

ALDIR CARPES MARQUES FILHO

**INTERAÇÃO RODADO-SOLO EM UNIDADE FIXA DE ENSAIOS DE PNEUS
PARA DIFERENTES QUANTIDADES DE PALHIÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR E
MODELOS DE PNEUS**

Botucatu

2021

ALDIR CARPES MARQUES FILHO

**INTERAÇÃO RODADO-SOLO EM UNIDADE FIXA DE ENSAIOS DE PNEUS
PARA DIFERENTES QUANTIDADES DE PALHIÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR E
MODELOS DE PNEUS**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Campus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola.

Orientador: Kléber Pereira Lanças

Botucatu

2021

M357i

Marques Filho, Aldir Carpes

Interação rodado-solo em unidade fixa de ensaios de pneus para diferentes quantidades de palhiço de cana-de-açúcar e modelos de pneus / Aldir Carpes Marques Filho. – Botucatu, 2021

145 p. : il., tabs., fotos

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu

Orientador: Kléber Pereira Lanças

1. Solos Compactação. 2. Pneus Desempenho. 3. Biomassa vegetal. I. Título.

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

Essa ficha não pode ser modificada.

Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que seja citada a fonte.


CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

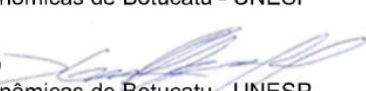
TÍTULO DA TESE: INTERAÇÃO RODADO-SOLO EM UNIDADE FIXA DE ENSAIOS DE PNEUS PARA DIFERENTES QUANTIDADES DE PALHIÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR E MODELOS DE PNEUS

AUTOR: ALDIR CARPES MARQUES FILHO


ORIENTADOR: KLEBER PEREIRA LANÇAS

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em ENGENHARIA AGRÍCOLA, pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. KLEBER PEREIRA LANÇAS (Participação Virtual)
Engenharia Rural e Socioeconomia / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu - UNESP


Prof. Dr. PAULO ROBERTO ARBEX SILVA (Participação Virtual)
Engenharia Rural e Socioeconomia / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu - UNESP


Prof. Dr. ALBERTO KAZUSHI NAGAOKA (Participação Virtual)
Engenharia Rural / Universidade Federal de Santa Catarina


Prof. Dr. MURILO BATTISTUZZI MARTINS (Participação Virtual)
Agronomia / Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul


Prof. Dr. REGINALDO BARBOZA DA SILVA (Participação Virtual)
Coordenadoria Executiva / Unesp/ Registro

Botucatu, 24 de novembro de 2021

*À minha esposa Deise B. Raimundo e ao meu amado filho Aldir Carpes Marques Neto,
pelo apoio incondicional e pela confiança em todos os momentos desta caminhada...*

Dedico

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela proteção e por acompanhar os meus passos e de minha família.

À toda minha família, em especial ao meu pai Aldir Carpes Marques (*in memoriam*), que de algum lugar está acompanhando nossa caminhada, e à minha amada mãe Luisa Magna Goya Marques, pela vida, pelo incentivo, pelo exemplo e por tudo que já fez por mim.

Às minhas queridas irmãs Karen, Karluzi, Karliane e Alessandra pela amizade verdadeira, pela união em todos os momentos e pelo apoio em todos os projetos.

Ao professor Dr. Kléber Pereira Lanças, exemplo que levarei para a vida, de professor e de ser humano, pelos ensinamentos acadêmicos, pela oportunidade de realização do doutorado no NEMPA e por todo apoio durante a jornada em Botucatu.

Ao meu primeiro mestre, orientador de graduação prof. Dr. Alberto Kazushi Nagaoka, pelos incentivos constantes para o ingresso na pós-graduação e pelo encaminhamento para a FCA UNESP/Botucatu.

Aos amigos e professores doutores Simone Sartório e Sérgio Medeiros pelas palavras de apoio e incentivo, pelas orientações acadêmicas e pelo apoio estatístico nas análises deste trabalho.

A todos os professores da pós-graduação FCA/UNESP que contribuíram para meu aprendizado, crescimento pessoal e acadêmico. Em especial ao professor Dr. Paulo Roberto Arbex Silva, por todos os conhecimentos transmitidos, apoio acadêmico, confiança e incentivo ao longo do período de doutorado.

Aos colegas do Núcleo de Ensaios de Máquinas e Pneus Agrofloretais (NEMPA) Michel dos Santos Moura, Fellippe Aaron Damasceno, André Melo, Fernanda Drudi, Miguel Pascucci, Daniel Roveri Balestrin, José Tomba Neto, Vítor Coiado Fittipaldi e Gabriel Cassini.

Aos colegas Murilo Battistuzzi Martins, João Vítor Testa e Jefferson Sandi pelos ensinamentos, orientações iniciais na pós-graduação e pela amizade.

Aos colegas do Grupo de Plantio Direto (GPD) e Agroefetiva, obrigado pela parceria, pela boa convivência, troca de conhecimentos e boas conversas.

Ao colega Emanuel Rangel Spadim, grande mestre em eletrônica e instrumentação, pelos ensinamentos e pela parceria em diversos trabalhos ao longo do período de doutoramento.

À equipe da Bridgestone-Brasil pelo apoio financeiro nos ensaios e pela parceria na execução dos testes avaliativos na Unidade Fixa de Ensaios de Pneus. Em especial aos senhores William Oliveira Martins; Roberto Ayala Frias Jr., Pedro Paulo Hettshmeir, Henry Ishihara Paiva e Juliana Santos Rosa Guapo.

À toda equipe do departamento de engenharia rural da FCA-Botucatu, e ao departamento de pós-graduação pelo apoio ao longo da jornada.

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

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para que este trabalho ocorresse.

Meus sinceros agradecimentos a todos!

“...ha sido la rueda la protagonista de diez mil años de transporte artificial. El hombre ha pretendido, utilizando la rueda, solucionar todos sus problemas de transporte terrestre y no siempre los resultados se han acercado a su pretensión. El transporte sobre un medio natural, íntimamente ligado a la producción agrícola, ha sido el verdadero desafío que la rueda, poco a poco, intenta superar.”

MÁRQUEZ, L. **Tractores Agrícolas: Tecnología y utilización.** Blake y Helsey España S.L., Ed. BMeB, Madrid, 2012, 844p.

RESUMO

A cobertura vegetal possui interferência direta nos processos de compactação do solo. No caso da cana-de-açúcar, a cada ciclo de colheita são deixados no campo elevadas quantidades de palhiço. O presente trabalho objetivou realizar um estudo em condições de laboratório, da interação rodado-solo em função de diferentes quantidades de palhiço de cana-de-açúcar, remanescente da operação de colheita, utilizando diferentes modelos construtivos de pneus em amostras de Latossolo Vermelho Amarelo. Os ensaios foram realizados em superfícies rígida, composta por mesa de aço e cartolina, e deformável composta por tanques de solo padronizados com o equivalente a 0, 15 e 30Mg ha⁻¹ de palhiço em cobertura (0, 50 e 100% da biomassa remanescente pós-colheita). Foram avaliados três modelos de pneus de veículos de carga na cana-de-açúcar, sendo eles, P1 rodado duplo de caminhão (2 x 275/80R22.5); P2 radial (600/50R22.5) e P3 diagonal (600/50-22.5). Os dados foram analisados através de métodos estatísticos paramétricos e coeficientes de determinação. Os resultados mostraram que a relação de área total/área de garras foi de 66,9% em P1, 34,8% em P2 e 54,8% em P3. Independentemente do modelo de pneu utilizado, a quantidade de palhiço sobre o solo atenuou o impacto dos rodados em subsuperfície e aumentou linearmente a área de interação rodado-solo ($r^2=0,98$). A resistência à penetração do solo mostrou-se linearmente inversa ($r^2=0,97$) à quantidade de palhiço na cobertura. O pneu P1 teve um acréscimo de 15 e 36% na área de contato com 15 e 30Mg ha⁻¹ em cobertura. Em P2, esse incremento foi de 6 e 38%, e P3 em 9 e 22% nas mesmas condições. O pneu P3, em superfície com 30Mg ha⁻¹, apresentou área de contato superior a P2 com 15Mg ha⁻¹, o que indicou que a tecnologia diagonal pode superar a tecnologia radial em relação à área de contato em função da cobertura vegetal do solo.

Palavras-chave: ensaios; compactação; rodados; biomassa;

ABSTRACT

Straw cover has a direct interference in compaction soil processes. In sugarcane crop, at each harvest cycle, high amounts of straw are left in the field. The present research aimed to carry out a study, under laboratory conditions, of the wheeled-soil interaction as a function of different amounts of sugarcane straw, remaining from the harvesting operation, using different constructive models of tires in samples of Red-Yellow Latosol. The tests were carried out on rigid surfaces, consisting of a steel table and cardboard, and deformable surfaces consisting of standardized soil tanks with the equivalent of 0, 15 and 30Mg ha⁻¹ of covered straw (0, 50 and 100% of the remaining biomass post-harvest). Three models of sugarcane cargo vehicle tires were evaluated, namely, P1 double wheeled truck (2 x 275/80R22.5); radial P2 (600/50R22.5) and Bias tire P3 (600/50-22.5). Data were analyzed using parametric statistical methods and coefficients of determination. The results showed that the total area/claw area ratio was 66.9% in P1, 34.8% in P2 and 54.8% in P3. Regardless of the tire model used, the amount of straw on the ground attenuated the impact of wheelsets on the subsurface and linearly increased the area of wheelbase-ground interaction ($r^2=0.98$). The resistance soil penetration was linearly inverse ($r^2=0.97$) to the amount of straw in the coverage. The P1 tire had an increase of 15 and 36% in the contact area with 15 and 30Mg ha⁻¹ in coverage. In P2, this increase was 6 and 38%, and P3 in 9 and 22% under the same conditions. The P3 tire, on a surface with 30Mg ha⁻¹, presented a contact area greater than P2 with 15Mg ha⁻¹, which indicated that the bias surpasses the radial technology in relation to contact area due to the vegetal coverage of the soil.

Keywords: tests; compaction; wheels; biomass.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Resumo das principais operações mecanizadas em cada fase produtiva da cana-de-açúcar.....	27
Figura 2 - Plantadoras mecanizadas de cana-de-açúcar. Esq. máquina autopropelida e direita plantadora rebocada por trator agrícola.....	31
Figura 3 - Evolução da participação percentual da colheita manual na cultura da cana-de-açúcar nas principais regiões produtoras do Brasil	32
Figura 4 - Logística de um sistema de colheita, transporte e transbordo de cana-de-açúcar.....	33
Figura 5 - Transbordo para colheita com alta capacidade de carga (45Mg) e 7 eixos direcionais equipados com pneus diagonais	35
Figura 6 - Novos modelos de veículos de transbordo montados sobre chassi de caminhão com rodados duplos e pneus rodoviários de carga.....	36
Figura 7 - Pneus utilizados nos ensaios: (a) P1 - 275/80R22.5 (duplo); (b) P2 - 600/50R22.5; (c) P3 - 600/50-22.5	52
Figura 8 - Unidade Fixa de Ensaio de Pneu.....	53
Figura 9 - Rodado montado na UFEP, apoiado sobre a superfície metálica durante os ensaios em superfície rígida (ESR)	54
Figura 10 - Imagem da área de contato em superfície rígida, em cartolina para cálculo de áreas de contato total e de garras.....	55
Figura 11 - Montagem manual dos tanques de solo, peneira (esquerda) e sistema de compactação controlada em camadas de solo (direita)	56
Figura 12 - Montagem dos tanques de solo em diferentes superfícies, sem cobertura (S1) esquerda, com 15Mg ha ⁻¹ de palhico (S2) centro, com 30Mg ha ⁻¹ de palhico de cana-de-açúcar (S3) direita.....	57
Figura 13 - Instrumentação do Scanner laser (UFEP)	58
Figura 14 - Penetrômetro utilizado para a coleta dos dados de resistência à penetração do solo.....	59
Figura 15 - Pontos de avaliação da resistência à penetração em função do recalque apresentado por cada modelo de rodado após testes na UFEP.....	60
Figura 16 - Área de contato em superfície rígida proporcionada pelos pneus P1 (275/80R22.5-duplo); P2 (600/50-R22.5) e P3 (600/50-22.5) na UFEP.....	62

Figura 17 - Área de contato em superfície rígida proporcionada pelos pneus P1 (275/80R22.5 Duplo); P2 (600/50R22.5) e P3 (600/50-22.5) na UFEP .	63
Figura 18 - Área de contato e recalque do Pneu P1 - 275/80R22.5 (Duplo) em tanque sem cobertura vegetal (a); cobertura vegetal equivalente a 15Mg ha ⁻¹ (b) e 30 Mg ha ⁻¹ (c) de palhiço em cobertura.	65
Figura 19 - Índice de cone médio gerado pelo pneu P1 (275/80R22.5 - duplo) em tanque com 0, 15 Mg ha ⁻¹ e 30 Mg ha ⁻¹ de palhiço em cobertura.....	66
Figura 20 – Coeficiente de Determinação (r ²) e teste de Tukey para área de contato e resistência à penetração do solo nos ensaios com o pneu P1 (275/80R22.5-Duplo) em tanque com 0, 15Mg e 30 Mg ha ⁻¹ de palhiço em cobertura.....	69
Figura 21 - Coeficiente de Determinação (r ²) para a deformação causada pelo pneu P1 – 275/80R22.5 para as variáveis de comprimento, largura e profundidade do recalque em função das quantidades de 0; 15 e 30 Mg ha ⁻¹ de palhiço em cobertura.	70
Figura 22 - Área de contato e recalque do pneu P2 - 600/50R22.5 em tanque sem cobertura vegetal (a); com cobertura vegetal equivalente a 15Mg ha ⁻¹ (b) e 30 Mg ha ⁻¹ (c) de palhiço em cobertura.	72
Figura 23 - Índice de cone médio gerado pelo pneu P2 (600/50R22.5) em tanque sem cobertura vegetal; com 15 e 30 Mg ha ⁻¹ de palhiço em cobertura.	73
Figura 24 - Coeficiente de Determinação (r ²) e teste de Tukey para área de contato e resistência à penetração do solo com o pneu P2 (600/50R22.5) em tanque com 0, 15 e 30 Mg ha ⁻¹ de palhiço em cobertura.....	75
Figura 25 - Coeficiente de Determinação (r ²) para a deformação causada pelo Pneu P2 – 600/50R22.5 para as variáveis de comprimento, largura e profundidade do recalque em função das quantidades de 0; 15 e 30 Mg ha ⁻¹ de palhiço em cobertura.	76
Figura 26 - Área de contato e recalque do pneu P3 - 600/50-22.5 em tanque sem cobertura vegetal (a); com cobertura vegetal equivalente a 15Mg ha ⁻¹ (b) e 30 Mg ha ⁻¹ (c) de palhiço em cobertura.	78
Figura 27 - Índice de cone médio gerado pelo pneu P3 600/50-22.5 em tanque sem cobertura vegetal; com 15 e 30 Mg ha ⁻¹ de palhiço em cobertura.	79
Figura 28 - Coeficiente de Determinação (r ²) e teste de Tukey para área de contato e resistência à penetração do solo nos ensaios com o pneu P3 (600/50-	

22.5) em tanque com 0, 15 e 30 Mg ha ⁻¹ de palhico em cobertura.	81
Figura 29 - Coeficiente de Determinação (r ²) para a deformação causada pelo Pneu P3 (600/50-22.5) para as variáveis de comprimento, largura e profundidade do recalque em função das quantidades de 0; 15 e 30 Mg ha ⁻¹ de palhico em cobertura.....	82
Figura 30 - Coeficiente de Determinação (r ²) entre a área de contato total em diferentes coberturas de solo para P1, P2 e P3.....	84
Figura 31 - Coeficiente de Determinação (r ²) da resistência à penetração do solo no ponto central do recalque PC, valores médios para cada modelo de pneu (P1, P2 e P3) nas superfícies com 0, 15 e 30 Mg ha ⁻¹ de palhico em cobertura.	89
Figura 32 - Coeficiente de Determinação (r ²) da resistência à penetração do solo nos pontos transversais (PT1 e PT2) do recalque; valores médios para cada modelo de pneu (P1, P2 e P3) em função de diferentes quantidades de palhico.....	90
Figura 33 - Coeficiente de Determinação (r ²) da resistência à penetração do solo nos pontos longitudinais (PL1 e PL2) do recalque; valores médios para cada modelo de pneu (P1, P2 e P3) em função de diferentes quantidades de palhico.....	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características dos pneus utilizados nos ensaios de interação com diferentes superfícies	52
Tabela 2 - Análise física do Latossolo Vermelho Amarelo (Botucatu-2020).....	55
Tabela 3 - Análises do teor de água e densidade dos tanques de solo em cada tratamento	57
Tabela 4 - Teste de médias para a variável área de contato total pneu-solo para os modelos P1, P2 e P3 nas superfícies S1, S2 e S3.....	84
Tabela 5 - Teste de médias para a variável comprimento do recalque no solo para os modelos P1, P2 e P3 nas superfícies S1, S2 e S3.....	86
Tabela 6 - Teste de médias para a variável largura do recalque no solo para os modelos P1, P2 e P3 nas superfícies S1, S2 e S3.....	87
Tabela 7 - Teste de médias para as resistências à penetração do solo, obtidas nos pontos PC-Ponto Central, PL-Pontos Longitudinais e PT-Pontos Transversais, gerados pelos pneus P1, P2 e P3 nas superfícies S1, S2 e S3.....	88

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	25
2.1	O setor sucroenergético brasileiro	25
2.2	Operações mecanizadas na cultura da cana-de-açúcar	26
2.2.1	Preparo de solo na cultura da cana-de-açúcar	28
2.2.2	Plantio mecanizado da cana-de-açúcar	30
2.2.3	Corte, Transbordo e Transporte (CTT).....	31
2.3	Rodados Agrícolas	37
2.3.1	Ensaio com Rodados agrícolas.....	38
2.4	Compactação do solo na cultura da cana-de-açúcar	40
2.5	Resistência à penetração do solo	42
2.6	Relação entre a presença de palhicho e a compactação do solo.....	46
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	52
3.1	Unidade Fixa de Ensaio de Pneus (UFEP).....	53
3.1.1	Ensaio de Superfície Rígida (ESR).....	53
3.1.2	Ensaio de Superfície Deformável (ESD)	55
3.1.3	Perfilômetro digital (<i>Scanner Laser</i>) - UFEP	58
3.1.4	Penetrômetro Eletromecânico.....	59
3.1.5	Teor de Água e Densidade do solo	60
3.2	Análise estatística dos dados.....	61
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	62
4.1	Resultados em Superfície rígida (ESR).....	62
4.2	Recalque e área de contato obtidos nos ESD para o pneu P1 275/80R22.5 em montagem dupla.	65
4.3	Recalque e área de contato obtidos nos ESD para o pneu P2 600/50R22.5.	71
4.4	Recalque e área de contato obtidos nos ESD para o pneu P3 600/50-22.5	77
4.5	Resultados comparativos dos Ensaio em Superfícies Deformáveis (ESD) dos pneus P1, P2 e P3 em relação à diferentes superfícies de solo com 0; 15 e 30 Mg ha⁻¹ de palhicho em cobertura.	83

4.6	Resistência à penetração do solo nos ESD com os pneus P1, P2 e P3 em relação à diferentes pontos do recalque com 0; 15 e 30 Mg ha ⁻¹ de palhiço em cobertura.	87
5	CONCLUSÕES	96
	REFERÊNCIAS	97
	APÊNDICE A - Resultados das análises em superfície deformável para o pneu P1 275/80R22.5 em solo sem cobertura vegetal .	110
	APÊNDICE B - Resultados das análises em superfície deformável para o pneu P1 275/80R22.5 em solo com 15Mg ha ⁻¹ de palhiço de cana em cobertura.....	114
	APÊNDICE C - Resultados das análises em superfície deformável para o pneu P1 275/80R22.5 em solo com 30Mg ha ⁻¹ de palhiço de cana em cobertura.....	118
	APÊNDICE D - Resultados das análises em superfície deformável para o pneu P2 600/50R22.5 em solo sem cobertura vegetal .	122
	APÊNDICE E - Resultados das análises em superfície deformável para o pneu P2 600/50R22.5 em solo com 15Mg ha ⁻¹ de palhiço de cana em cobertura.....	126
	APÊNDICE F - Resultados das análises em superfície deformável para o pneu P2 600/50R22.5 em solo com 30Mg ha ⁻¹ de palhiço de cana em cobertura.....	130
	APÊNDICE G - Resultados das análises em superfície deformável para o pneu P3 600/50-22.5 em solo sem cobertura vegetal ..	134
	APÊNDICE H - Resultados das análises em superfície deformável para o pneu P3 600/50-22.5 em solo com 15Mg ha ⁻¹ de palhiço de cana em cobertura.....	138
	APÊNDICE I - Resultados das análises em superfície deformável para o pneu P3 600/50-22.5 em solo com 30Mg ha ⁻¹ de palhiço de cana em cobertura.....	142

1 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar está presente no Brasil desde o período colonial como uma das principais culturas agrônômicas do país. Historicamente a cana-de-açúcar têm fornecido como produtos principais o açúcar e o etanol, sendo que a representatividade e oferta desses elementos no mercado internacional depende da demanda global e do valor econômico de cada uma das commodities.

