colonization of arbuscular mycorrhizal fungi in sugarcane fields. **Ann Microbiol** 63:151-160.
- Smith DM, Inman-Bamber NG, Thorburn PJ (2005) Growth and function of the sugarcane root system. *Field Crops Research*. 92:169-183.
- Smith S, de Smet I (2012) Root system architecture: insights from Arabidopsis and cereal crops. **Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci** 367(1595):1441-1452.
- Souza FR, Bergamin AC, Venturoso LR, Vieira MC, Pellin DMP, Montanari R (2013) Estrutura anatômica de raízes de cana-de-açúcar cultivada em solo compactado. **Agrarian** 6:423-428.
- Souza GS, de Souza ZM, Cooper M, Tormena CA (2015) Controlled traffic and soil physical quality of an Oxisol under sugarcane cultivation. **Sci Agric** 72:270-277.
- Souza RA, Telles TS, Machado W, Hungria M, Tavares Filho J, Guimarães MF (2012) Effects of sugarcane harvesting with burning on the chemical and microbiological properties of the soil. **Agric Ecosyst Environ** 155:1-6.
- Souza ZM, Prado RM, Paixão ACS, Cesarin LG (2005) Sistemas de colheita e manejo da palhada de cana-de-açúcar. **Pesq Agropec Bras** 40:271-278.
- Sparovek G, Schnug E (2001) Soil tillage and precision agriculture: a theoretical case study for soil erosion control in Brazilian sugar cane production. **Soil Till Res** 61:47-54.

- Stirling GR, Halpin NV, Bell MJA (2011) A surface mulch of crop residues enhances suppressiveness to plant-parasitic nematodes in sugarcane soils. **Nematropica** 41:109-121.
- Stolf R (1991) Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Rev Bras Ciên Solo** 15(3):229-235.
- Surendran U, Ramesh V, Jayakumar M, Marimuthu S, Sridevi G (2016) Improved sugarcane productivity with tillage and trash management practices in semiarid tropical agro ecosystem in India. **Soil Till Res** 158:10-21.
- Tormena CA, Silva AP, Libardi PL (1998) Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um latossolo roxo sob plantio direto. **Rev Bras Ciên Solo** 22:573-581.
- Tracy SR, Black CR, Roberts JA, Sturrock C, Mairhofer S, Craigon J, Mooney SJ (2012) Quantifying the impact of soil compaction on root system architecture in tomato (*Solanum lycopersicum*) by X-ray micro-computed tomography. **Ann Bot** 110(2):511-519.
- Unica. (2016) Setor Sucroenergético. FAQ. Disponível em: <http://www.unica.com.br/faq/>.
- Van Dillewijn, C. (1952) **Botany of Sugarcane**. The Chronica Botanica Co.: Book Department. 371 pp. Waltham, MA.
- Vasconcelos ACM, Casagrande AA (2008) **Fisiologia do sistema radicular**. In: Dinardo-Miranda, L. L.; Vasconcelos, A. C. M.; Landell, M. G. A. (Eds). Cana-de-açúcar. Campinas, Instituto Agrônômico, 2008. p. 79-97.
- Vasconcelos ACM, Casagrande AA, Perecin D, Jorge LAC, Landell MGA (2003) Avaliação do sistema radicular da cana-de-açúcar por diferentes métodos. **Rev Bras Ciên Solo** 27:849-858.
- Vasconcelos ACM, Garcia JC (2005) Cana de açúcar: ambientes de produção. Desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar. **Informações Agrônômicas: Encarte técnico**. n. 110, 2005.
- Viator RP, Johnson RM, Grimm CC, Richard Junior EP (2006) Allelopathic, autotoxic, and hormetic effects of postharvest sugarcane residue. **Agronomy Journal**. 98: 1526-1531.
- Watanabe RT, Fioretto RA, Hermann ER (2004) Propriedades químicas do solo e produtividade da cana-de-açúcar em função da adição da palhada de colheita, calcário e vinhaça em superfície (sem mobilização). **Ciências Agrárias**, Londrina, 25:93-100.
- Watt DA, McCormick AJ, Cramer MD (2014) Source and Sink Physiology. In P.H. Moore & F.C. Botha, F.C. (Eds.), **Sugarcane: Physiology, Biochemistry and Functional Biology**. (p.483-520). Oxford: Willey Blackwell.
- Wei CC, Yang PC (1987) Investigations of sugar cane root distribution of two different varieties in the rhizotron. **Taiwan Sugar**. 34:8-11.

Wienhold BJ, Varvel GE, Jin VL, Mitchell RB, Vogel KP (2013) Corn Residue Removal Effects On Subsequent Yield. **Nebraska Beef Cattle Report**. p40.

Wyman, C. E. (2007) What is (and is not) vital to advancing cellulosic ethanol. **Trens in Biotechnology** 25:153-157.

Zuo Q, Kuai J, Zhao L, Hu Z, Wu J, Zhou G (2017) The effect of sowing depth and soil compaction on the growth and yield of rapeseed in rice straw returning field. **Field Crops Research**. 203:47–54

APÊNDICES

APÊNDICE A. Massa de materia seca de raízes para os 9 pontos amostrados no corte transversal à linha de plantio para as quatro profundidades amostradas.

Pontos amostrados									
Prof. (cm)	0 Mg ha⁻¹								
	A1	B1	C1	D1	E	D2	C2	B2	A2
0-20	25,20	79,18	153,70	185,29	134,35	197,46	155,68	103,30	42,15
20-40	23,67	50,96	87,91	176,42	103,46	142,63	122,54	36,10	35,00
40-60	16,12	29,63	49,35	69,41	88,55	96,31	56,84	45,61	13,40
60-80	15,33	24,20	57,06	41,72	108,66	54,06	48,26	31,92	15,55
	4,2 Mg ha⁻¹								
	A1	B1	C1	D1	E	D2	C2	B2	A2
0-20	29,23	77,25	184,53	134,43	80,42	161,23	158,01	59,18	21,00
20-40	17,14	57,11	87,89	113,58	99,99	168,72	163,29	54,70	16,41
40-60	17,43	42,14	38,09	79,49	70,36	136,65	79,38	48,73	15,41
60-80	16,39	32,45	33,08	46,48	42,98	70,00	53,04	43,25	16,13
	8,7 Mg ha⁻¹								
	A1	B1	C1	D1	E	D2	C2	B2	A2
0-20	51,82	125,51	145,66	155,68	117,40	180,31	159,03	146,34	49,67
20-40	33,14	93,45	103,10	224,28	106,47	250,06	140,87	85,92	31,98
40-60	30,69	63,91	75,94	177,69	67,67	192,68	90,67	73,94	26,69
60-80	24,19	50,91	62,97	97,80	69,60	107,27	67,19	59,15	26,80
	18,9 Mg ha⁻¹								
	A1	B1	C1	D1	E	D2	C2	B2	A2
0-20	19,10	55,41	111,23	141,05	88,09	188,68	90,68	68,11	29,03
20-40	14,38	45,23	68,25	91,33	57,24	139,20	89,00	42,89	11,07
40-60	12,18	34,42	45,50	70,52	66,51	78,90	53,57	32,50	14,97
60-80	8,97	27,37	41,07	63,77	53,70	62,13	41,97	27,86	13,37