Recentemente os processos mecanizados de colheita se intensificaram nas lavouras de cana-de-açúcar, devido principalmente à legislação brasileira, que proíbe a queima dos canaviais antes da operação de colheita. A colheita realizada de forma mecanizada incrementou os rendimentos operacionais desta etapa, porém, trouxe efeitos negativos ao solo, como a compactação, causada fundamentalmente pelo trânsito intensivo de máquinas sobre a área produtiva.

O aumento do peso dos conjuntos mecanizados que entram em contato com o solo, está afetando diretamente a sua estrutura física, reduzindo o crescimento radicular das culturas. O problema da compactação é acentuado em culturas que apresentam ciclo de desenvolvimento semi-perene como a cana-de-açúcar pois, nestes casos, os efeitos da compactação perduram por diversas safras, afetando a sua produtividade. A principal forma de uma máquina converter a potência disponível do motor em tração e trabalho útil é através da interação rodado-solo; entretanto, são escassas as pesquisas que avaliam quantitativamente essa interação nas condições agrícolas brasileiras, o que implica em desconhecimento de fatores relevantes para a preservação estrutural do solo e o aumento de produtividade. Existem diversos modelos de rodados; porém, os mais utilizados são do tipo pneumático, composto por rodas de aço e pneus de borracha.

O modelo construtivo do pneu agrícola, a sua estrutura interna e capacidade de deformação são fatores que influenciam a capacidade de tração das máquinas e o impacto destas no solo ao longo do tempo. Pneus mais largos foram introduzidos no setor canavieiro com o intuito de aumentar a área de contato pneu-solo e reduzir a pressão; porém, novas tecnologias construtivas, com modelos mais estreitos estão em expansão devido, principalmente, à aplicação do conceito de tráfego controlado de máquinas nas lavouras.

Estudos recentes demonstram que além da tecnologia dos rodados e pressão de inflação interna, a cobertura vegetal (palhiço) possui interferência nos processos de

compactação e dinâmica do solo; entretanto, em algumas situações o excesso de material vegetal na superfície da lavoura, sobre as linhas da cultura, pode prejudicar o rebrote, além de favorecer a ocorrência de patógenos. No caso da cana-de-açúcar, a cada ciclo de colheita são deixados no campo elevadas quantidades de palhiço, composto por restos vegetais como folhas secas, restos de folhas verdes, raízes e colmos.

A relação da presença da cobertura vegetal com a compactação se dá no sentido de maior dissipação de cargas no solo pelo aumento da área de contato que esta proporciona, atenuando o estresse causado pelo rodado na estrutura física em subsuperfície.

O recolhimento do palhiço da lavoura é uma alternativa aplicada em algumas unidades sucroalcooleiras, pois o material pode ser aproveitado para a geração de energia em caldeiras, ou mesmo para obtenção do etanol celulósico. Os entraves ao recolhimento do palhiço são o alto custo dessa operação e a diminuição das qualidades estrutural e química do solo.

Embora a rentabilidade seja fator preponderante para o recolhimento do palhiço do campo, diversas pesquisas apontam a importância em manter-se a cobertura vegetal sobre o solo, durante todos os ciclos da cultura, fato que propicia incremento na longevidade e produtividade do canavial.

São raros os trabalhos que buscam avaliar a influência da cobertura vegetal na qualidade física do solo em relação ao trânsito de máquinas. Quantificar a influência do palhiço nos processos de tráfego de máquinas para a cultura da cana-de-açúcar, torna-se de relevante importância, pois fundamenta a decisão relacionada à quantidade ideal possível de ser retirada para aproveitamento na indústria, com menor impacto ao solo.

Considerando a hipótese de que a presença do palhiço na superfície do solo pode atenuar o estresse causado pelos rodados à estrutura física deste, objetivou-se com este trabalho realizar um estudo, em condições de laboratório, das relações rodado-solo em função do tipo de superfície, rígida ou em tanque de solo com diferentes quantidades de palhiço em cobertura e três modelos construtivos de pneus, de forma a quantificar a influência da biomassa vegetal na atenuação da compactação em um Latossolo Vermelho Amarelo na cultura da cana-de-açúcar.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O setor sucroenergético brasileiro

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) é a segunda maior cultura agrícola brasileira em termos de volume econômico de produção, ficando atrás somente da cultura da soja. A cana-de-açúcar apresenta grande potencial para o setor agroindustrial de biocombustíveis e energia, com ênfase para a produção de Etanol, açúcar e seus subprodutos (CONAB, 2021).

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e o setor, tradicionalmente, segue preceitos de preservação ambiental e sustentabilidade dos processos agrícolas. Além do etanol, as unidades produtivas atuam ainda na geração de energia elétrica, contribuindo diretamente para a ampliação e sustentabilidade do processo agroindustrial (CONAB, 2021).

A chegada da cana-de-açúcar no Brasil se deu no início do século XVI, onde o principal produto de origem era o açúcar. Entretanto, foi somente após a década de 1970, com a criação do programa governamental de incentivo ao uso de biocombustíveis “Proálcool” que este setor apresentou significativo crescimento econômico e tecnológico (NASTARI, 2015).

Os programas governamentais de incentivo ao uso do etanol como o Proálcool, surgiram como alternativas à importação da gasolina e redução da dependência externa de combustíveis. No entanto, o setor sucroalcooleiro passou por períodos de alta e baixa rentabilidade ao longo dos anos, influenciado principalmente pela instabilidade do preço do petróleo no mercado internacional e por medidas governamentais de tributação e incentivo à atividade (NEVES e KALAKI, 2015).

O setor sucroenergético cresceu significativamente a partir do surgimento das tecnologias de automóveis bicompostíveis, e do crescimento do preço internacional do açúcar por volta dos anos 2000, porém, a crise econômica internacional de 2008 e 2014 teve forte influência negativa no setor (VIAN et al., 2015). A interferência governamental através de programas energéticos claros e objetivos, bem como o controle dos preços do petróleo no mercado interno são determinantes para a rentabilidade do setor.

Conforme o boletim CEPEA (2021), o aumento do faturamento na cultura da cana-de-açúcar foi de 10,61% em relação à safra passada 2019/20, o que indica um cenário de recuperação econômica, já que a safra anterior sofreu com os efeitos de condições

climáticas adversas. O incremento no faturamento da cultura, ocorreu principalmente em função do acréscimo de 6,89% nos preços reais do combustível e 3,48% em aumento da produção.

2.2 Operações mecanizadas na cultura da cana-de-açúcar

De acordo com Vian et al. (2015), a mecanização agrícola é o processo de utilização de máquinas no campo de maneira integral ou semi-integral, com o objetivo de atuar na realização integral ou parcial das operações agrícolas. Os autores observaram que ocorre uma predominância no portfólio de produtos das empresas fabricantes de máquinas agrícolas, direcionadas à cultura de grãos, fato que pode ser explicado pelo pioneirismo dessas culturas vegetais na adoção de sistemas mecanizados.

As culturas perenes como o café, a laranja e a uva, bem como as lavouras semi-perenes como a cana-de-açúcar, tiveram seu processo de mecanização tardio quando comparadas a culturas tradicionais de grãos, este processo de atraso ocorreu principalmente em países com menor desenvolvimento econômico. Vian et al. (2015) relacionam este fato, principalmente ao baixo custo e disponibilidade abundante de mão de obra nos países em desenvolvimento.

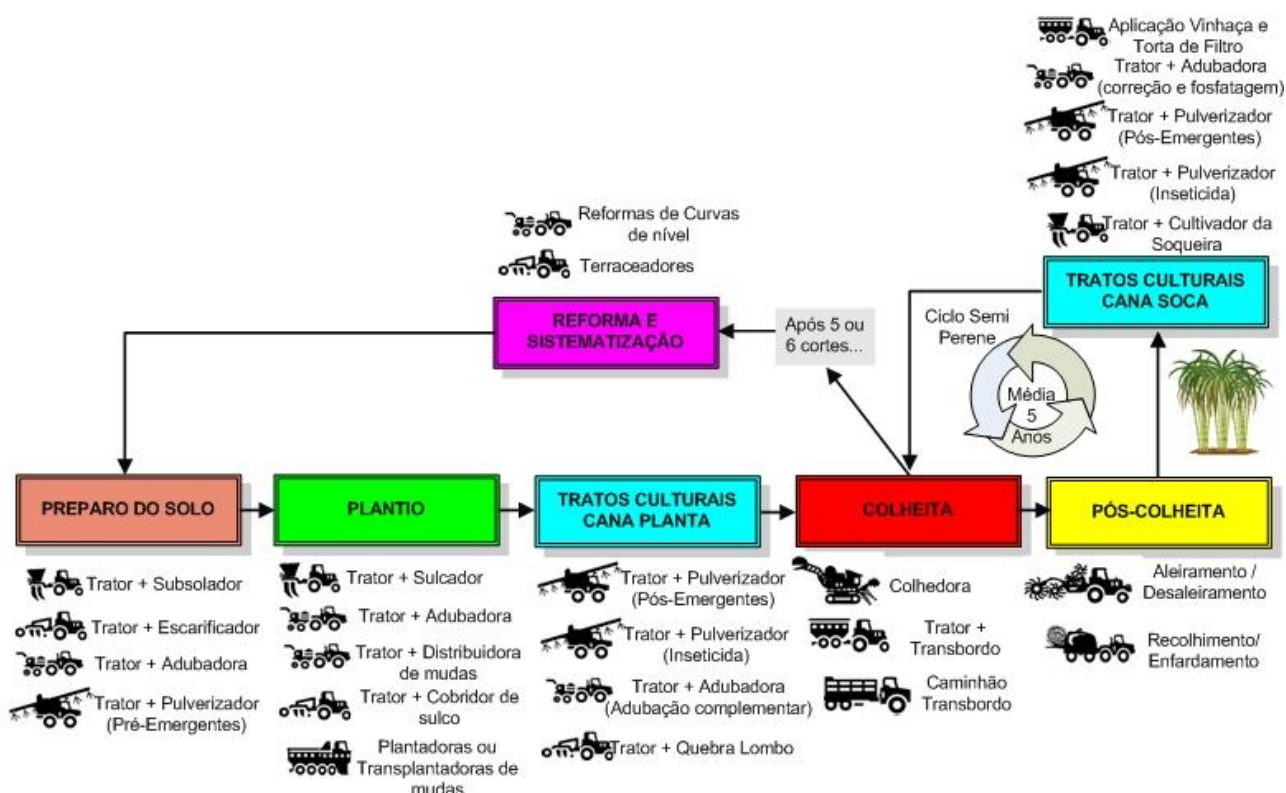
A crescente mecanização na operação de colheita da cana-de-açúcar é oriunda da necessidade de redução de queimadas por imposições ambientais e de legislação, bem como da escassez de mão de obra rural. Dessa forma, a dimensão da produção canavieira no cenário brasileiro e mundial, impulsionou as principais empresas fabricantes de máquinas a desenvolverem soluções específicas para a cultura.

Novas fusões empresariais foram realizadas no setor industrial e produtivo, atualmente o Brasil figura entre os maiores produtores de máquinas da América Latina, abrigando empresas internacionais e passando da situação de importador na década de 1970, para exportador de máquinas na atualidade (VIAN et al., 2015).

A mecanização agrícola na cultura da cana-de-açúcar, trouxe desafios relacionados ao treinamento de um contingente expressivo de operários rurais, que necessitaram de capacitação para trabalharem com as máquinas (NASTARI, 2015). Não menos importantes, estão os desafios de controle da qualidade do corte basal da cultura, evitando a redução da longevidade dos canaviais, bem como, a redução da compactação dos solos ocasionada pelo tráfego de máquinas de alto peso específico.

A cana-de-açúcar, desde o manejo de implantação até a colheita, é uma das culturas que mais sofrem passagens de máquinas, fato que se torna crítico por se tratar de uma cultura de comportamento semi-perene, com vários cortes na mesma área agrícola sem preparo de solo anual (Figura 1).

Figura 1 - Resumo das principais operações mecanizadas em cada fase produtiva da cana-de-açúcar



Fonte: (Marques Filho, 2021)

No sistema de colheita e corte manual da cana-de-açúcar pode-se transportar praticamente cinco linhas de uma lavoura com apenas uma passada das máquinas de transporte. No modelo de colheita mecanizado, são necessários pelo menos cinco vezes mais passagens, envolvendo o trânsito da colhedora e dos veículos de carga. A extensão do período de colheita tradicional que ocorria sempre nos períodos secos, entre maio e outubro no Sudeste, para abril a dezembro em algumas regiões, propiciou que as máquinas transitassem na área agrícola em condições inadequadas de teor de água do solo, impactando negativamente a estrutura deste (MAZZA, 2015).

De acordo com Cunha, Cascão e Reis (2009) a compactação crítica de um solo é dependente do grau de preparo deste, em função de sua granulometria, teor de água e textura. Os autores afirmam que as primeiras passadas da máquina sobre a área produtiva em condições inadequadas, causam severos impactos ao solo. Tal observação ressalta a importância do controle de tráfego, de forma a evitar o trânsito de máquinas sobre as linhas da cultura ou próximo destas.

De acordo com Mazza (2015) o novo cenário de produção da cana-de-açúcar deve contar com uma reengenharia para a sistematização e o preparo de solo, com vistas ao correto alinhamento de plantio da cultura, implantação de terraços para propiciar a conservação do solo e da água, além de estruturar a logística para que a cultura vegetal receba a menor interferência dos rodados das máquinas no seu desenvolvimento.

A sistematização quando realizada de forma racional pode reduzir o impacto das máquinas ao solo, já que a linha da cultura é preservada e mantêm-se o entorno das raízes preservado com pelo menos 50% do volume do solo sem a interferência do trânsito de máquinas. O pisoteio nas linhas de plantio da cultura, promove danos físicos permanentes (MAZZA, 2015).

2.2.1 Preparo de solo na cultura da cana-de-açúcar

O solo como suporte à produção agropecuária deve ser capaz de fornecer meios de sobrevivência para as plantas e animais, bem como apresentar sustentabilidade de rendimentos econômico e ambiental ao longo dos ciclos produtivos. O manejo inadequado do solo produz efeitos a curto prazo como compactação superficial, queda de produtividade, desagregação subsuperficial entre outros, já a longo prazo propicia efeitos degradantes permanentes e problemas ambientais (MOLINA JR., 2017).

De acordo com Sparovek e Maule (2015), historicamente a cana-de-açúcar foi considerada uma cultura protecionista de solo, já que não exigia manejos anuais de revolvimento, e a maioria das operações mecanizadas eram realizadas no período seco. Os autores concluíram que, o fato de a cana-de-açúcar ser consorciada, em alguns casos em rotação de cultura com outras variedades como soja e amendoim, propicia condições adequadas de reestruturação física e biológica do solo. Entretanto, a operação de colheita mecanizada aumenta a intensidade de trânsito de máquinas

pesadas, propiciando o escoamento superficial de água sobre as lavouras, o que cria novos desafios aos processos de sistematização e terraceamento.

O preparo convencional de solo para implantação da cultura da cana-de-açúcar apresenta desafios relacionados ao manejo das máquinas e compactação. A operação de revolvimento do solo, propicia condições adequadas ao desenvolvimento radicular das culturas, porém o solo descoberto apresenta problemas de selamento superficial e maior resistência à penetração nas camadas superficiais do solo (THEODORO et al., 2018). Além disso a operação de preparo é uma das que mais consomem energia (MAMKAGH, 2019b).

A compreensão dos processos de dinâmica do solo relacionados ao uso de máquinas e implantação de culturas agrícolas é fundamental para se obter melhores desempenhos produtivos e econômicos. Bigot, Hoy e Fultz (2019) em estudos sobre a microbiota do solo em lavouras de cana de açúcar, com cultivo em primeiro ciclo e sucessivos períodos de implantação da cultura, mostraram que o cultivo permanente e sucessivo em mesma área agrícola, diminui a microbiota e afeta negativamente a saúde do solo.

O solo como agente trifásico, contendo as frações sólida, líquida e gasosa, apresenta desafios no que concerne à modelos de previsão para determinação de propriedades físicas em condições de estresse, como no caso do trânsito de máquinas. Upadhyaya et al. (1994) e Koolen (1994) em estudos sobre a dinâmica do solo em interação com os tipos de rodados agrícolas, apresentaram modelos matemáticos baseados na teoria dos elementos finitos, com boa correlação para explicar as relações entre tensão e deformação no solo.

O comportamento dinâmico do solo, com alta sensibilidade e susceptibilidade ao dano estrutural, fornece desafios aos fabricantes de rodados, impulsionando a tecnologia em busca de sistemas agrícolas mais eficientes. Novos modelos construtivos de pneus e sistemas de esteiras, visam principalmente a redução no consumo de combustível, aumento de tração e, fundamentalmente, menor influência negativa no desenvolvimento radicular das culturas vegetais.

A preocupação com a estrutura do solo, principalmente relacionada à compactação é relativamente recente e acompanha o desenvolvimento e aplicação das grandes e pesadas máquinas na agricultura. Entretanto, os métodos de avaliação estrutural do solo são bem mais antigos. Dentre os principais métodos, existem os menos precisos

como a avaliação visual do perfil do solo, até os mais precisos que contam com recursos laboratoriais sofisticados.

Grandes propriedades agrícolas, que contam com assistência técnica e sistemas integrados de gestão, no geral aplicam sistematicamente métodos de controle e manutenção da estrutura física do solo, porém em algumas regiões essa característica é ainda negligenciada (PAIVA, RITA e CAVALIERI-POLIZELI, 2020).

O conhecimento de técnicas de manejo do solo e avaliação visual de sua estrutura física ainda são incipientes em algumas regiões agrícolas brasileiras. Métodos práticos visuais servem para determinação das características do solo e de manejo, porém o conhecimento dessas técnicas ainda permanece centrado no meio científico e acadêmico (PAIVA, RITA e CAVALIERI-POLIZELI, 2020).

2.2.2 Plantio mecanizado da cana-de-açúcar

De acordo com Ripoli e Ripoli (2010) o plantio da cana-de-açúcar pode ser mecanizado, manual ou semimecanizado. Na maioria das áreas ainda é realizado de forma semimecanizada, com a sulcação e o preparo de solo em uma operação inicial, seguida pela deposição, alinhamento e cobertura das mudas em etapa posterior.

Para Furlani e Voltarelli (2015), a aplicação da mecanização total em todas as operações agrícolas da cana-de-açúcar torna-se fundamental, já que a mão de obra está cada vez mais escassa e com alto custo no campo, além de que as grandes extensões de terra e as janelas estreitas para o plantio, contribuem para a implementação de sistemas mecanizados (Figura 2).

De acordo com Mialhe (2012), os métodos de plantio de cana-de-açúcar vêm apresentando evoluções constantes, visando principalmente ganhos de rendimento operacional e redução na quantidade de material vegetativo depositado no solo para formação das lavouras. Segundo o autor, os sistemas de mudas pré brotadas e mudas unificadas (isoladas) são tendência para aplicações futuras; entretanto, atualmente esses sistemas ainda não estão completamente estabelecidos.

Figura 2 - Plantadoras mecanizadas de cana-de-açúcar. Esquerda máquina autopropelida e direita plantadora rebocada por trator agrícola.



Fonte: (<https://www.lexicarbrasil.com.br/sermag> e www.ceisebr.com – acesso 04/2021).

A época de plantio ideal para a cultura da cana-de-açúcar é nos meses de janeiro a março, quando existe disponibilidade de radiação, temperatura e umidade. Entretanto, as plantadoras e máquinas com alto peso transitam no solo em condições inadequadas de umidade. O plantio pode ser realizado na estação seca, porém é preciso aplicar técnicas para manter a umidade alta no interior do sulco e viabilizar a brotação das gemas (FURLANI e VOLTARELLI, 2015).

Do ponto de vista de redução no impacto ao solo, a situação ideal seria realizar a operação de plantio na estação seca, porém, as unidades produtivas necessitam escalonar as operações e administrar de acordo com o tempo disponível no planejamento agrícola. Ainda, na estação seca a brotação da cultura é prejudicada ou atrasada, o que faz com que as unidades produtivas tenham que encontrar soluções para a realização da operação com menor impacto possível no solo.

Gírio et al. (2019), observaram que as operações de plantio e os espaçamentos adotados na cana-de-açúcar podem afetar diretamente a qualidade da colheita mecanizada e a logística de máquinas.

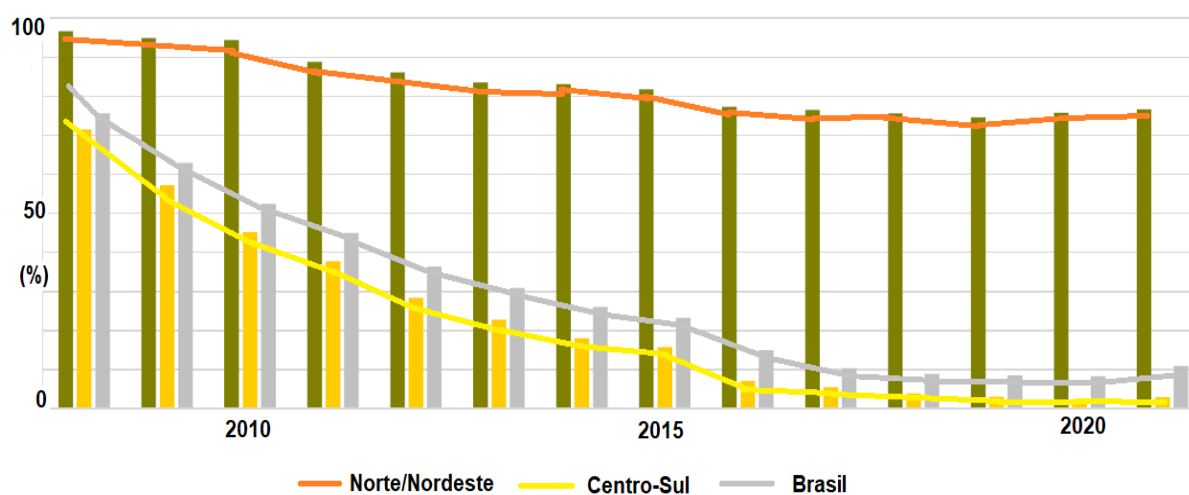
2.2.3 Corte, Transbordo e Transporte (CTT)

A colheita é a etapa que representa o final do ciclo produtivo da cultura, esta operação ocorre quando a cana-de-açúcar atinge seu pico produtivo de Açúcar Total

Recuperável (ATR). De acordo com CONAB (2020), dentre as operações agrícolas de manejo da cana-de-açúcar, a colheita é a etapa que mais sofreu alterações ao longo dos últimos anos (Figura 3), tornando-se a etapa que mais impacta a estrutura do solo, devido à intensidade de uso das máquinas nesta operação.

Verifica-se na Figura 3 que as maiores reduções em termos de colheita manual estão na região centro-sul, pela possibilidade de mecanização, escassez de mão de obra e relevo favorável. No entanto, nas regiões Norte e Nordeste, permanecem os altos percentuais de colheita manual.

Figura 3 - Evolução da participação percentual da colheita manual na cultura da cana-de-açúcar nas principais regiões produtoras do Brasil



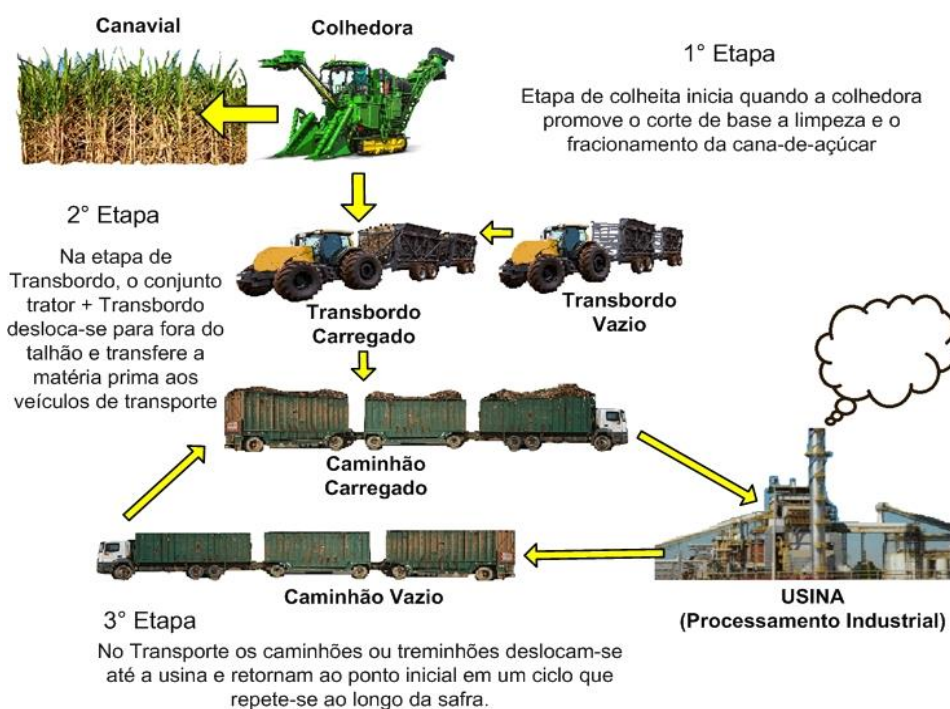
Fonte: Adaptado de CONAB, 2020.

Para Belardo, Rosa e Magalhães (2015), o processo de colheita mecanizada da cana-de-açúcar, quando realizado por colhedoras autopropelidas, envolve etapas bem definidas, iniciando pelo corte dos ponteiros, seguido pelo levantamento, alinhamento e direcionamento dos colmos em direção ao corte de base, transporte dos colmos para o interior da máquina, picagem dos colmos em rebolos, elevação dos colmos e aplicação de ventilação forçada para limpeza e, finalmente a descarga nos veículos de transporte.

De forma simplificada, a colheita é fundamentalmente caracterizada pelas operações de corte dos colmos e o carregamento desses para a indústria de processamento. Milan e Rosa (2015), afirmam que os colmos fracionados são descarregados

simultaneamente em veículos de transbordo, que consistem em carretas acopladas à tratores ou diretamente sobre caminhões de transbordo. Os veículos de transbordo levam a matéria prima até os caminhões do tipo “treminhão” ou “rodotrem” e, finalmente, estes levam os colmos para a usina de processamento (Figura 4).

Figura 4 - Logística de um sistema colheita, transporte e transbordo de cana-de-açúcar



Fonte: (Baseado em Milan e Rosa, 2015).

Diversos trabalhos de pesquisa objetivam quantificar o impacto dos rodados no solo durante a operação de colheita (Silva et al., 2016; JÚNNYOR et al., 2019b), e muitos esforços estão sendo realizados para que as máquinas transitem longe das soqueiras de cana durante as operações agrícolas, principalmente na operação de colheita, onde são utilizados veículos de grande massa e alto poder de impacto no solo.

Uma das alternativas adotadas para a redução do pisoteio nas lavouras é a alteração das bitolas das máquinas, utilizando-se a bitola de 3m para lavouras com espaçamento simples e 2,4m para lavouras com plantio em sistema duplo alternado. Segundo Mialhe (1996) os rodados agrícolas reduzem seu potencial de impacto na compactação do solo na zona radicular da cultura da cana-de-açúcar quando consegue manter um “afastamento seguro” das linhas da cultura. O afastamento

mínimo dos rodados até a linha da cultura, preconizado por Ripoli e Ripoli (2009) foi de 0,25m, de acordo com os autores se essa distância for respeitada o impacto do trânsito de máquinas sobre o desenvolvimento da cultura é mínimo.

A mecanização da colheita favoreceu o rendimento operacional e reduziu a necessidade de mão de obra no campo. Entretanto, durante a operação de corte, colheita e transbordo é que ocorre o maior impacto no solo para as áreas cultivadas com cana-de-açúcar (JÚNNYOR et al., 2019). Estima-se que ocorram mais de 20 passagens de rodados sobre o mesmo local do solo em cada ciclo de colheita, contando com o trânsito da colhedora e dos veículos de transporte e carregamento, fato que impacta diretamente a estrutura física do solo.

Para Melo e Rosa (2015) a operação de colheita, transporte e transbordo apresenta significativa parcela nos custos produtivos totais da lavoura, que fica em torno de 45%, desse total, 44% do custo fica a cargo da colheita mecanizada; 33% para a operação de transporte e 22% para a operação de transbordamento. Entretanto, embora com menor parcela nos custos totais, a operação de transbordamento representa um elo entre a colheita e o transporte, de forma que, se ocorrerem falhas na logística de transbordos, a colheita e o transporte terão seus custos afetados.

Júnnyor et al. (2019), em simulação da compactação do solo na cultura da cana-de-açúcar, atribuíram os maiores riscos de compactação na operação de colheita aos veículos de carregamento. Os autores afirmaram que o risco de compactação do solo, não está apenas relacionado ao modelo de rodados ou tipo de superfície, mas também com relação a gestão da lavoura e o controle do tráfego.

A operação de transbordamento com veículos especiais e conjuntos trator-transbordo ocorre pela impossibilidade de trânsito dos grandes caminhões de transporte dentro da lavoura, já que esses veículos apresentam bitolas inadequadas, alto raio de giro e construção de rodados para uso rodoviário, o que impacta a condição física do solo (MELO e ROSA, 2015).

Os primeiros veículos de transbordo, utilizados no final dos anos 90, eram compostos por apenas um eixo e utilizavam pneus industriais com alta pressão de inflação. Com bitolas de 1,90m ao trafegarem sobre a lavoura ocasionavam pisoteio nas linhas, compactação e redução da produtividade (MELO e ROSA, 2015).

Os modelos de rodados e a distribuição de carga nos veículos de transporte são determinantes no impacto à estrutura do solo. A evolução dos modelos de transbordo baseou-se principalmente na redução da compactação do solo, de forma que foram

inseridos mais eixos e passou-se a utilizar pneus com baixa pressão de inflação. O aumento da área de contato com o solo e as baixas pressões de inflação, propiciaram redução na compactação, porém a falta de controle de tráfego e o pisoteio na soqueira ainda persistiam em algumas unidades produtivas (MELO e ROSA, 2015).

Atualmente, em algumas unidades produtivas, são utilizados transbordos de alta capacidade volumétrica (acima de 15Mg) com diversos eixos direcionais e pneus com maior largura, acima de 500mm e, baixa pressão de inflação, em torno de 270kPa (Figura 5).

Figura 5 - Veículo de transbordo para colheita da cana-de-açúcar com alta capacidade de carga (45Mg) e 7 eixos direcionais equipados com pneus diagonais



Fonte: (www.tma.com.br, acesso em 04/2021)

Novas alternativas de transbordamento estão sendo gradativamente testadas e implementadas, como é o caso dos caminhões adaptados ou “transbordos rodoviários” em substituição aos tradicionais conjuntos trator-transbordo (Figura 6).

A aplicação de transbordos rodoviários nas lavouras de cana, apesar dos problemas de tráfego sobre as linhas devido à bitola inadequada têm sido utilizados com sucesso na colheita mecanizada de cana-muda para plantio, de forma que são mais ágeis e empregam maiores velocidades para entrega do material até o local de plantio, o que permite manter o material propagativo em melhores condições vegetativas (MELO e ROSA, 2015).

Figura 6 - Novos modelos de veículos de transbordo, montados sobre chassi de caminhão e equipados com rodados duplos e pneus rodoviários de carga



Fonte: (Internet: Antoniosi.com.br; civemasa.com.br; automotivebusines.com)

Muitos são os desafios que envolvem a operação de colheita mecanizada da cana de açúcar. Os principais deles estão relacionados ao estudo de mecanismos de corte mais eficientes para evitar danos às soqueiras, e à preservação das características do solo, já que essa cultura exige muitas passagens de sistemas mecanizados ao longo de seu cultivo.

Molin, Amaral e Colaço (2015) afirmam que as novas tecnologias de tráfego de máquinas e agricultura de precisão impactarão profundamente os novos processos agrícolas, contando com sistemas sofisticados de informática e gestão dos processos. Cheong, Kwong e Preez (2009) e Souza et al. (2012) afirmaram que para atenuar a compactação do solo na cultura da cana-de-açúcar, são fundamentais a implantação de sistemas de tráfego controlado de máquinas, e cultivo mínimo localizado, com vistas à preservação da estrutura do solo e manutenção da produtividade.

Segundo Esteban et al. (2019), os processos de controle de trânsito nas áreas agrícolas, permitem o aumento da produtividade da cana-de-açúcar na faixa de 8,2 a 10Mg ha⁻¹. De acordo com Mazza (2015) no atual cenário de manejo da cultura da cana-de-açúcar é fundamental que na operação de colheita os rodados das máquinas transitem somente nas entrelinhas da cultura, garantindo condições adequadas para a permeabilidade da água e desenvolvimento radicular.

O controle de trânsito das máquinas dentro da área agrícola representa uma alternativa promissora dentre as diversas ferramentas para a redução da compactação do solo. De acordo com Souza et al. (2012) nos sistemas de produção de cana-de-açúcar em que se utilizam o piloto assistido e o controle de tráfego, são

observadas maiores densidades de raízes na linha da cultura, além de maior capacidade do solo servir de suporte para a máquina nas entrelinhas da cultura.

2.3 Rodados Agrícolas

Os rodados agrícolas apresentam destacada importância no impacto do trânsito de máquinas nas áreas agrícolas, já que estes servem de suporte para o peso da máquina, bem como meio de transformação da potência do motor em movimento de translação dos veículos (GABRIEL FILHO et al. 2004).

As primeiras máquinas agrícolas possuíam grande relação massa/potência e eram equipadas com rodados de ferro, o que ocasionava uma série de problemas e falhas no desenvolvimento de tração. O surgimento dos primeiros rodados pneumáticos de borracha, que ocorreu por volta de 1930, representou uma verdadeira revolução para o trator e para as máquinas agrícolas, favorecendo a estabilidade e aprimorando a tração, além de reduzir o impacto da máquina sobre o solo. Esta tecnologia representa tanta relevância que pode ser comparada à incorporação do motor ciclo diesel ao trator (MÁRQUEZ, 2012).

De acordo com Marques Filho, Moura e Lanças (2020), os rodados pneumáticos apresentam dois modelos construtivos principais, sendo eles: radiais ou diagonais. Os pneus diagonais possuem lonas internas dispostas transversalmente com ângulos entre 30 e 45°, de forma que as laterais do pneu possuem praticamente o mesmo número de lonas da banda de rodagem, fato que confere ao pneu, um formato ovalado e uma área de contato com o solo em formato elipsoide (CORRÊA et al., 1999). Os pneus de construção radial, possuem lonas dispostas a 90° em relação ao sentido dos talões, e contam ainda com lonas longitudinais à banda de rodagem, o que torna esta rígida e pouco deformável. As laterais macias e a banda de rodagem rígida, conferem aos pneus radiais uma maior área de contato com o solo, em formato preponderantemente retangular.

A correta distribuição das massas da máquina sobre os rodados é determinante para a melhoria da capacidade de tração e eficiência energética do sistema mecanizado (KUMAR, NOORI e PANDEY, 2019). A compreensão das características de tração e desempenho de rodados dependem diretamente de ensaios de campo ou laboratório. Entretanto, poucos são os ensaios abordando o desempenho de rodados em situação estática e dinâmica (SUNUSI et al., 2020).

O conhecimento aprofundado da área de contato do pneu, permite prever o comportamento de tração e a resistência ao rolamento das máquinas agrícolas (TEIMOURLOU e TAGHAVIFAR, 2015; HE, SANDU e OSORIO, 2019). Entretanto, o comportamento estocástico do pneu nos processos dinâmicos, em contato com a superfície plástica do solo, torna desafiadora a tarefa de realizar ensaios relacionados a esta temática.

Segundo Silva et al. (2016) as medidas de área de contato na interface solo-rodado podem ser superestimadas, a depender do método utilizado. Os autores avaliaram áreas de contato diretamente no campo e compararam os resultados com métodos matemáticos de inferência, os resultados apresentaram diferenças significativas entre as diferentes metodologias.

A superfície do solo pode influenciar a capacidade de tração das máquinas, já que é através desta, que a potência disponível no motor é convertida em tração pelos rodados (FIORESE et al., 2015; GABRIEL FILHO et al., 2004; GABRIEL FILHO et al., 2010). No caso dos rodados pneumáticos é necessário trabalhar com a pressão correta e selecionar corretamente o modelo de pneu para cada operação e condição agrícola (MONTANHA et al., 2011; MAMKAGH, 2019).

Novos modelos de rodados que proporcionam maior capacidade de tração, devido à maiores áreas de contato com o solo, estão em plena expansão na agricultura moderna, pois além de realizarem trabalhos mais eficientes, causam menor impacto ao solo. Rasool e Raheman (2018), encontraram melhorias significativas nos coeficientes de tração de um trator agrícola submetido à substituição do rodado pneumático por esteiras de borracha.

2.3.1 Ensaios com Rodados agrícolas

As máquinas agrícolas estão ficando cada vez mais pesadas e seu impacto no solo é proporcional ao aumento de massa (MORAD, AFIFY e EL-SAYEDE, 2007). Os rodados são elementos importantes pois são responsáveis por distribuir as cargas no solo.

Ensaio com pneus e rodados agrícolas são importantes para melhorias nos processos produtivos agrícolas (SUNUSI et al. 2020). A limitação física proporcionada pelo trânsito de máquinas à produtividade das culturas, através da compactação do solo, pode ser melhor compreendida através de testes controlados e ensaios de

desempenho de rodados e pneus, bem como por simulações e previsões obtidas por modelagem matemática (JÚNNYOR et al., 2019).

Outro ponto de vista fundamental no desenvolvimento de testes e ensaios com rodados é a racionalização energética, já que novos modelos construtivos e de tráfego podem impactar na redução dos custos com combustíveis, lubrificantes e operacionais.

Alaoui e Diserens (2018) afirmaram que os ensaios e simulações matemáticas podem auxiliar na previsão de áreas sujeitas ao processo de compactação ou degradação física. Os autores inferiram que aplicar modelos matemáticos para previsão torna-se interessante, pois evita que o processo de degradação física aconteça, evitando preventivamente danos aos solos.

É amplamente reconhecido que a área de contato dos pneus com o solo é determinante na dissipação da carga dinâmica no solo e subsolo (KUČERA, HELEXA e ČEDÍK, 2016; PYTKA et al. 2018; SILVA et al., 2016). Portanto, o desempenho de um rodado na agricultura é dependente da área de contato. De acordo com Chethan et al. (2018), cerca de 20 a 55% da energia disponível em um trator é empregada nas relações da interface solo/rodado.

Mamkagh (2018), em trabalho sobre o consumo energético em operações agrícolas mecanizadas, afirmou que aproximadamente 59% do combustível empregado em um cultivo agrícola está relacionado à operação de preparo de solo em função, principalmente, da alta demanda de tração que estes conjuntos mecanizados exigem. Teimourlou e Taghavifar (2015) em ensaios de avaliação da área de contato total de um pneu em superfície deformável, obtiveram alta correlação entre carga aplicada e área de contato, propondo através de modelo matemático, equação alternativa ao método da super elipse para determinação da área total de contato pneu-solo. Os autores verificaram relação inversa entre a área de contato pneu solo e a pressão de inflação.

Rodados pneumáticos com estrutura mais flexível, apresentam áreas de contato maiores, principalmente quando trabalham em baixas pressões de inflação. A correta seleção da pressão interna, é determinante para o desempenho de tração, consumo de combustível e compactação de solo (MONTANHA et al., 2011; KUČERA, HELEXA e ČEDÍK, 2016).

A durabilidade dos pneus e rodados também é motivo de realização de ensaios controlados. Wen et al. (2020) propuseram modelos diferenciados de ensaios de

fadiga e durabilidade para elementos de máquinas e sistemas agrícolas, já que o ambiente de aplicação destes dispositivos é altamente agressivo e variável.

Novas tecnologias compostas por redes neurais e inteligência artificial permitem fazer simulações com alta confiabilidade na área de eficiência trativa, reduzindo os custos dos ensaios à campo (ALMALIKI, HIMOUD e AL-KHAFAJIE, 2019). Sensores sem fio para avaliação direta de torque e força contribuem para a maior compreensão do desempenho das máquinas agrícolas (CHETHAN et al., 2018) e, sistemas ópticos contribuem para a melhor compreensão de processos dinâmicos da interação rodado-solo (PYTKA et al. 2018; PANKRATH et al., 2019).

Microcontroladores eletrônicos e novas tecnologias de sensores sem fio, aliados a sistemas de comunicação integrados às máquinas podem incrementar o desempenho destas à campo. Gupta et al. (2019), avaliaram sistemas de controle de patinagem nas rodas de um trator agrícola na operação de gradagem e aração, obtendo acréscimo na eficiência de tração em ambas as operações, demonstrando que novos sistemas eletrônicos embarcados, têm contribuído para que a eficiência das máquinas seja aprimorada.

2.4 Compactação do solo na cultura da cana-de-açúcar

Segundo Oliveira Filho et al. (2016), a compactação de solo é um dos principais fatores limitantes ao crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar, pois limita o crescimento radicular e reduz a absorção de nutrientes e água pela planta. Em solos com alta tensão aplicada, a porosidade é severamente reduzida (Yang et al., 2020).

Embora os solos sejam compostos por um conjunto de microagregados, de acordo com Balastreire (1990), os solos são considerados materiais contínuos e deformáveis onde são aplicadas as teorias da elasticidade e da plasticidade, sendo que os esforços devidos a seu próprio peso, somado a forças externas aplicadas, geram tensões em pontos no interior do maciço de solo.

A degradação da qualidade física do solo pode ser correlacionada com a compactação. Do ponto de vista agrícola, esta limitação é um dos principais fatores limitantes ao aumento da produtividade das culturas vegetais de interesse econômico (UNGUREANU, VLĂDUȚ e CUJBESCU, 2019; OLUBANJO e YESSOUFOU, 2019).

Keller (2004), em extensa revisão sobre a estrutura física dos solos, afirmou que a compactação do solo é um problema “ambiental”, que afeta o mundo agrícola. O autor

ainda cita que o impacto das tensões aplicadas no solo, são diretamente proporcionais a área de contato rodado-solo e pressão interna de inflação.

Colombi e Keller (2019), em estudos relacionados ao crescimento radicular e a compactação de solo, concluíram que nos solos compactados as raízes sofrem redução significativa no alongamento, tendo reduzida sua capacidade de absorção de nutrientes e água. Os autores ressaltam que a redução do desenvolvimento radicular torna as culturas vegetais mais sensíveis a períodos de estiagem.

Horn (2015) em pesquisa relacionada à física dos solos agrícolas, inferiu que o processo de compactação, afeta diretamente a dinâmica de gases, nutrientes, água e organismos biológicos. A degradação do solo pode ser um processo irreversível, a depender da intensidade de alteração da sua estrutura.

Alaoui e Diserens (2018) concluíram que a compactação de solo representa um fenômeno altamente variável no tempo e no espaço, e que, sua ocorrência trata-se de um fenômeno global. Os autores propuseram modelos de simulação e interações matemáticas envolvendo as características dos diferentes tipos de solo, com os rodados agrícolas.

Em pesquisa avaliando a dependência espacial da compactação do solo na cultura da cana de açúcar, Souza, Marques Júnior e Pereira (2004) observaram que as condições de relevo estão diretamente ligadas com os atributos físicos do solo e que ferramentas de geoestatística podem ser aplicadas na determinação da compactação do solo, já que as variáveis, em sua maioria apresentam alta correlação espacial.

Kumar, Noori e Pandey (2019), observaram que o aumento de lastro nas máquinas agrícolas de tração, incrementa a potência desenvolvida, favorecendo o aprimoramento energético. Entretanto, o excesso de massa das máquinas impacta o solo de forma irreversível em muitos casos, principalmente quando a operação é realizada em solo com alto teor de água.

Vereecken et al. (2016) em estudos para modelagem de processos dinâmicos do solo, afirmaram que existe uma relação profunda entre o teor de água do solo e a sua densidade global, quando submetido a energia de compactação. É importante notar que, conforme a energia necessária para a compactação aumenta, diminui proporcionalmente a necessidade de água para se obter a máxima compactação do solo, servindo este fato de alerta em relação à utilização de máquinas cada vez mais pesadas em condições de solo úmido.

A mecanização da cana-de-açúcar pode ser realizada com baixo impacto na qualidade física do solo, porém deve ser aplicada no ponto de friabilidade deste. Severiano et al. (2010), em pesquisa relacionando compactação crítica, ponto de friabilidade do solo e teor de água, inferiram que conteúdos de 16% de água em Latossolo vermelho-amarelo e 21% em Cambissolo háplico, servem como limites máximos de friabilidade para que a estrutura física do solo não se torne limitante à produtividade agrícola.

Júnnyor et al. (2019b), afirmaram que o teor de água no solo no momento da colheita mecanizada é fator determinante para o impacto na física do solo durante o trânsito de máquinas. Os autores avaliaram dois preparos, um convencional e outro em profundidade, em ambos o teor de água foi o principal fator influente na física do solo. Beauclair, Tezotto e Manocchio Jr. (2015) descrevem que no manejo da cana de açúcar, o sistema de tráfego controlado propicia melhores condições de infiltração e crescimento radicular na linha da cultura, enquanto na entrelinha o solo permanece firme e compactado, o que favorece a tração das máquinas.

Esteban et al. (2019) em estudo sobre a aplicabilidade do tráfego controlado nas lavouras de cana-de-açúcar, em diferentes espaçamentos de plantio, encontraram acréscimos de 17,9% e 18,5% na massa seca total de raízes para os espaçamentos simples e duplo alternado, respectivamente. Os autores concluíram que a implantação do tráfego controlado promove ganhos na produtividade final da cultura

2.5 Resistência à penetração do solo

A compactação do solo pode ser detectada de diversas formas desde a abertura de trincheiras, com o acompanhamento por métodos visuais, até a aplicação de protocolos laboratoriais precisos e de alto custo. Entretanto, maneiras indiretas de avaliar a compactação foram desenvolvidas nas últimas décadas e vêm apresentando bons resultados, um exemplo dessas técnicas são os penetrômetros e penetrógrafos, que medem a resistência do solo à penetração de uma haste metálica.

Rosolem (1994) afirmou que as plantas em geral não respondem à compactação do solo, e sim à resistência à penetração que este oferece. A resistência à penetração do solo é dependente de variáveis como textura, teor de água e densidade. Para Varón-Ramírez, Camacho-Tamayo e González-Nivia (2018), a resistência à

penetração pode ser associada com o nível de degradação de um solo, e serve de suporte para a determinação de zonas de manejo diferenciadas.

A resistência à penetração do solo pode ser correlacionada com a limitação que o solo oferece ao crescimento radicular das culturas, servindo de subsídio importante para a tomada de decisão relacionada ao manejo do solo e produtividade. A resistência à penetração pode ser estimada em função da densidade do solo e do teor de água em que este se encontra (SOUZA et al., 2021).

Uma das maneiras de se identificar e caracterizar camadas compactadas do solo no campo é com o uso de penetrômetros, na qual a resistência mecânica à penetração que o solo oferece a estes equipamentos pode ser correlacionada com a resistência imposta ao sistema radicular das plantas e a densidade do solo (SÁ; SANTOS JUNIOR, 2005). Os penetrômetros são instrumentos de avaliação indireta do estado de compactação do solo e sofrem influência principalmente com a variação do teor de água no solo (CHANCELLOR, 1981).

O ensaio de resistência à penetração de uma haste no solo pode ser correlacionado com a compactação, já que solos com maior densidade apresentam maiores resistências à penetração do cone. Esta forma de avaliação da compactação é bastante utilizada em termos práticos já que permite que uma grande quantidade de pontos seja obtida em pouco tempo e com baixo custo, quando comparada ao método tradicional de laboratório (GAMERO e LANÇAS, 1996).

Sánchez-Girón, Andreu e Hernanz (1998) evidenciaram que o teor de água no solo está diretamente relacionado com o estado de compactação. A diminuição do teor de água propicia o aumento da intensidade de atritos entre as partículas, este fenômeno é influenciado diretamente pela textura do solo. Desta forma, métodos como o penetrômetro mecânico são afetados em suas leituras pelo efeito lubrificante que a água confere ao sistema solo (ROSIM et al., 2012).

Rossato, Crusciol e Martello (2016) em avaliação de desenvolvimento radicular e absorção de nutrientes pela cultura da cana-de-açúcar evidenciaram que solos de mesma densidade aparente, apresentaram respostas produtivas diferentes em função dos teores de água disponível. Os autores observaram que solos com menor disponibilidade de água, tiveram redução na produção de matéria seca total.

A susceptibilidade do solo à compactação apresenta algumas variações, em função de suas propriedades, tais como teor de água e a textura. A textura influencia no

comportamento de solo sujeitos a pressões externas, pois é assim que determina o atrito entre as partículas e o tipo de ligação entre elas (LIMA; LEÓN; SILVA, 2013).

Rosim et al. (2012) em estudos sobre a compactação em um Latossolo Vermelho Distroférico, observaram que as menores resistências à penetração, foram obtidas em solo com cobertura vegetal. Os autores inferiram que a camada superficial recoberta com material vegetal, manteve os teores de água do solo elevados, reduzindo assim a sua resistência à penetração.

Recentemente a pesquisa na área de solos têm investido energia em modelos matemáticos para estudar a variabilidade e a dependência espacial da resistência à penetração nos solos agrícolas. De forma contrária à estatística clássica, que considera o solo como um meio homogêneo, novas pesquisas mostram os limites de correlação entre amostras vizinhas, levando em consideração a chamada geoestatística ou teoria das variáveis localizadas (IAIA; MAIA e KIM, 2006; FERRARI et al. 2018; OLIVEIRA FILHO et al., 2016).

Adamchuk et al. (2004) em extensa pesquisa com sensores de solo, afirmam que o solo é um ambiente com alta variabilidade e a tomada de informações neste ambiente é tarefa altamente complexa. Os autores, em trabalho com hastes escarificadoras instrumentadas acopladas a hastes de equipamentos de preparo de solo correlacionaram características texturais com sistemas acelerômetros, além de compactação do solo através de sensores strain-gages aderidos nas hastes e quantificando a deformação desta eal.

Nos gráficos de índice de cone é possível correlacionar a pressão exercida pela haste no solo em cada profundidade. Essa ferramenta é de extrema importância já que pode ser relacionada à resistência que o sistema radicular das culturas vegetais vai encontrar para o desenvolvimento. A resistência à penetração também possui relação direta com o teor de água e a densidade do solo.

Sá et al. (2016) em trabalho avaliando a compactação do solo, com e sem escarificação na cultura da cana-de-açúcar, não encontraram diferença estatística da resistência à penetração em Latossolo vermelho argiloso, porém, afirmaram que 3,8MPa de resistência à penetração mostrou-se limitante ao crescimento radicular da cana-de-açúcar. Rosolem et al. (1999), Moraes et al. (2020), Singh et al. (2019), Peixoto et al. (2019), Dzoma et al. (2019) encontraram restrições para o crescimento e desenvolvimento radicular em solos com alta resistência à penetração.

Segundo Reinert et al. (2008) o crescimento das raízes da maioria das culturas vegetais é negativamente afetado com a compactação do solo, fato que colabora com os estudos de Olubanjo e Yessoufou (2019).

Queiroz-Voltan, Prado e Moretti (1998) encontraram deformações no sistema radicular da cana de açúcar em solos compactados. Os autores encontraram altas relações entre a espessura do córtex e a espessura do cilindro vascular (CO/CV) nas raízes dispostas em locais compactados, fato que pode ser associado com maiores resistências à penetração, menores capacidades de absorção de água e nutrientes e, conseqüentemente, menores produtividades.

Girardello et al. (2014) e Martins et al. (2018) afirmam que o tráfego de máquinas agrícolas é o principal fator causador de compactação na agricultura. Os autores afirmam que a intensidade de compactação vai depender do equipamento utilizado na operação, do tipo de solo e do número de passagens dos sistemas mecanizados.

Marasca et al. (2017) e Ferrari et al. (2018) obtiveram resultados satisfatórios aplicando técnicas de geoestatística na avaliação da distribuição espacial da resistência à penetração do solo. Assis et al. (2009) relacionando a resistência a penetração do solo com o teor de água, obtiveram correlação negativa entre variáveis, o que indica que quanto menor o teor de água do solo maior a resistência à penetração.

Silva, Reichert e Reinert (2004) em extenso estudo sobre a distribuição espacial da resistência à penetração do solo em diferentes localidades, afirmaram que, existe uma concentração da resistência à penetração nas áreas de cabeceira das lavouras, fato que ocorre, em função do maior trânsito de máquinas durante as operações agrícolas (SOUZA, MARQUES JÚNIOR e PEREIRA, 2010).

Oliveira Filho et al. (2016) avaliaram a resistência à penetração do solo em diferentes áreas produtivas de cana-de-açúcar, os autores observaram que a utilização de amostragens georreferenciadas permitem o manejo localizado da descompactação, com economia de recursos em até 18,8%.

Iaia, Maia e Kim (2006) indicaram que o aumento de carga estática das máquinas agrícolas modernas, é um dos fatores determinantes para o incremento da compactação dos solos agrícolas.

A avaliação da compactação de solo por métodos indiretos é fundamental para obter informações de forma expedita, além disso, é possível associar os valores a outros

parâmetros experimentais, através de métodos geoestatísticos como a co-Krigagem a fim de obter melhores resultados experimentais.

Conhecer a distribuição das áreas compactadas na lavoura é importante para o manejo das operações de escarificação e subsolagem, já que estas apresentam alta demanda energética. O manejo localizado da compactação pode reduzir os custos operacionais e energéticos (MACHADO et al., 2015; OLIVEIRA FILHO et al., 2016).

2.6 Relação entre a presença de palhiço e a compactação do solo

A colheita mecanizada da cana-de-açúcar deixa no solo como resultado dos sistemas de corte e limpeza, materiais diversos como: folhas secas, folhas verdes, estilhaços, pedaços de colmos e caldo. Este material diversificado é conhecido como palhiço de cana, e sua quantidade no campo varia em função do porte, variedade e fase fenológica da cultura.

A utilização do palhiço de cana para geração de subprodutos como energia elétrica e térmica no processo industrial, têm aumentado o interesse do setor sucroalcooleiro na retirada deste material do campo. A utilização do palhiço pode incrementar a eficiência do processo produtivo do etanol e açúcar, porém os custos da retirada deste material do campo, e a energia de processamento, ainda são os principais entraves para a aplicação e disseminação dessa prática (MICHELAZZO e BRAUNBECK, 2008).

De acordo com Beauclair, Tezotto e Manocchio Jr. (2015), com o fim da queima da cana-de-açúcar no processo de colheita, a quantidade de material vegetal restante sobre o campo após a passagem da colhedora supera os 15Mg ha^{-1} , formando um “colchão” sobre o solo, com efeitos diversificados sobre este ecossistema. Os autores inferiram que o acúmulo desse material sobre o solo pode incrementar a infestação de *mahanarva fimbriolata* a cigarrinha das raízes, além de atrasar o rebrote por limitar a radiação direta sobre as soqueiras.

Aquino et al. (2017) encontraram melhorias nas condições do solo para produção de cana-de-açúcar com a manutenção parcial da cobertura vegetal na lavoura. Os autores afirmaram que em solos que sofreram processos de queima ou que sustentam quantidades menores do que 25% do palhiço originalmente depositado na colheita, apresentam prejuízos na longevidade e produtividade do canavial.

De acordo com Mazza (2015), no atual sistema de manejo da cana-de-açúcar, com alta intensidade no uso de máquinas, as áreas com solos mais susceptíveis à erosão

devem ser colhidas em períodos secos. O autor afirma ainda que, a manutenção da cobertura vegetal sobre o solo, pode atenuar o impacto das máquinas na estrutura física deste.

Castioni et al. (2019), em pesquisa sobre a compactação do solo em função da cobertura vegetal com palhiço de cana-de-açúcar, afirmaram que a manutenção da cobertura do solo interferiu positivamente na redução da compactação causada pelas máquinas. Solos com maior cobertura vegetal apresentam maior resiliência ao trânsito de máquinas.

Silva et al. (2016) observaram que o palhiço de cana-de-açúcar reduziu a pressão de pré-consolidação, resistência à penetração e índice de cone em um Latossolo Vermelho. Os autores concluíram que o palhiço reduz o estresse causado ao solo pelas máquinas, devido principalmente ao aumento considerável da área de contato pneu-solo.

Vischi Filho et al. (2015) em estudos sobre a influência da cobertura vegetal na manutenção da qualidade física dos solos, concluíram que a cobertura vegetal altera a área de contato com os rodados agrícolas, sendo que, solos cobertos propiciam melhor distribuição da área de contato do pneu no solo e, conseqüentemente, menor compactação.

Para Braida, Reichert e Reinert (2006) a cobertura vegetal no solo composta pelo palhiço da cana-de-açúcar, atenua o efeito das cargas aplicadas pelas máquinas agrícolas. Os autores afirmam que o palhiço apresenta comportamento elástico e baixa densidade, o que contribui para maior distribuição das cargas aplicadas.

Segundo Ceddia et al. (1999) o manejo adotado nas lavouras de cana-de-açúcar em relação à manutenção da cobertura vegetal ou queima do material de cobertura do solo, afeta diretamente a porosidade do solo e a capacidade de infiltração de água.

Ainda, Beauclair, Tezotto e Manocchio Jr. (2015) observaram que a manutenção dos restos vegetais sobre o solo, permite com que este mantenha condições ideais de umidade, mesmo em estações e períodos de déficit hídrico, o que favorece a brotação e o desenvolvimento da cana.

Gabriel Filho et al. (2004) afirmaram que a cobertura do solo é determinante no desempenho das máquinas agrícolas, e que a depender da quantidade de material vegetal sobre o solo, a eficiência trativa e o consumo de combustível das máquinas são afetados. Os autores encontraram os menores consumos de combustível em solo firme e sem cobertura vegetal.

Segundo Tenelli et al. (2019), a cada tonelada de palhiço de cana que permanece na lavoura incrementa em até 95kg ha⁻¹ de carbono orgânico nos solos argilosos, fato que melhora substancialmente as suas características físicas. Os autores verificaram que a remoção do palhiço afeta negativamente a atividade microbiana do solo, e incorre em perdas de produtividade da cana-de-açúcar.

Beauclair, Tezotto e Manocchio Jr. (2015) observaram que a manutenção da cobertura do solo na cultura da cana-de-açúcar permite a obtenção de benefícios relacionados à ciclagem de nutrientes, aporte de matéria orgânica e manutenção significativa do teor de água.

Poppin et al. (2019), em estudos sobre as emissões de gases do efeito estufa e remoção do palhiço de cana-de-açúcar, afirmaram que a quantidade mínima de palhiço a ser preservada no solo é de 6Mg ha⁻¹, para que não sejam causados impactos severos na qualidade do solo e, não se incremente a emissão de gases do efeito estufa.

De acordo com Silva et al. (2019), a cobertura de palhiço na cultura da cana-de-açúcar, necessita ser devidamente quantificada, de forma que parte do material seja aproveitada na indústria, sem, no entanto, causar prejuízos ao solo. Os autores concluíram que, para uma cobertura homogênea de 100% da superfície do solo, são necessários no mínimo 7Mg ha⁻¹ de palhiço, e que a cada Mg ha⁻¹ do material que permanece no solo, ocorre um incremento de 0,5cm na altura total da cobertura.

Vasconcelos et al. (2014), em pesquisa relacionando a qualidade física de solos para produção da cana-de-açúcar, afirmaram que a matéria orgânica afeta a densidade e a estabilidade estrutural do solo, fazendo com que este suporte maior condição de estresse, quando comparados com solos sem a presença de cobertura vegetal ou com baixos teores de matéria orgânica. Resultados semelhantes foram obtidos por Braida (2004), ressaltando a importância da cobertura vegetal e sua relação com a matéria orgânica e redução da compactação.

Lisboa et al. (2019) em trabalho avaliando a remoção do palhiço em lavouras de cana-de-açúcar, obtiveram as melhores relações de retirada deste material em 50% do total depositado na lavoura durante a colheita, de forma que, o processo industrial é beneficiado com metade da biomassa total que seria deixada no campo, e a outra metade, atuaria na estruturação e melhoria das condições de solo.

Melo et al. (2020) observaram que o gerenciamento da remoção do palhiço é fundamental para o incremento produtivo das lavouras de cana-de-açúcar, de forma

que, quando realizado corretamente, permite manter no solo a quantidade ideal de palhiço de forma a promover o crescimento vegetal da cultura, sem deixar de aproveitar a matéria prima para a indústria.

A cobertura vegetal permanente no solo, durante as operações agrícolas mecanizadas, possui diversas funções, sendo que entre elas está a estabilização de gradiente de temperatura na zona de crescimento radicular, maior disponibilização de nutrientes às culturas vegetais e redução do impacto do tráfego de máquinas na estruturação do solo (BRAIDA, 2004; ROSIM et al., 2012).

Chen e Yang (2020), observaram em trabalhos com tráfego controlado de máquinas na china, que a cobertura vegetal do solo influencia positivamente a manutenção da qualidade do solo, bem como reduz o consumo energético das lavouras. Carneiro et al. (2020), observaram ganhos agronômicos significativos para a cana-de-açúcar com a manutenção do palhiço sobre o solo. Oliveira Roque et al. (2011), observaram que o tráfego controlado de máquinas preserva a estrutura física do solo.

Se manejada de forma adequada, a camada superior de palhiço presente no solo é altamente benéfica para o sistema de produção da cana-de-açúcar, contribuindo diretamente para a infiltração e retenção da água no solo, estabilizando a temperatura e diminuindo a evaporação na camada superficial. A cobertura também altera a incidência de luz na superfície, controla a erosão, aumenta a matéria orgânica a estruturação e a fertilidade (TAVARES, LIMA e ZONTA, 2010; CARDOSO et al., 2013; COSTA et al., 2014).

A cobertura vegetal atua em processos altamente dinâmicos em relação aos agentes bióticos e abióticos do solo, bem como influencia a resposta física deste aos processos mecanizados. Awe, Reichert e Fontanella (2020) em pesquisa com sistemas de plantio direto, cultivo mínimo e preparo convencional de solo para a cultura da cana de açúcar, encontraram resultados positivos para a manutenção da cobertura vegetal no solo ao longo de três ciclos produtivos da cultura.

A manutenção do palhiço na superfície propicia condições favoráveis de teor de água no solo, mantendo-o por mais a retenção de água o que favorece o desenvolvimento da cana-de-açúcar. Taylor e Brar (1991) afirmaram que o desenvolvimento radicular não é afetado em solos de alta densidade com presença de água, pois esta atua como agente lubrificante à penetração das raízes no solo.

Melo et al. (2020) afirmaram que a manutenção de 8,5 a 13Mg ha⁻¹ de palhiço sobre o solo na cultura da cana-de-açúcar, propicia maior desenvolvimento radicular e

produção total de colmos. Os autores afirmaram que a manutenção integral do palhiço na lavoura reduziu a massa total de raízes em 40% e a produção de colmos em 20%. Carvalho et al. (2017) verificaram que a manutenção do palhiço no solo, somente aumenta a emissão de gases do efeito estufa, se associado com a aplicação de nitrogênio em cobertura ou vinhaça. Os autores ainda concluíram que, a maioria dos benefícios proporcionados pela cobertura vegetal, ocorrem quando essa cobertura está presente em quantidades superiores a 7Mg ha⁻¹ de matéria seca sobre o solo. Resultados semelhantes em termos de quantidades de cobertura vegetal foram obtidos por Silva et al. (2019).

O manejo do palhiço e as respostas produtivas da cultura da cana-de-açúcar são altamente variáveis, em função principalmente das características edafoclimáticas do local produtivo. Souza et al. (2005), em estudo avaliando o manejo do palhiço em cana-de-açúcar, obtiveram os melhores resultados em matéria orgânica, estabilidade de agregados e menores resistências à penetração do solo, em áreas com incorporação do palhiço ao solo em 0,3m de profundidade.

Cada tipo de solo apresenta respostas distintas em relação à alteração de sua estrutura física, principalmente em função da dinâmica dos processos de trânsito de máquinas e logística produtiva (CAVALIERI et al. 2011; LISBOA et al., 2019). Mazurana et al. (2017), afirmaram que a resposta do solo ao estresse físico, está mais diretamente relacionado com seu manejo do que propriamente com a textura, granulometria ou tipo de óxido presente.

Após a colheita da cana, o palhiço pode ser mantido no campo, aleirado ou recolhido parcialmente. Nos locais onde é feito o recolhimento, este material é aleirado e posteriormente enfardado. O aleiramento consiste em acumular o palhiço em entrelinhas alternadas de cana, com o uso da máquina conhecida como “ancinho aleirador”.

Nem todas as propriedades sucroalcooleiras que aleiram o palhiço, recolhem este material posteriormente, devido principalmente ao alto custo energético. A operação de aleiramento, embora favoreça a rebrota da cultura e diminua a ocorrência de pragas, propicia na lavoura manchas de solo e aumenta a incidência de plantas daninhas (CONCENÇO, LEME FILHO e SILVA, 2017).

Para Beauclair, Tezotto e Manocchio Jr. (2015) os efeitos da retirada do palhiço do campo, bem como, o impacto dessa forma de manejo ainda são pouco conhecidas e devem ser exploradas do ponto de vista da fertilidade e qualidade física do solo. Os

autores afirmam que, empiricamente têm se adotado a manutenção de pelo menos 50% da biomassa residual sobre o solo, com vistas à manutenção de suas qualidades estrutural, física e biológica.

A recuperação do palhiço e sua retirada do campo apresenta alto custo energético (LEMOS, 2018; RASCHE e DEL DIEGO, 2019). Embora com alta capacidade de fornecer energia para a produção de etanol celulósico, o palhiço deve passar por processos complexos e com alta demanda de energia, o que em alguns casos inviabiliza a sustentabilidade do processo (BATISTA et al., 2019). Gomes et al. (2016) em pesquisa avaliando recolhimento de palhiço, afirmaram que o custo de recolhimento reduz em função do aumento da quantidade de material recolhido.

Algumas propriedades agrícolas utilizam a técnica do aleiramento para manejar o palhiço, de forma que o material permanece empilhado e se decompõe em linhas alternadas na lavoura. Outros manejos possíveis são a colheita integral ou parcial da cana, realizando a limpeza em processamento posterior na usina. Entretanto, o custo energético e de transporte pode inviabilizar economicamente a operação (LEMOS, 2018).

Cardoso et al. (2015) em estudos envolvendo simulações matemáticas para verificar a viabilidade econômica do recolhimento do palhiço após a colheita mecanizada em comparação com a colheita integral da cana-de-açúcar, verificaram as melhores taxas de retorno econômico para os sistemas de colheita integral. A viabilidade econômica dos sistemas depende fundamentalmente da distância de transporte da matéria prima e da produtividade das áreas agrícolas.

A remoção parcial do palhiço de cana de açúcar pode propiciar a redução da emissão de gases do efeito estufa, como o óxido nitroso (N_2O), tornando os sistemas produtivos de etanol mais sustentáveis (GONZAGA et al., 2018).

Algumas operações agrícolas como a escarificação e subsolagem podem remover a cobertura vegetal, expondo o solo nas linhas da cultura. Seki et al. (2015) verificaram que a remoção da cobertura do solo para a cultura do milho, alterou a densidade e o teor de água, porém não afetou a produtividade final da cultura.

Rasche e Del Diego (2019), estudaram os aspectos econômicos da retirada do palhiço da lavoura de cana e utilização posterior em processos secundários de geração de energia. Os autores concluíram que a taxa de recuperação do material deve ficar entre 40 e 60% da matéria prima total, entretanto, é fator determinante para a retirada, o tipo de solo e as características de manejo.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Esta pesquisa foi desenvolvida no Núcleo de Ensaio de Máquinas e Pneus Agroflorestais (NEMPA), na Fazenda Experimental Lageado, pertencente à Faculdade de Ciências Agrônômicas (FCA), UNESP campus de Botucatu – SP.

Para a realização dos ensaios, foi utilizada a Unidade Fixa de Ensaio de Pneus (UFEP), sendo desenvolvidos em duas fases, Ensaio em Superfície Rígida (ESR) e Ensaio em Superfícies Deformáveis (ESD).

Foram avaliados três modelos de pneus (Figura 7) utilizados em veículos de carga e de transporte, como os transbordos, sendo eles, P1 de construção radial composto por um rodado duplo (2 x 275/80R22.5); P2 de construção radial (600/50R22.5) e, P3 diagonal (600/50-22.5). As características técnicas dos pneus utilizados nos ensaios, baseadas nas informações fornecidas pelos fabricantes, estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1 - Características dos pneus utilizados nos ensaios de interação com diferentes superfícies

Tamanho	Modelo	Largura (mm)	Diametro (mm)	Raio estático (mm)	Pressão inflação (kPa/Psi)	Índice de carga/símbolo velocidade
275/80R22.5 (duplo)	P1	275x2	1029	515	717/104	149 K
600/50R22.5	P2	616	1181	510	282/41	165 A8
600/50-22.5	P3	600	1172	572	282/41	165 A8

Figura 7 - Pneus utilizados nos ensaios: (a) P1 - 275/80R22.5 (duplo); (b) P2 - 600/50R22.5; (c) P3 - 600/50-22.5



Fonte: Marques Filho, 2020

3.1 Unidade Fixa de Ensaio de Pneus (UFEP)

A UFEP utilizada no presente trabalho foi construída e atualizada por diversos pesquisadores do NEMPA (SANTOS e LANÇAS, 1999; MAZETTO et al. 2004; MONTEIRO et al. 2010), permitindo a simulação de diversas condições de interação entre os rodados pneumáticos e as diferentes superfícies padronizadas (Figura 8).

Figura 8 - Unidade Fixa de Ensaio de Pneu



Na UFEP são fixados os rodados de interesse em um eixo central, onde são aplicadas cargas controladas em superfície deformável (tanque de solo) e superfície rígida (mesa em aço). As cargas são impostas ao rodado/superfície através de um sistema eletro-hidráulico, controlado por dispositivos de manobra, motor elétrico, bomba hidráulica e pistão atuando sobre o eixo do rodado.

3.1.1 Ensaio de Superfície Rígida (ESR)

Nos ensaios em superfície rígida, os pneus foram previamente calibrados em relação à pressão interna de inflação recomendada pela Associação Latino-americana de Pneus e Aros (ALAPA, 2018). A banda de rodagem dos pneus foi previamente umedecida com tinta nanquim de cor preta, de forma a propiciar a demarcação da área de contato do pneu com a folha de papel cartolina após a aplicação de carga realizada na UFEP. O sistema hidráulico da UFEP foi acionado para realizar descida

do pneu com velocidade constante, aplicando uma carga crescente e controlada chegando a 50,52 kN (5150 kgf), permanecendo nesse valor máximo por 10 segundos. Após a aplicação da carga, o pneu é elevado novamente até sua posição inicial e a folha de cartolina é retirada (Figura 9).

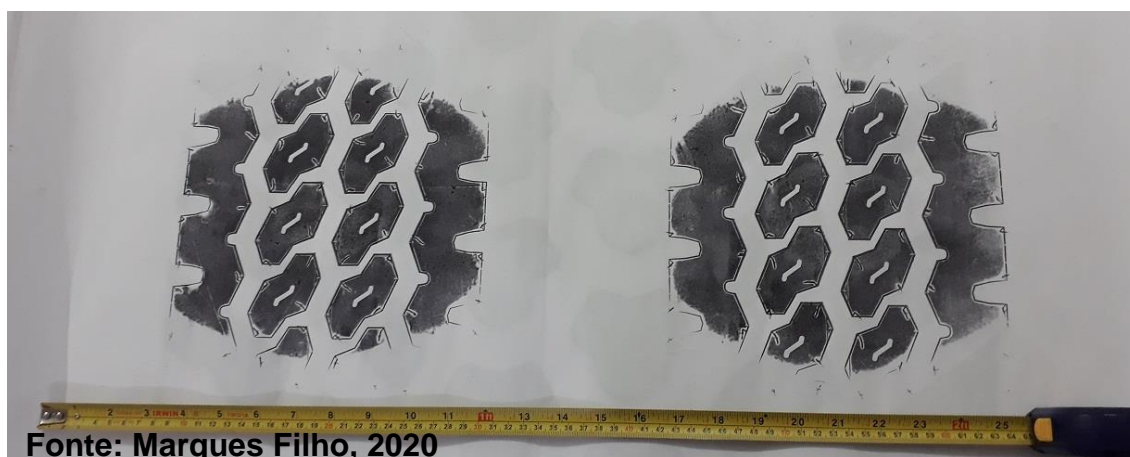
Figura 9 - Rodado montado na UFEP, apoiado sobre a superfície metálica durante os ensaios em superfície rígida (ESR)



As áreas de contato demarcadas pelos rodados na cartolina, após a aplicação de carga na UFEP, foram transferidas através de imagem convencional (RGB), retiradas em ângulo reto e com correção de paralaxe através de uma trena, para o software de interpretação de imagem *Surfer v.11*. Através deste programa de referenciamento digital, foram obtidas as medidas de comprimento, largura, área total de contato e área real de contato (garras).

Os valores foram transferidos para planilha eletrônica e software estatístico para verificação das diferenças entre as médias dos tratamentos. A Figura 10 demonstra a imagem RGB da área de contato em superfície rígida após a aplicação de carga na Unidade Fixa de Ensaio de Pneus.

Figura 10 - Imagem da área de contato em superfície rígida, em cartolina para conversão e cálculo de áreas de contato total e de garras



3.1.2 Ensaio de Superfície Deformável (ESD)

Nos ESD o sistema hidráulico da UFEP foi acionado para realizar descida do pneu com velocidade constante, aplicando-se uma carga crescente e controlada chegando a 50,52kN (5150 kgf), permanecendo nesse valor por 10 segundos, sobre uma amostra de solo confinada em tanque, para três superfícies distintas, com três repetições. O tanque apresentava 0,8 m³ de volume total com as seguintes dimensões: 1,03 m de largura, 1,30 m de comprimento e 0,60 m de altura. O solo utilizado foi classificado como Latossolo Vermelho Amarelo de acordo com Santos et al. (2018). A análise granulométrica do solo está representada na Tabela 2.

Tabela 2 - Análise física do Latossolo Vermelho Amarelo (Botucatu-2020)

Análise Física					
Areia Total	Areia Grossa	Areia Média	Areia Fina	Argila	Silte
g/dm ³					
645,1	118,6	159,5	367,0	308,0	47,2

A montagem dos tanques seguiu a padronização da quantidade de amostra de solo, disposta em cinco camadas, com teor de água previamente homogeneizado e, posteriormente, submetido à peneira Mesh n°30 com duas malhas, totalizando 200kg de amostra de solo por camada.

Para cada camada, foi realizada uma compactação mecânica por impacto de uma barra de madeira com 12 quilogramas de massa total e comprimento de 1,25m, foram aplicados impactos à 0,3m de altura, de forma a obter uma altura constante de 10 cm em cada camada da amostra de solo (Figura 11 e 12). A homogeneização do teor de água do solo foi realizada pelo método da compensação volumétrica, analisando-se o volume de água presente no solo no momento da realização dos ensaios e compensando-se quando necessário, com a quantidade de água para manter o teor de água padrão em cada tanque.

Figura 11 - Montagem manual dos tanques de solo, peneira (esquerda) e sistema de compactação controlada em camadas de solo (direita)



Fonte: Marques Filho, 2020

Após a montagem de cada tanque, este foi conduzido para o interior da UFEP onde foi retirada a amostra de resistência à penetração padrão do tanque, sem aplicação de carga, bem como a retirada do anel volumétrico para análise da densidade do solo. Posteriormente, de acordo com o sorteio e casualização foi inserida a cobertura vegetal na superfície dos tanques. A cobertura vegetal utilizada correspondeu ao palhiço de cana-de-açúcar retirado de um canavial comercial, com produtividade média de 100 Mg ha^{-1} , em segundo corte da variedade SP80-1816. Para a coleta do palhiço foram demarcadas áreas de 1m^2 com a utilização de trena e barbante. As extremidades da área demarcada foram cortadas com o auxílio de um facão. Foram pesadas as amostras em balança analítica e realizadas a determinação de cobertura

total em Mg ha^{-1} . O teor de água do palhiço foi determinado pelo método da estufa, onde amostras foram secas à 65°C pelo período de 48 horas, apresentando teor médio de água de 50%.

Figura 12 - Montagem dos tanques de solo em diferentes superfícies, sem cobertura (S1) esquerda, com 15Mg ha^{-1} de palhiço (S2) centro, com 30Mg ha^{-1} de palhiço de cana-de-açúcar (S3) direita.



Fonte: Marques Filho, 2020

Na Tabela 3 estão descritas as médias de densidade e teor de água obtidas nos tanques de solo dos ensaios em superfície deformável (ESD).

Tabela 3 - Análises do teor de água e densidade do solo nos tanques em cada tratamento

Palhiço Superfície (Mg ha^{-1})	Pneu											
	P1				P2				P3			
	Teor Água (%) **		Densidade (g cm^3) **		Teor Água (%) **		Densidade (g cm^3) **		Teor Água (%) **		Densidade (g cm^3) **	
	m	s	m	s	m	s	m	s	m	s	m	s
0	22,17	0,28	1,59	0,02	21,83	0,25	1,59	0,02	22,00	0,10	1,61	0,01
15	21,75	0,32	1,61	0,04	21,92	0,30	1,61	0,03	22,13	0,20	1,58	0,03
30	21,80	0,26	1,62	0,03	21,76	0,51	1,58	0,03	21,94	0,12	1,59	0,03

**NS – Diferenças não significativas ($p < 0,05$). C.V. Teor de Água = 4,35; C.V Densidade do solo = 1,96; m=média; s=desvio padrão.

A deposição da cobertura vegetal sobre o solo nos ESD, nas quantidades de 15 e 30 Mg ha^{-1} foram realizadas após a montagem e preenchimento padronizado do tanque com a amostra de Latossolo Vermelho Amarelo. Na etapa seguinte à montagem dos tanques e posterior à aplicação da carga pré-determinada na UFEP, a cobertura

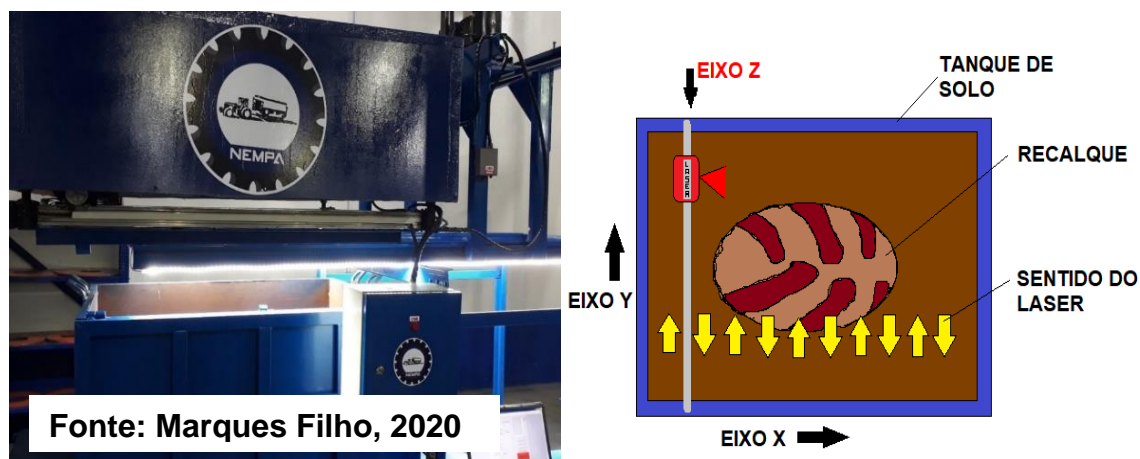
vegetal foi removida de forma manual e, com o auxílio de uma escova macia feita a retirada da fração remanescente de palhiço sobre a superfície. Após a limpeza da superfície do tanque, procedeu-se a realização das avaliações da área de contato via escaneamento digital e resistência à penetração do solo em diferentes pontos do recalque.

As variáveis respostas obtidas nos ESD foram, a área total transmitida ao solo (m^2), a área de contato real do pneu com o solo (m^2), profundidade (cm), comprimento (cm) e largura do recalque no solo (cm), resistência à penetração do solo no ponto central do recalque (PC, MPa), resistência à penetração do solo no primeiro ponto transversal do recalque (PT1, MPa), no segundo ponto transversal do recalque (PT2, MPa), a resistência à penetração do solo no primeiro ponto longitudinal do recalque (PL1, MPa), no segundo ponto longitudinal do recalque (PL2, MPa) e, fora da área do recalque (P0, MPa); a densidade do solo ($g\ cm^{-3}$) e o teor de água do solo (%). As variáveis respostas obtidas nos ESR foram, o comprimento (cm) e a largura (cm) da área de contato, área das garras (cm^2) e área total de contato (cm^2).

3.1.3 Perfilômetro digital (*Scanner Laser*) - UFEP

Para determinação do recalque nos ESD, utilizou-se um sistema de escaneamento automático montado em mesa com controle numérico computadorizado (CNC) e equipado com sistema *laser* analógico modelo 96M ODS/V-5070-421 (Figura 13).

Figura 13 - Instrumentação do Scanner laser (UFEP)



O sistema CNC funciona como um perfilômetro eletrônico a laser fazendo varreduras em movimentos de ida e volta ao longo do eixo Y em deslocamento horizontal e, eixo X em deslocamento ao longo do tanque. O eixo Z pode ser representado pelo deslocamento vertical do sinal do sensor laser-superfície (Figura 13). Foram gerados dados referenciados em uma matriz de pontos, propiciando a criação de mapas de recalque e avaliações das áreas de contato entre o pneu e a amostra de solo no tanque.

3.1.4 Penetrômetro Eletromecânico

O Penetrômetro eletromecânico (Figura 14) utilizado na coleta de dados de resistência à penetração do solo foi constituído por um motor elétrico com 0,19kW de potência, possuindo sensores de início e fim de curso programáveis, além de uma célula de carga com capacidade máxima de 2kN e uma haste de aço carbono padronizada com 50 cm de comprimento, contendo uma ponteira cônica de ângulo sólido de 30°, diâmetro de 20,27 mm e área de 323 mm². O sistema segue as características estruturais e operacionais definidas por norma da ASABE (2012).

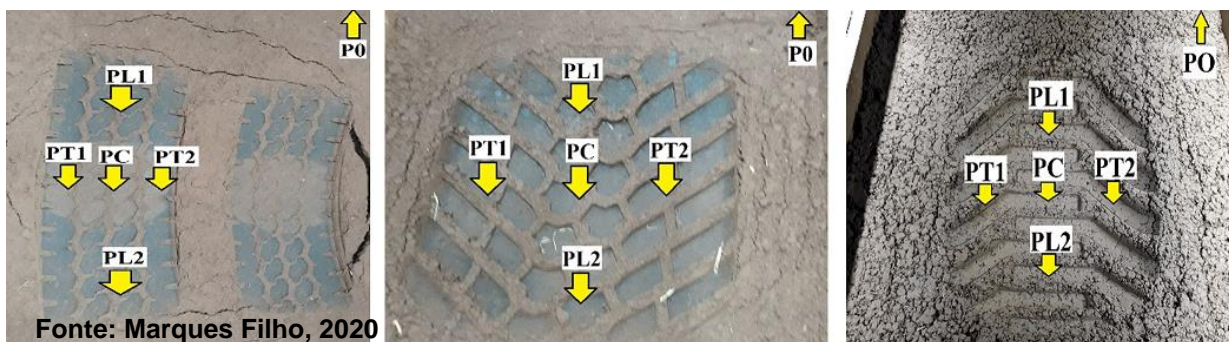
Figura 14 - Penetrômetro utilizado para a coleta dos dados de resistência à penetração do solo



Para cada tanque amostral, foi coletada a resistência à penetração do solo em cinco pontos internos ao recalque causado pelo pneu (Figura 15). As coletas foram

compostas por um ponto na área central do recalque chamado de ponto crítico PC, além de dois pontos transversais ao recalque PT1 e PT2 e dois pontos longitudinais PL1 e PL2. Um ponto realizado fora da área de recalque P0, foi considerado como o ponto de controle. No rodado duplo, a coleta foi realizada no recalque esquerdo em todas as avaliações. A resistência à penetração foi obtida até a profundidade de 0,30 m e os gráficos gerados foram construídos com o auxílio do programa Microsoft Excel 365.

Figura 15 - Pontos de avaliação da resistência à penetração no solo em função do recalque apresentado por cada modelo de rodado após prensagem na UFEP



O ponto PC é o ponto central; o ponto P0 é o ponto controle externo; o ponto PL1, é o ponto longitudinal 1; o ponto PL2, é o ponto longitudinal 2; o ponto PT1, é o ponto transversal 1 e o ponto PT2, é o ponto transversal 2.

3.1.5 Teor de Água e Densidade do solo

O teor de água do solo em cada tratamento foi determinado pelo método padrão ou gravimétrico, que consiste na pesagem anterior e posterior à secagem em estufa à 105°C por 24 horas. Com os valores anotados, utilizou-se a Equação 1.

$$U = [(M_{su} - M_{ss}) / M_{ss}] \times 100 \quad (1)$$

Onde:

U – Teor de água (%)

M_{su} – Massa de solo com água (g)

M_{ss} – Massa de solo seca a 105° (g)

A densidade do solo foi obtida através do método padrão do anel volumétrico retirado em cada tanque amostral de solo. As dimensões do tanque de solo da UFEP foram: 1,03m de largura, 1,30m de comprimento e altura de 0,60m. A densidade foi obtida de acordo com a Equação 2.

$$D = (M_s / V_s) \quad (2)$$

Onde:

D – Densidade do solo (g/cm^3)

M_s – Massa de solo seco (g)

V_s – Volume do solo (cm^3)

3.2 Análise estatística dos dados

Foram aplicados distintos delineamentos experimentais em cada tipo de ensaio realizado na UFEP. O delineamento experimental utilizado para os ensaios na superfície rígida foi o inteiramente casualizado (DIC), com 1 superfície e 3 modelos de pneus. Nos ensaios em superfície deformável (tanques de solo) foi utilizado o modelo experimental em faixas, com a casualização dos tratamentos em função de cada modelo de pneu. Nos ESD, realizou-se uma análise fatorial 3x3, composta pelos 3 modelos de pneus (P1, P2 e P3) e três superfícies de amostras de solo (S1, S2 e S3), com três repetições, totalizando 27 parcelas tanques.

Os resultados dos ensaios passaram por testes de normalidade Shapiro-Wilk; teste de homogeneidade de variância de Bartlett e Levene's; análise de variância (ANOVA) e, quando necessário teste de Tukey à 5% de probabilidade. Os resultados dos ensaios de interação em superfície rígida e deformável foram submetidos à testes de coeficiente de Determinação (r^2). Todos os testes aplicados foram desenvolvidos no sistema estatístico R software.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A apresentação dos resultados da pesquisa ocorre de forma sequencial, inicialmente com os resultados dos ensaios em superfície rígida e, posteriormente, com os resultados dos ensaios nas superfícies deformáveis para P1, P2 e P3 em cada condição superficial.

Ao final, são comparados os resultados e as interações entre os pneus e as superfícies. Os resultados detalhados das análises em superfície deformável, gráficos em maior tamanho e resolução, além de mapas de interação rodado solo são apresentados na forma de apêndices ao final do documento escrito.

4.1 Resultados em Superfície rígida (ESR)

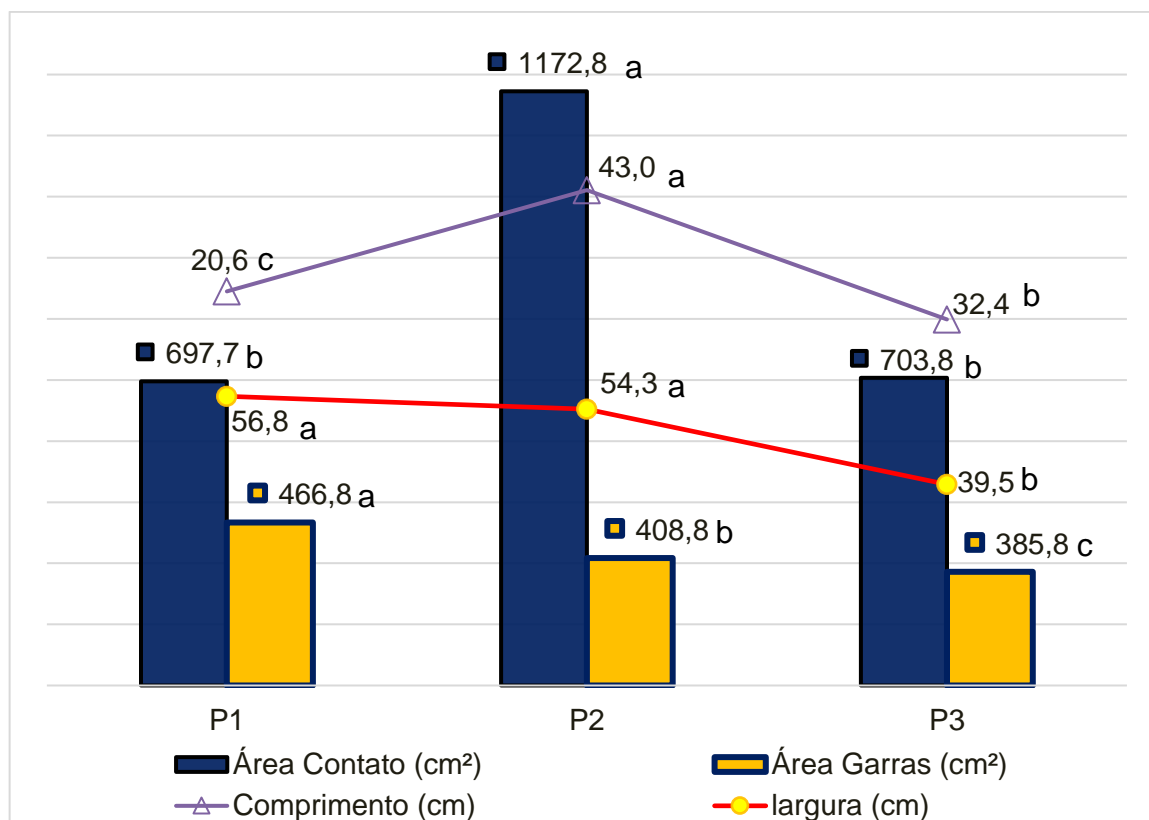
A impressão da área de contato (banda de rodagem) dos pneus P1, P2 e P3 em superfície indeformável estão apresentadas na Figuras 16.

Figura 16 - Área de contato em superfície rígida proporcionada pelos pneus P1 (275/80R22.5-duplo); P2 (600/50-R22.5) e P3 (600/50-22.5) na UFEP



Os resultados obtidos nos ensaios em superfície rígida estão descritos na Figura 17. A maior área de contato total foi apresentada por P2, diferindo estatisticamente dos demais tratamentos. Os pneus P1 e P3 não apresentaram diferença estatística para a variável área de contato total, o que indica que a montagem dupla de pneus de caminhão, apresenta para esta variável, comportamento semelhante à tecnologia construtiva de pneus diagonais utilizados em veículos de transbordo.

Figura 17 - Área de contato em superfície rígida proporcionada pelos pneus P1 (275/80R22.5 Duplo); P2 (600/50R22.5) e P3 (600/50-22.5) na UFEP



*médias com letras diferentes indicam diferença estatística significativa entre as médias expressas por P1; P2 e P3 pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade.

A similaridade em área de contato total, contribui para a justificativa da aplicação de transbordos rodoviários no canal, o que de acordo com Melo e Rosa (2015) é uma aplicação crescente, principalmente na fase de implantação da cultura, em que, com maior agilidade os caminhões transbordo carregam as mudas de cana para as áreas de plantio, percorrendo as distâncias em menor tempo e contribuindo para a manutenção do vigor do material vegetativo de propagação.

Observou-se que o pneu P2, mesmo apresentando a maior área de contato total dentre os tratamentos, não obteve a maior área de garras. A área total de contato do pneu com a superfície é determinante para o impacto causado no solo, assim, em solos firmes, a área de garras é um dos parâmetros mais importantes, já que estas não penetram no solo em condições de camada superficial adensada, neste aspecto o pneu P1 apresentou o melhor desempenho. Silva et al. (2016) afirmaram que a pressão exercida pelo rodado no solo, depende diretamente de sua área de contato e

pressão de inflação interna, fato que norteia a aplicação deste estudo nas condições de produção sucroalcooleira.

Na relação percentual direta entre a área de contato total e área de garras obtidas para cada modelo de pneu, obteve-se o total de 66,9% para P1, 34,8% para P2 e 54,8% para P3. Em áreas de plantio direto, com a camada superior do solo tendendo a uma maior compactação, o pneu P1 apresenta desempenho superior aos pneus P2 e P3, já que a área de contato real com o solo será determinada pela área de garras, fato que encontra fundamentação nos estudos de Teimourlou e Taghavifar (2015) e Silva et al. (2016).

Para a variável comprimento verificou-se diferença estatística em todos os tratamentos, com a maior média atribuída a P2, seguidas por P3 e P1, respectivamente. A deformação dos pneus relaciona-se com o modelo construtivo, número de lonas internas e matéria prima de desenvolvimento. A capacidade de deformação longitudinal de um pneu é uma característica desejável, já que propicia aumento da área de contato com o solo sobre a linha de tráfego e mantém o afastamento da linha lateral ou linha da cultura vegetal. Desta forma, pneus com deformação longitudinal tendem a proporcionar menor estresse ao solo no ambiente radicular das culturas.

Para a variável largura de contato, P1 e P2 não diferiram estatisticamente, entretanto P3 apresentou a menor média global dentre os pneus estudados, fato que pode ser correlacionado à maior rigidez da banda lateral nos pneus diagonais e ao formato elipsoidal da área de contato expressa por estes modelos. Considerando-se que, mesmo em áreas com tráfego controlado os veículos ocasionalmente podem sair do traçado original planejado, maiores áreas de contato total são recomendadas pela atenuação e distribuição de cargas no solo de forma homogênea.

Os resultados dos ensaios em superfície rígida para os três modelos de pneus, evidenciaram que, pneus com tecnologias distintas, quando aplicados em superfícies que apresentam baixa deformação, como as superfícies encontradas em solos compactados, entrelinhas da cultura da cana-de-açúcar e áreas com plantio direto estabelecido, apresentam áreas de contato dependentes da área total de garras, fato que incorre em vantagens para o modelo de pneu P1 em montagem dupla. Pneus com rodados pneumáticos de tecnologias mais flexíveis como os radiais tendem a oferecer maiores áreas de contato total (KUČERA, HELEXA e ČEDÍK, 2016), entretanto a área de garras depende do modelo construtivo.

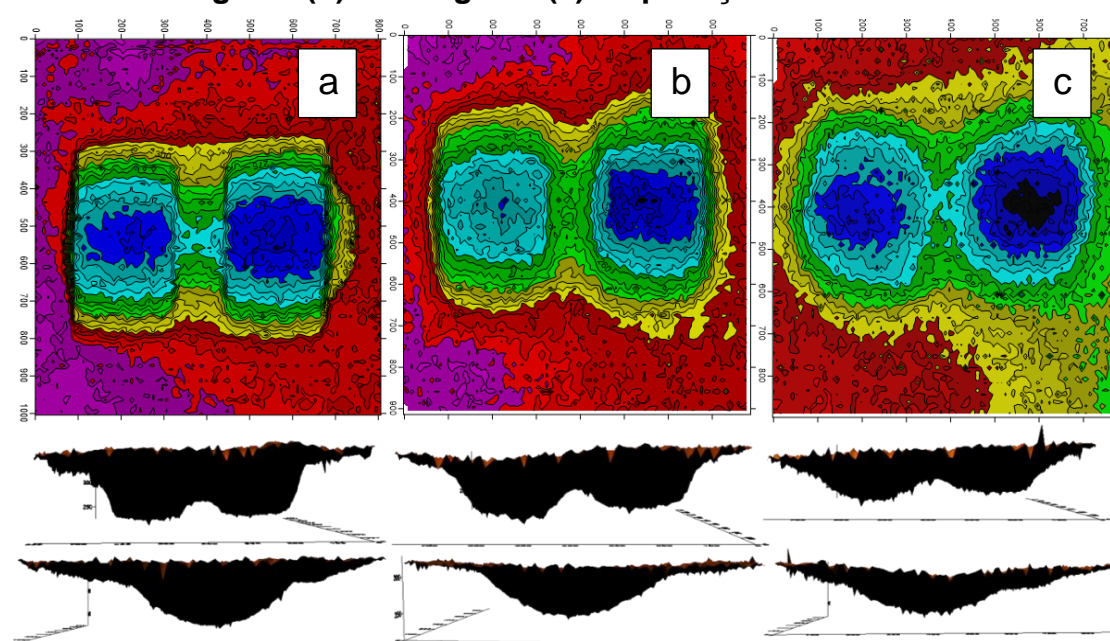
De acordo com Mamkagh (2019) a alteração da área de contato da interface pneu-solo pode ser obtida variando-se a pressão interna de inflação dos pneus, porém, essa relação deve obedecer a certos limites, para que não danifique a estrutura dos pneus. Os autores concluem que as corretas seleções da pressão interna de inflação dos pneus, bem como das condições de teor de água do solo, podem contribuir para o aumento da eficiência da operação mecanizada. Dessa forma, a seleção do modelo ideal de pneu a ser utilizado, irá depender das condições gerais de manejo da unidade produtiva e da gestão do tráfego de máquinas na lavoura.

Ensaio em superfície rígida permitem conhecer as relações de áreas de contato real e de garras dos pneus, estas informações podem ser utilizadas em modelos aprofundados de predição e simulação da interação rodado solo. Os dispositivos de ensaios como a UFEP contribuem para que as informações de área de contato e interação destes com o solo sejam obtidas de forma expedita e confiável.

4.2 Recalque e área de contato obtidos nos ESD para o pneu P1 275/80R22.5 em montagem dupla.

A Figura 18 evidencia as áreas de contato totais do pneu P1 em montagem dupla sobre o tanque padronizado de solo em diferentes condições superficiais.

Figura 18 - Área de contato e recalque do Pneu P1 - 275/80R22.5 (Duplo) em tanque sem cobertura vegetal (a); com cobertura vegetal equivalente a 15Mg ha⁻¹ (b) e 30 Mg ha⁻¹ (c) de palhiço em cobertura.

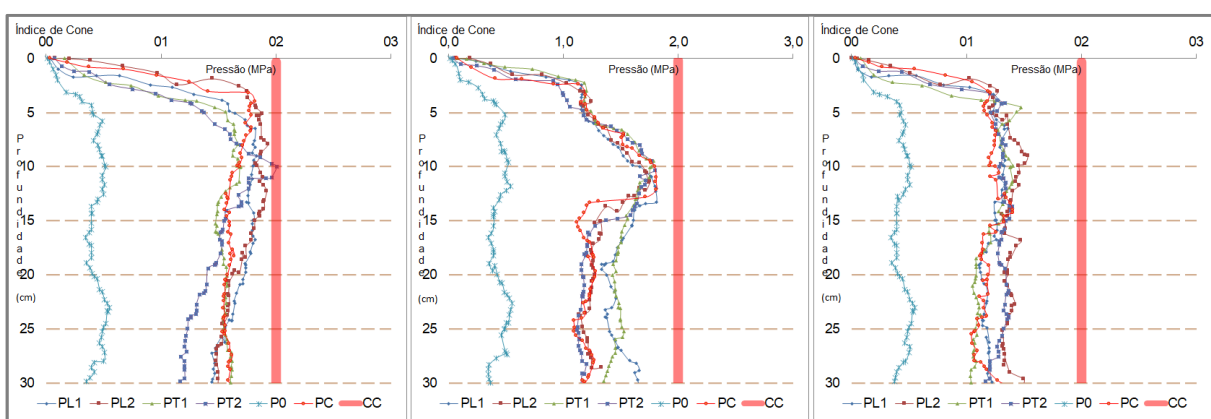


As áreas tendendo para a cor azul e verde demonstram maiores profundidades de recalque, enquanto as áreas em vermelho, amarelo e roxo evidenciam a deformação superficial do solo.

Verifica-se na Figura 18 que as áreas de contato totais apresentaram crescimento em relação ao aumento de palhiço em superfície. Percebe-se no centro dos rodados uma elevação, ocasionada pela interface entre um pneu e outro na montagem dupla, padrão em rodados de carga de caminhões. Abaixo de cada figura é possível observar o recalque causado pelo pneu em cada condição superficial, verifica-se nesta sequência de imagens uma redução na profundidade em função do aumento da biomassa sobre o solo.

A Figura 19 descreve o comportamento da resistência à penetração do solo nos pontos do recalque em cada situação estudada. A hipótese de que, as maiores áreas de contato proporcionadas pelo palhiço em cobertura atenuam o estresse no subsolo, ficam evidentes no comportamento do índice de cone, onde verifica-se o incremento em área de contato, proporcionada por quantidades crescentes de palhiço, o que possibilitou a redução da resistência à penetração do solo em todos os pontos avaliados no tanque de solo.

Figura 19 - Índice de cone médio gerado pelo pneu P1 (275/80R22.5 - duplo) em tanque com 0, 15 e 30 Mg ha⁻¹ de palhiço em cobertura



A redução da resistência à penetração do solo, reflete-se em menor desestruturação deste e, possivelmente, em condições de maior suporte produtivo para as culturas agrícolas subsequentes. Gírio et al. (2019), avaliando a resistência à penetração do solo na cultura da cana-de-açúcar, concluíram que a colheita é a operação que mais

afeta a qualidade física do solo e que nessa operação, os veículos de transbordo são os maiores responsáveis pelo impacto negativo na estrutura física do solo.

A Figura 19 demonstra que no solo sem cobertura vegetal, as resistências à penetração aproximaram-se da linha de referência de 2 MPa e as maiores resistências à penetração foram obtidas a partir de 5 cm de profundidade. Sá et al. (2016) avaliando a compactação do solo na cultura da cana-de-açúcar, verificaram valores críticos para crescimento radicular em torno de 3,8 MPa em Latossolo Vermelho Argiloso, o que corresponde a índices superiores aos obtidos nessa pesquisa. No solo com cobertura de 15 Mg ha⁻¹, as maiores resistências à penetração foram obtidas à 10cm de profundidade, entretanto, com valores absolutos menores do que os obtidos nos tanques sem cobertura vegetal.

De acordo com Oliveira Filho et al. (2016) é fundamental conhecer a localização da compactação e atuar de forma direcionada para reduzir a demanda energética dessa operação. Os resultados da presente pesquisa permitem inferir que a cobertura vegetal modifica a dinâmica da compactação crítica em diferentes profundidades. Os índices de cone podem servir como bases para a tomada de decisão no manejo do solo.

laia, Maia e Kim (2006) em pesquisa sobre a resistência à penetração do solo na cana-de-açúcar indicaram que os rodados pneumáticos proporcionam estresse no subsolo e que as cargas e deformações apresentam dependência espacial ao longo do perfil. Este fato foi comprovado por Varón-Ramírez, Camacho-Tamayo e González-Nivia (2018). Comparando-se os resultados destes autores com os obtidos nesta pesquisa, verifica-se que o solo sem cobertura vegetal tende a propagar maior estresse nas camadas superficiais do solo. Conforme aumenta-se a quantidade de palhço em superfície, os gráficos de índice de cone indicam atenuação do estresse e estabilização das resistências à penetração ao longo do perfil.

O tratamento com 30 Mg ha⁻¹ de palhço em cobertura apresentou as menores resistências à penetração, com estabilidade dos valores em torno de 1 a 1,2 MPa. Na Figura 19, o afastamento da resistência à penetração do solo da linha de referência de 2MPa conforme aumenta-se a quantidade de palhço em cobertura, indica que a cobertura vegetal atenua a resistência à penetração do solo para esse modelo de rodado. Este fato pode ser evidenciado pelo aumento da área de contato pneu-solo nos tanques com cobertura vegetal.

Cheong, Kee e Preez (2009), em pesquisa sobre compactação de solo na cultura da cana-de-açúcar, recomendaram a implantação de manejos conservacionistas e manutenção da cobertura vegetal sobre o solo para reduzir os riscos de erosão laminar, aumentar a taxa de infiltração e reduzir a compactação do solo.

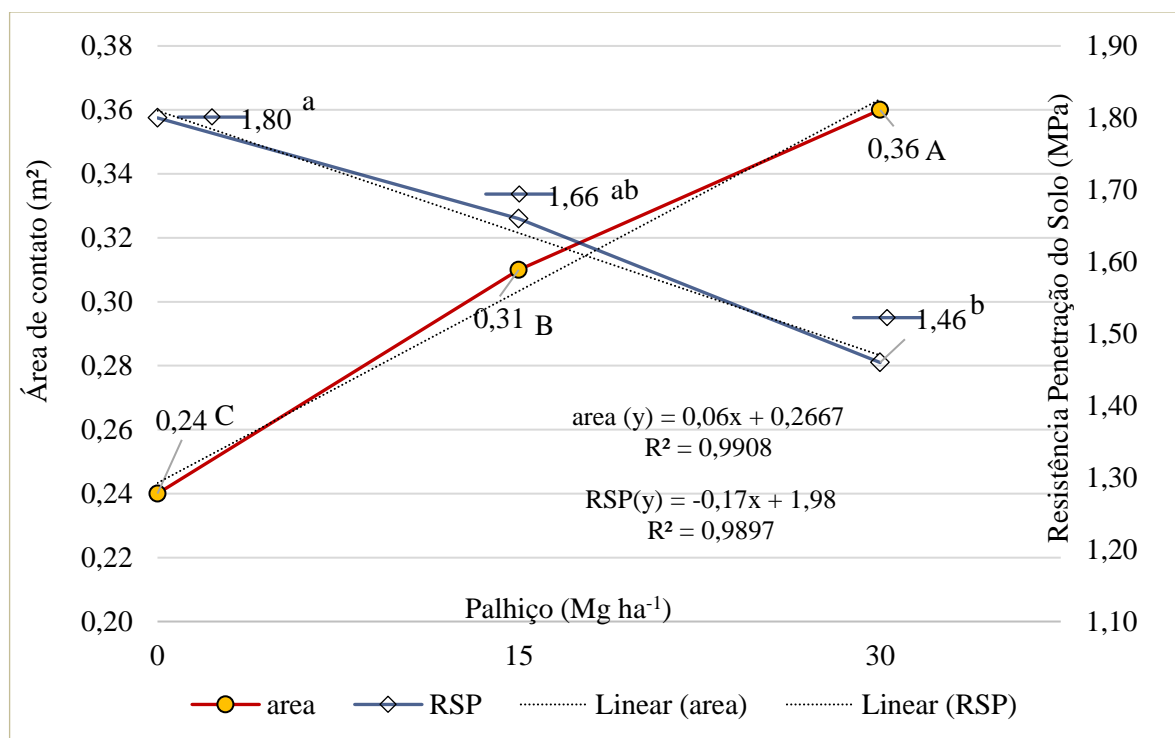
Em superfícies deformáveis como nos solos descobertos, recém preparados ou com teores altos de água, as menores áreas totais causam maior estresse à estrutura física do solo, não sendo recomendados para estes casos pneus estreitos e com alta pressão de inflação, sob pena de danos permanentes ao solo (ALAOUI e DISERENS, 2018).

Na Figura 20 é possível observar o comportamento inversamente proporcional obtido entre a resistência à penetração do solo e a área de contato total dos rodados. Obteve-se diferença estatística para a área de contato para as superfícies com e sem cobertura vegetal, com maiores áreas de contato na superfície com 30 Mg ha⁻¹, seguida pela superfície com 15 Mg ha⁻¹ e 0 Mg ha⁻¹ respectivamente. Aquino et al. (2017), verificaram redução de produtividade da cana-de-açúcar pela remoção total do palhiço superficial do solo. Esses autores inferiram que a manutenção mínima de 50% do material deve permanecer sobre o solo para que as garantias mínimas de produtividade sejam alcançadas.

Melo et al. (2020) em estudos sobre a intensidade de remoção do palhiço de cana-de-açúcar da lavoura, obtiveram resultados semelhantes ao desta pesquisa. Os autores observaram que a remoção parcial promove melhorias produtivas no desenvolvimento do sistema radicular da cultura e, por meio de análise de regressão, estimaram que as quantidades ideais de palhiço a serem mantidas sobre o solo ficam entre 8,5 e 13 Mg ha⁻¹.

Gonzaga et al. (2018), concluíram que a manutenção parcial do palhiço contribuiu para a redução da emissão de gases do efeito estufa. Tal conclusão incrementa a eficiência ambiental e produtiva da cadeia da cana-de-açúcar, atualmente tão engajada nas políticas conservacionistas de energia limpa e produção de combustíveis renováveis.

Figura 20 – Coeficiente de Determinação (r^2) e teste de Tukey para área de contato e resistência à penetração do solo nos ensaios com o pneu P1 (275/80R22.5-Duplo) em tanque com 0, 15 e 30 Mg ha⁻¹ de palhiço em cobertura.



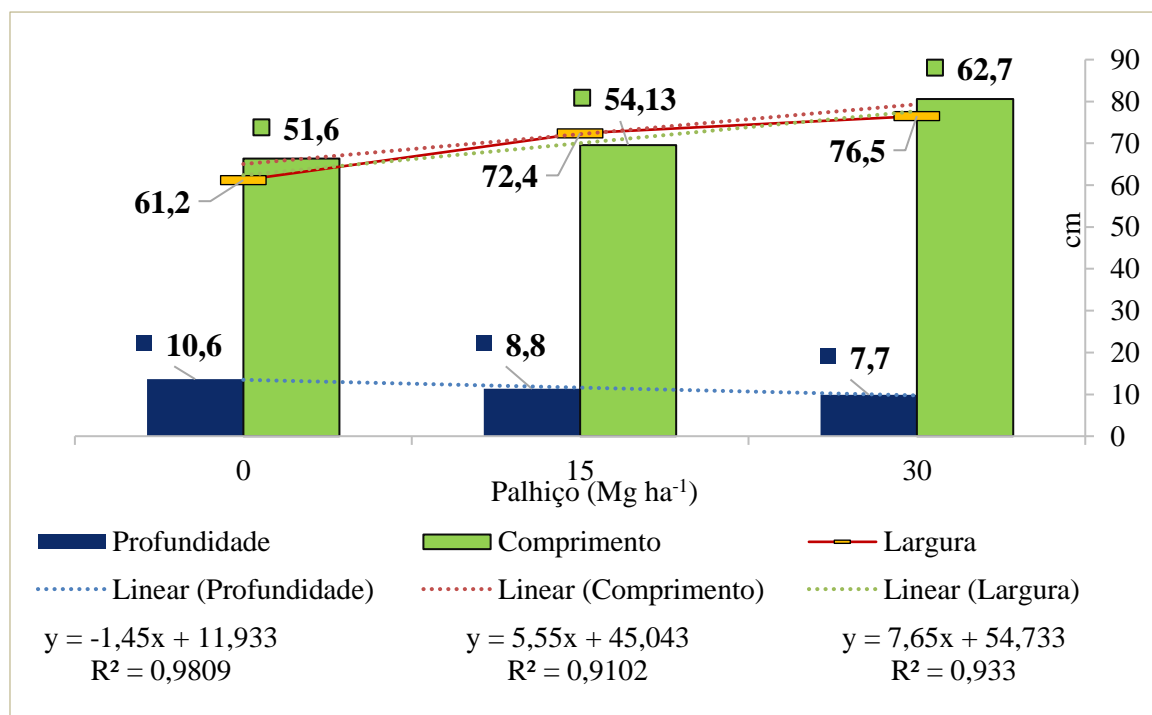
*médias com letras minúsculas diferentes indicam diferença estatística pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade para RSP; médias com letras maiúsculas diferentes indicam diferença estatística pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade.

Os maiores valores de resistência à penetração foram obtidos no solo sem cobertura vegetal; entretanto, para as superfícies com 15 e 30 Mg ha⁻¹ de palhiço, não ocorreu diferença estatística, indicando que para o modelo de pneu P1, a atenuação da compactação do solo se dá a partir de 15 Mg ha⁻¹, nesse caso abrindo caminho para a retirada parcial do palhiço do campo, sem prejuízos para a estrutura física do solo. O manejo da cobertura vegetal é decisivo para a manutenção do potencial produtivo do solo e afeta diretamente a sua resistência à penetração (THEODORO et al., 2018), assim em áreas de preparo convencional o solo fica susceptível ao estresse causado pela amplitude de temperatura e pela influência de agentes de intemperismo como a chuva e os ventos, acelerando a perda de fertilidade e os processos erosivos. Os altos coeficientes de correlação $r^2=0,98$ para o incremento da resistência à penetração do solo e, $r^2=0,99$ para o aumento da área de contato, indicam o ajuste linear em função do aumento de palhiço em superfície. Conforme aumenta a cobertura

vegetal, ocorre o decréscimo da RSP e aumenta linearmente a área de contato ou interação rodado-solo.

A Figura 21 descreve o comportamento das variáveis comprimento, largura e profundidade do recalque causado pelo pneu no solo. Considerando-se como referência os dados do solo descoberto, a profundidade foi reduzida em 17 e 27,3%, e a área de contato acrescida em 4,9% e 21,5% nos solos com cobertura de 15 Mg ha⁻¹ e 30 Mg ha⁻¹ respectivamente. Os coeficientes de correlação de 0,98 para profundidade, 0,91 para o comprimento e 0,93 para a largura da área de contato, com ajuste linear, indicam que as variáveis são altamente correlacionadas, entretanto, o coeficiente angular negativo apresentado pela variável profundidade explica a inversão de proporcionalidade desta com o incremento de palhiço em cobertura no solo.

Figura 21 - Coeficiente de Determinação (r^2) para a deformação causada pelo pneu P1 – 275/80R22.5 para as variáveis de comprimento, largura e profundidade do recalque em função das quantidades de 0; 15 e 30 Mg ha⁻¹ de palhiço em cobertura.



He, Sandu e Osório (2019) apresentam uma série de estudos para a simulação de condições de tração e desempenhos de conjuntos mecanizados onde as informações acerca da área de contato e suas dimensões são variáveis de entrada importantes para a assertividade do modelo matemático. Entretanto, a dificuldade dos modelos de simulação é estimar as características superficiais do solo, esta pesquisa apresenta uma alternativa para ensaios e obtenção de dados em condições controladas.

Os resultados apresentados permitem concluir que a cobertura vegetal promove o incremento da área de contato com o solo através do aumento linear do comprimento e da largura de contato, com consequente redução na profundidade do recalque. A alteração dinâmica da interação rodado-solo, pelo aumento da área de contato, reduz o estresse propagado em subsolo, o que reflete em menores resistências à penetração. Pytka et al. (2018) em estudo analisando a interação rodado solo apresentaram resultados de área de contato obtidas através de imagens fotográficas em três dimensões, entretanto, a aplicação de análise de imagens em comparação com o sistema de escaneamento utilizado na presente pesquisa, apresenta limitações de resolução e repetibilidade dos dados.

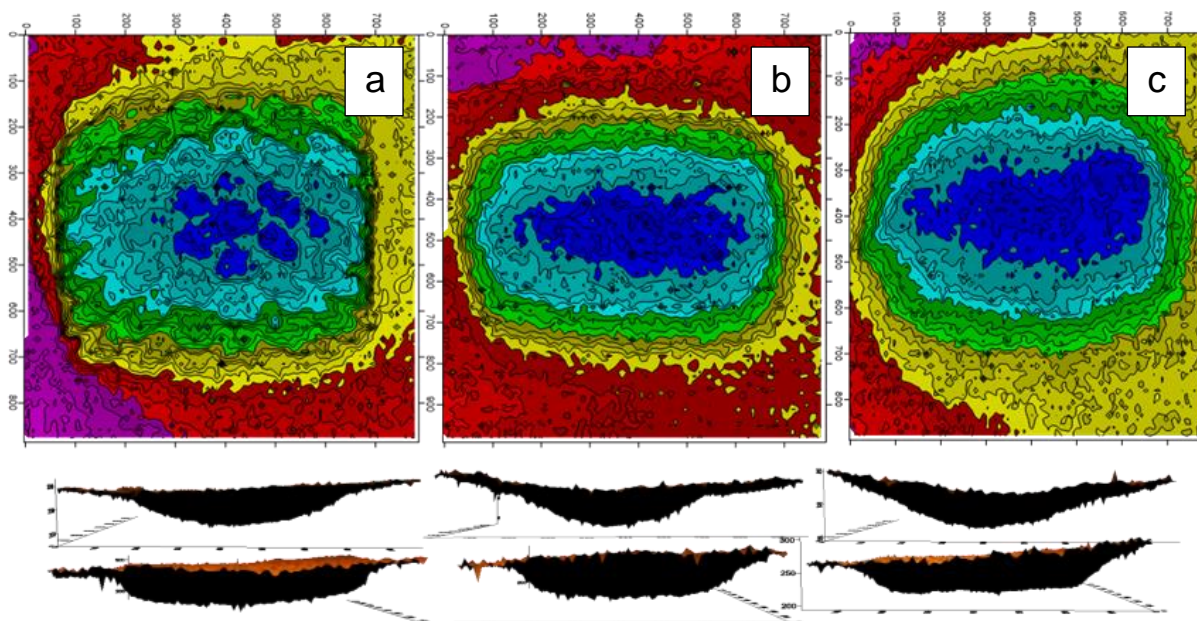
4.3 Recalque e área de contato obtidos nos ESD para o pneu P2 600/50R22.5.

Na figura 22 (a) é possível verificar a evidência das marcas impostas pelas garras do pneu no recalque dos tanques de solo, em solo descoberto foram evidenciadas as maiores profundidades do recalque.

Ao comparar-se a Figura 22 (a) com as Figuras 22 (b) e 22 (c), observou-se que, em função do aumento da quantidade de palhiço, ocorre a ampliação da área total de contato e uma evidente redução gradual na profundidade do recalque, fato que indica a maior distribuição da carga em superfície, ou espalhamento das cargas em superfície, com a possível redução da distribuição de cargas no subsolo.

De acordo com Gabriel Filho et al. (2004) a cobertura vegetal na superfície do solo afeta diretamente a capacidade de tração das máquinas, de forma que, em áreas com maior cobertura vegetal, os autores obtiveram maiores coeficientes de tração. Além disso, a composição e o tipo de cultura vegetal interferem na patinagem e no desempenho energético destas durante a execução das operações agrícolas.

Figura 22 - Área de contato e recalque do pneu P2 - 600/50R22.5 em tanque sem cobertura vegetal (a); com cobertura vegetal equivalente a 15Mg ha⁻¹ (b) e 30 Mg ha⁻¹ (c) de palhiço em cobertura.



Beauclair, Tezotto e Manocchio Jr. (2015) afirmaram que, empiricamente têm-se adotado a manutenção de pelo menos 50% da biomassa residual sobre o solo, com vistas à manutenção de suas qualidades estrutural, física e biológica. Melo et al. (2020) inferiram que a manutenção de 8,5 a 13 Mg ha⁻¹ de palhiço sobre o solo, propicia maior desenvolvimento radicular e produção total de colmos.

A maior área de contato total proporcionada pela presença do palhiço em superfície evidencia-se a partir do tratamento com 15 Mg ha⁻¹, indicando que, o recolhimento parcial de 50% do palhiço da superfície do solo ou a manutenção de 100% do material na lavoura (30 Mg ha⁻¹) apresentam características semelhantes em relação à deformação superficial do solo.

Aquino et al. (2017) em estudo sobre a quantidade mínima de material a ser mantido na superfície do solo, afirmaram a necessidade de se manter um mínimo de 50% do material em cobertura, com isso garante-se a disponibilidade de água para a cultura da cana-de-açúcar em condições de estresse hídrico e principalmente mantém-se as condições produtivas do solo. Resultados semelhantes foram obtidos por Lisboa et al. (2019), em estudo sobre a manutenção de palhiço na cana-de-açúcar, concluíram que a manutenção mínima de palhiço para a manutenção da produtividade era de 50%,

entretanto, os autores inferiram que essa taxa de remoção pode ser variável em função da textura do solo.

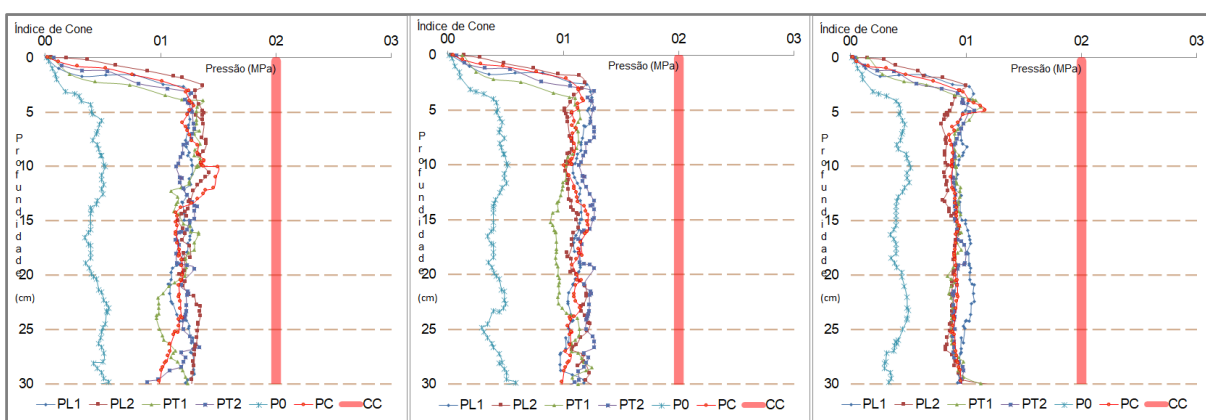
Rasche e Del Diego (2019), afirmaram que a taxa de recuperação do palhicho deve ficar entre 40 e 60% da matéria prima total, entretanto, é fator determinante para a retirada, o tipo de solo e as características de manejo. O aumento da área de contato total entre pneu e solo, permite com que menores pressões sejam aplicadas em cada ponto do subsolo, atenuando o estado de compactação deste.

Gomes et al. (2016) concluíram que quanto mais se retira palhicho da lavoura, menor fica o custo da operação, no entanto, essa afirmação deve levar em consideração outros fatores para a tomada de decisão, sob pena de ações errôneas de manejo e prejuízos na qualidade física do solo.

Na Figura 23, verifica-se o comportamento decrescente das resistências à penetração do solo em função da quantidade de material vegetal em superfície. Os resultados desta pesquisa corroboram com os obtidos por Castioni et al. (2019), onde verificou-se a redução nos impactos do tráfego de máquinas em função da quantidade de palhicho em cobertura.

A cobertura vegetal permite o aumento da área de contato pneu solo pelo efeito de distribuição de cargas que o palhicho proporciona, no campo, de forma empírica os produtores e agricultores conhecem esse fenômeno como o “efeito colchão da palha”.

Figura 23 - Índice de cone médio gerado pelo pneu P2 (600/50R22.5) em tanque sem cobertura vegetal; com 15Mg ha⁻¹ e 30 Mg ha⁻¹ de palhicho em cobertura.



Para o pneu P2 o índice de cone não superou o ponto de referência de 2 MPa em nenhum dos tratamentos, entretanto, percebe-se um acréscimo nas resistências à

penetração do solo a medida que se reduz a cobertura do solo. Valores de resistência à penetração acima de 3 MPa tornam-se limitantes para o crescimento radicular da cana-de-açúcar, com valores críticos em torno de 3,8 MPa (SÁ et al., 2016).

De acordo com Oliveira Filho et al. (2016), a compactação de solo é um dos principais fatores limitantes ao crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar, pois limita o crescimento radicular e reduz a absorção de nutrientes e água pela planta. Sob esta óptica, a presença do palhicho no solo incrementa a absorção de nutrientes e contribui para a manutenção da qualidade estrutural do solo, pois reduz a tensão aplicada pelos rodados.

Em solos com alta tensão aplicada, a porosidade é severamente reduzida (Yang et al., 2020). Sá et al. (2016) em trabalho avaliando a compactação do solo, com e sem escarificação na cultura da cana-de-açúcar, não encontraram diferença estatística da resistência à penetração em Latossolo vermelho argiloso, porém, afirmaram que 3,8 MPa de resistência à penetração mostrou-se limitante ao crescimento radicular da cana-de-açúcar.

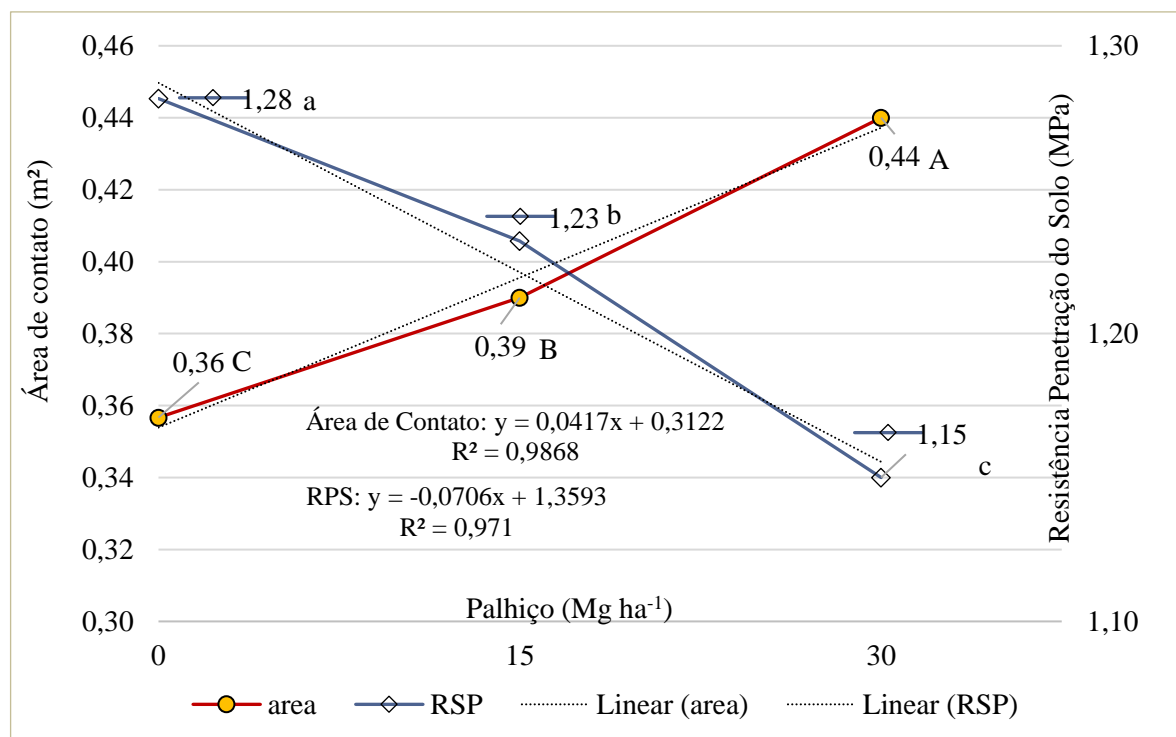
No presente trabalho as resistências à penetração encontradas não atingiram valores limitantes ao crescimento radicular da cana-de-açúcar, entretanto, o teor de água médio de 22% e a textura franco-arenosa do solo estudado, contribuíram para as baixas resistências à penetração encontradas.

A Figura 24 descreve o coeficiente de determinação (r^2) em relação ao aumento de área de contato e a redução da resistência à penetração do solo em função da cobertura vegetal nos ensaios com o pneu P2. Os altos coeficientes de correlação $r^2=0,97$ para o incremento da resistência à penetração do solo e, $r^2=0,98$ para o aumento da área de contato, indicam o ajuste linear em função do aumento de palhicho em superfície, de forma que, o aumento da cobertura vegetal propicia o decréscimo da RSP e acresce linearmente a área de interação do rodado com o solo.

Os resultados desta pesquisa evidenciam que a manutenção mínima de 50% da biomassa na lavoura é fundamental para proteger o solo do impacto causado pelos rodados. Esta informação é interessante do ponto de vista do manejo do solo e planejamento do processo de recolhimento.

Os resultados dessa pesquisa evidenciam que a manutenção de 15 Mg ha⁻¹ de palhicho, promove o aumento da área de contato e reduz a compactação do solo, assim esse fator deve ser levado em consideração no momento da tomada de decisão referente à quantidade de material a ser recolhido do campo.

Figura 24 - Coeficiente de Determinação (r^2) e teste de Tukey para área de contato e resistência à penetração do solo nos ensaios com o pneu P2 (600/50R22.5) em tanque com 0, 15 e 30 Mg ha⁻¹ de palhiço em cobertura.



*médias com letras minúsculas diferentes indicam diferença estatística pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade para RSP; médias com letras maiúsculas diferentes indicam diferença estatística pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade.

Castioni et al. (2019), em pesquisa sobre a compactação do solo em função da cobertura vegetal com palhiço de cana-de-açúcar, observaram que a manutenção da cobertura do solo interferiu positivamente na redução da compactação causada pelas máquinas, de forma que, solos com maior cobertura vegetal apresentam maior resiliência ao trânsito de máquinas. Resultados que contribuem com os obtidos nesta pesquisa.

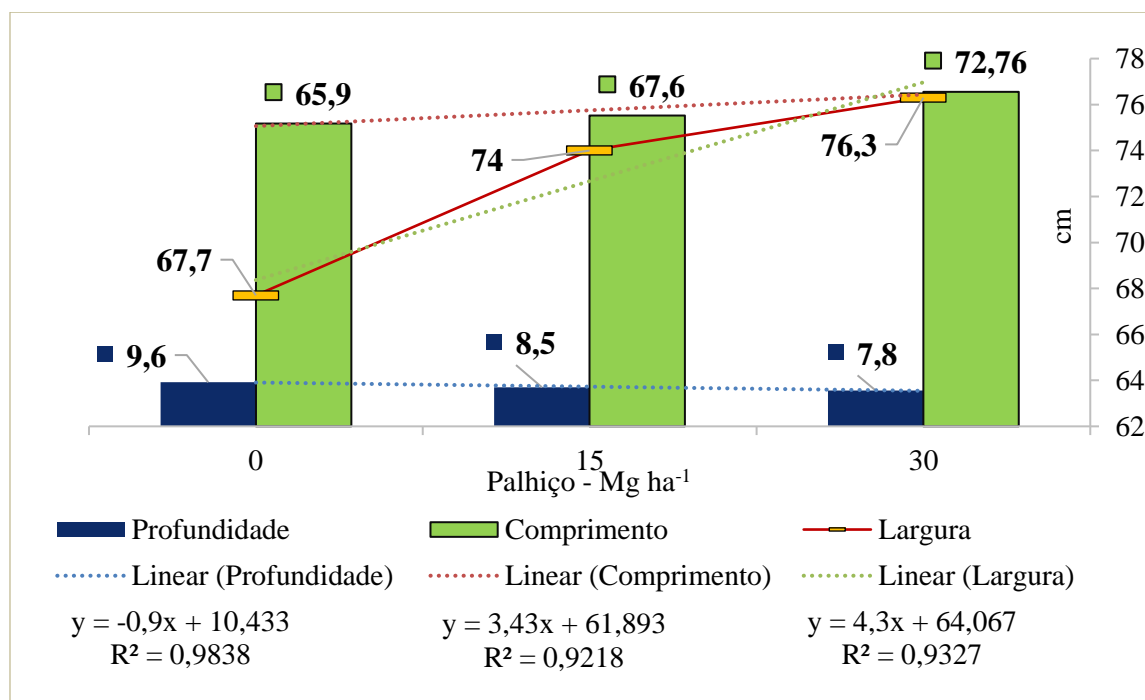
Carneiro et al. (2020) concluíram que a presença de palhiço no solo melhora as características agronômicas da cana-de-açúcar, enquanto o consórcio com Braquiária reduz o desempenho da cultura, o que indica benefícios da cobertura morta em detrimento da cobertura verde, que pode ser competitiva com a cultura principal.

O incremento da área de contato com o solo permite que o pneu distribua melhor as cargas e cause menor estresse na estrutura física deste, principalmente na camada de desenvolvimento radicular da cultura, fato que ficou evidenciado nos resultados

deste trabalho e que, colaboram com Aquino et al. (2017) onde verificou-se melhorias nas condições do solo para produção de cana-de-açúcar com a manutenção parcial da cobertura vegetal na lavoura. Os autores afirmaram que, em solos que sofreram processos de queima ou que sustentam quantidades menores do que 25% do palhicho originalmente depositado na colheita, apresentam prejuízos na longevidade e produtividade do canavial, sendo que essas perdas podem estar relacionadas ao contínuo trânsito de máquinas e a fatores de degradação da estrutura química e física do solo.

A Figura 25 descreve o comportamento das variáveis comprimento, largura e profundidade do recalque causado pelo pneu P2 ao solo.

Figura 25 - Coeficiente de Determinação (r^2) para a deformação causada pelo Pneu P2 – 600/50R22.5 para as variáveis de comprimento, largura e profundidade do recalque em função das quantidades de 0; 15 e 30 Mg ha⁻¹ de palhicho em cobertura.



A profundidade de recalque e a deformação que o solo apresenta ao entrar em contato com um rodado depende, entre outros fatores, da sua textura e seu teor de água (JÚNNYOR, 2019), portanto, solos com alto teor de água tendem a apresentar maiores deformações pois a água atua como agente lubrificante entre as partículas do solo. No entanto, em solos com o teor de água elevado, mesmo em estado

adensado o desenvolvimento radicular não é afetado, pois a água atua como agente facilitador da penetração das raízes ao solo (TAYLOR e BRAR, 1991).

Considerando-se como referência os dados do solo descoberto, a profundidade foi reduzida em 11,5 e 18,7%, e a área de contato acrescida em 2,6% e 9,5% nos solos com cobertura de 15 Mg ha⁻¹ e 30 Mg ha⁻¹ respectivamente. Mamkagh (2019) em estudo relacionado à eficiência energética de máquinas e seus rodados na agricultura, concluíram que a área de contato é o fator determinante da transformação de potência disponível no motor em tração útil. Maiores áreas de contato permitem que a máquina desenvolva maior força trativa e atenua o impacto desta no subsolo.

Os coeficientes de correlação da Figura 25, com r^2 de 0,98; 0,92 e 0,93 para profundidade, comprimento e largura de contato, respectivamente, indicam que as variáveis são altamente correlacionadas à presença de palhiço no solo. O coeficiente angular negativo apresentado pela variável profundidade explica a inversão de proporcionalidade com o incremento de palhiço em cobertura no solo, ou seja, quanto maior a cobertura, menor a profundidade do recalque.

Os resultados desta pesquisa evidenciam a importância da manutenção da cobertura vegetal sobre a lavoura, como forma de atenuar o impacto dos rodados sobre a qualidade física do solo.

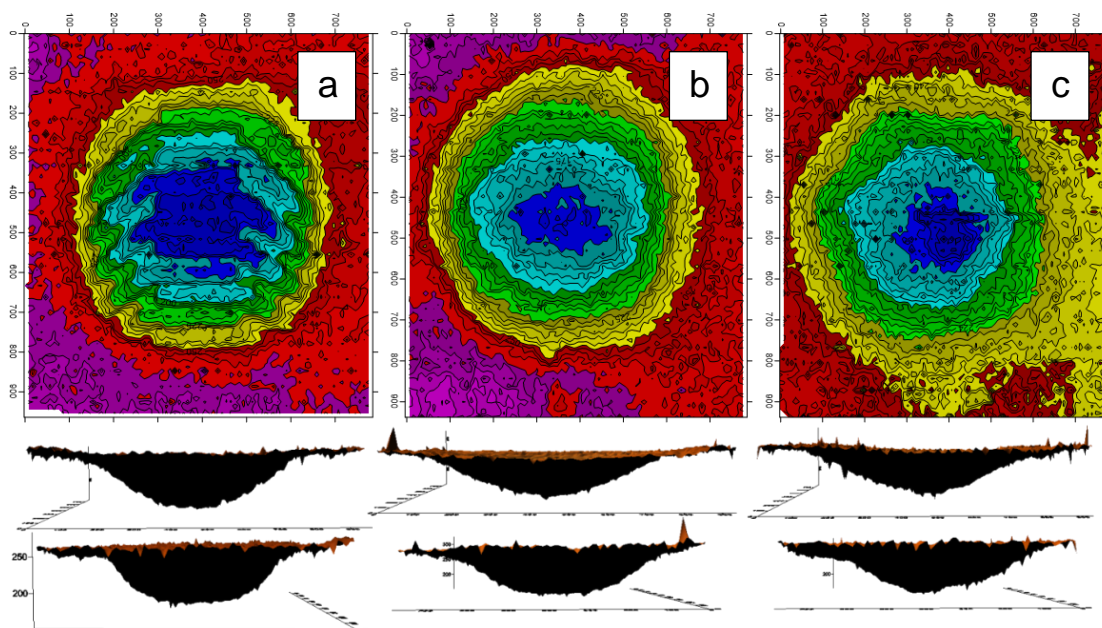
4.4 Recalque e área de contato obtidos nos ESD para o pneu P3 600/50-22.5

A exemplo do que ocorreu com P1 e P2, nos ensaios de recalque para o pneu P3, as imagens obtidas através do escaneamento digital foram dispostas sequencialmente em função das quantidades de palhiço em cobertura. Na Figura 26 (a) é possível observar na superfície do solo, marcas impostas pelas garras do pneu. Ao compararmos a Figura 26 (a) com 26 (b) e 26 (c), verifica-se que o aumento da quantidade de palhiço em cobertura promove ampliação da área total de contato e reduz a profundidade do recalque.

Os resultados obtidos com o pneu P3 permitem verificar a redução na profundidade de recalque em função do aumento do palhiço em superfície. O aumento da área de contato, a exemplo do que ocorreu com os demais modelos, propiciou a redução da resistência à penetração do solo. Carneiro et al. (2020) em estudo sobre a presença do palhiço em cobertura na cultura da cana-de-açúcar, observaram que a cobertura

vegetal é um dos fatores mais importantes para a garantia produtiva em solos com baixo potencial produtivo.

Figura 26 - Área de contato e recalque do pneu P3 - 600/50-22.5 em tanque sem cobertura vegetal (a); com cobertura vegetal equivalente a 15Mg ha⁻¹ (b) e 30 Mg ha⁻¹ (c) de palhiço em cobertura.



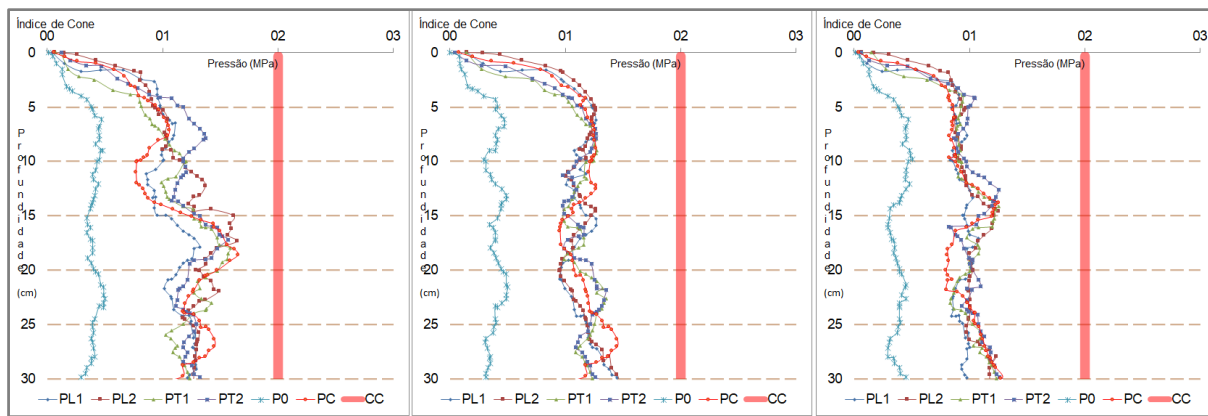
Nos índices de cone apresentados por P3 é possível observar a maior dispersão dos gráficos em cada ponto do recalque. Nos modelos diagonais, a menor área de contato total, proporciona maior pressão dissipada na estrutura do solo, fato que pode ser relacionado ao comportamento das curvas de índice de cone (Figura 27).

Os resultados obtidos estão de acordo com Rosim et al. (2012) onde os solos com as maiores coberturas desempenharam menores resistências à penetração. Na presente pesquisa, a maior área de contato total proporcionada pela presença do palhiço em superfície evidencia-se a partir do tratamento com 15 Mg ha⁻¹, indicando que, o recolhimento parcial de 50% do palhiço da superfície do solo ou a manutenção de 100% do material na lavoura (30 Mg ha⁻¹) apresentam características semelhantes em relação à deformação superficial do solo.

Lisboa et al. (2019) em estudo sobre a compactação do solo observaram que a manutenção de 50% de palhiço em cobertura na cana-de-açúcar proporciona um cenário de benefício duplo, já que possibilita o aproveitamento de metade da biomassa residual para geração de energia e etanol de segunda geração na indústria,

enquanto a outra metade permanece no campo, contribuindo para a manutenção da qualidade do solo e realizando serviços ecossistêmicos promotores nesse meio.

Figura 27 - Índice de cone médio gerado pelo pneu P3 600/50-22.5 em tanque sem cobertura vegetal; com 15Mg ha⁻¹ e 30 Mg ha⁻¹ de palhiço em cobertura.



Estudos recentes têm avaliado o processo energético e a viabilidade de aproveitamento do palhiço para produção de etanol de segunda geração (BATISTA et al., 2019), no entanto, a retirada total desse material do campo necessita ser reavaliada. Os resultados da presente pesquisa indicam que a manutenção parcial do palhiço, em quantidade mínima de 15 Mg ha⁻¹, deve ser realizada como forma de atenuação do impacto dos rodados, em prol da manutenção da estrutura física do solo.

As maiores resistências à penetração do solo na camada de 0 a 20cm de profundidade, observadas em todos os tratamentos indicam a maior restrição física do solo justamente onde se encontram as maiores concentrações do sistema radicular da cana-de-açúcar. Lovera et al. (2021) comparando a distribuição de raízes de cana-de-açúcar em perfil de até 60cm de profundidade, ao longo dos três primeiros anos da cultura, encontrou até 60% da massa radicular concentrados na camada de 0 a 20cm, fato que indica a necessidade de manejo adequado e controle da compactação nessa camada.

Pankrath et al. (2019) estudaram a aplicabilidade de monitoramento da deformação do solo através de sensores ópticos e diretos, essa técnica permite avaliar o solo de forma dinâmica, tarefa que é altamente complexa e que poderia servir de referência para as formas de manejo e gestão da biomassa residual.

Michelazzo e Braunbeck (2008) e Cardoso et al. (2015) em estudos sobre o aproveitamento do palhço no processo industrial indicam maiores retornos econômicos na aplicação do sistema de colheita integral da cana-de-açúcar, nesse processo, a biomassa residual sobre a lavoura é insignificante, fato que pode comprometer a qualidade física, química e biológica do solo.

A avaliação econômica do processo de recolhimento do palhço deve basear-se em modelos multivariáveis e, para serem mais assertivos, devem englobar as características edafoclimáticas regionais, manejos mecanizados, processos industriais entre outros fatores, caso contrário, tornam-se incompletos e incoerentes com a realidade produtiva.

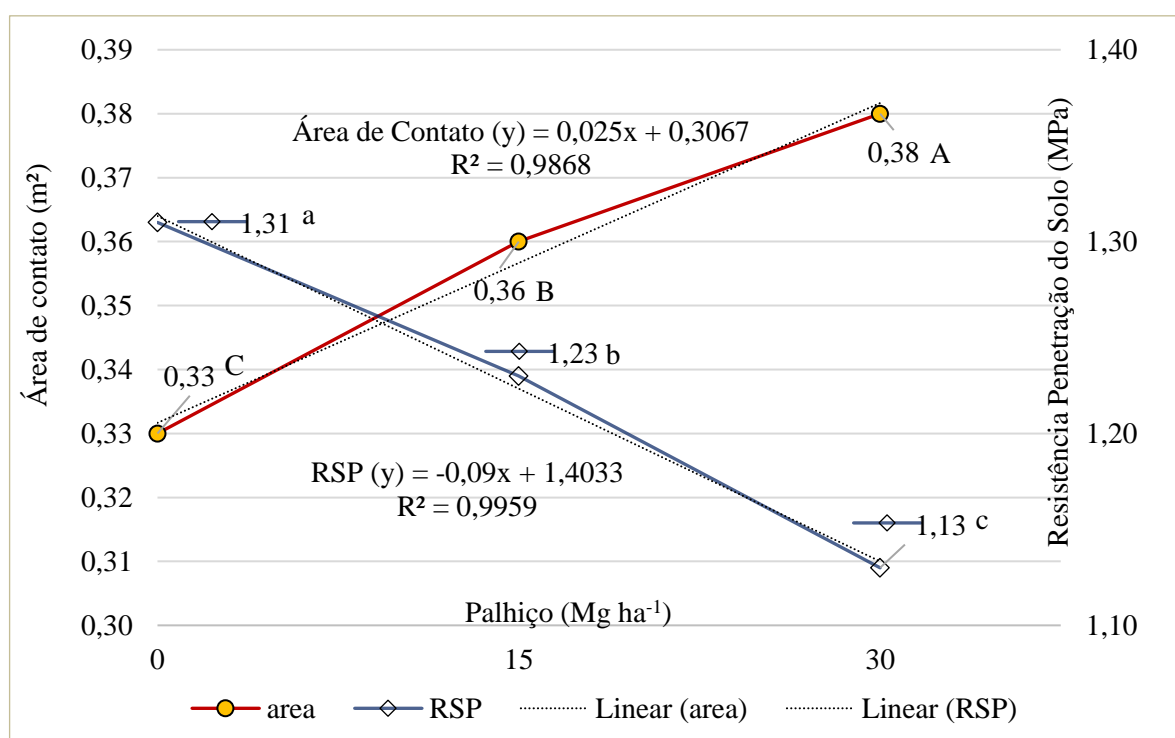
A presente pesquisa vem a contribuir com os estudos realizados por Castioni et al. (2019); Aquino et al. (2017) e Lisboa et al. (2019), acrescentando nessas, além do ponto de vista de produtividade e manutenção da estrutura física do solo, o aspecto de interação dos rodados e impacto destes na estrutura física do solo em função da quantidade de palhço em cobertura. Os resultados apresentados indicam que o fator “pneu” apresenta influência significativa no processo de compactação do solo e precisa ser levado em consideração nos modelos preditivos da interação dinâmica rodado-solo.

Na Figura 28, verifica-se o comportamento decrescente da resistência à penetração do solo em função da quantidade de material vegetal no solo. Os coeficientes de correlação $r^2=0,99$ para a resistência à penetração do solo e, $r^2=0,98$ para o aumento da área de contato, indicam o ajuste linear em função do aumento de palhço em superfície, em outras palavras, ao adicionar cobertura vegetal, decresce a resistência à penetração do solo e aumenta linearmente a área de interação do rodado com a superfície.

Interessante notar que, nos ensaios em superfície deformável o teor de água do solo no tanque foi padronizado em todas as parcelas experimentais, porém, em situações de campo a cobertura vegetal sobre o solo reduz o gradiente de temperatura deste meio, mantendo maiores teores de água no perfil, fato que contribui para o desenvolvimento das culturas agrícolas. Carvalho et al. (2017) em extensa revisão sobre a manutenção da cobertura vegetal na cultura da cana-de-açúcar, concluíram que a quantidade mínima para manter as condições de solo adequadas é de 7Mg ha^{-1} , de forma que com essa quantidade de material em superfície são mantidos os principais benefícios agrônômicos e ambientais.

Para Popin et al. (2019) a quantidade mínima para garantir a qualidade do solo e mitigar a emissão de gases de efeito é de 6 Mg ha⁻¹. Os resultados encontrados neste trabalho, indicam que a manutenção mínima de 15 Mg ha⁻¹ propicia atenuação da resistência à penetração do solo. Com 30 Mg ha⁻¹ de palhiço os benefícios de redução do impacto no subsolo são acentuados.

Figura 28 - Coeficiente de Determinação (r^2) e teste de Tukey para área de contato e resistência à penetração do solo nos ensaios com o pneu P3 (600/50-22.5) em tanque com 0, 15 e 30 Mg ha⁻¹ de palhiço em cobertura.

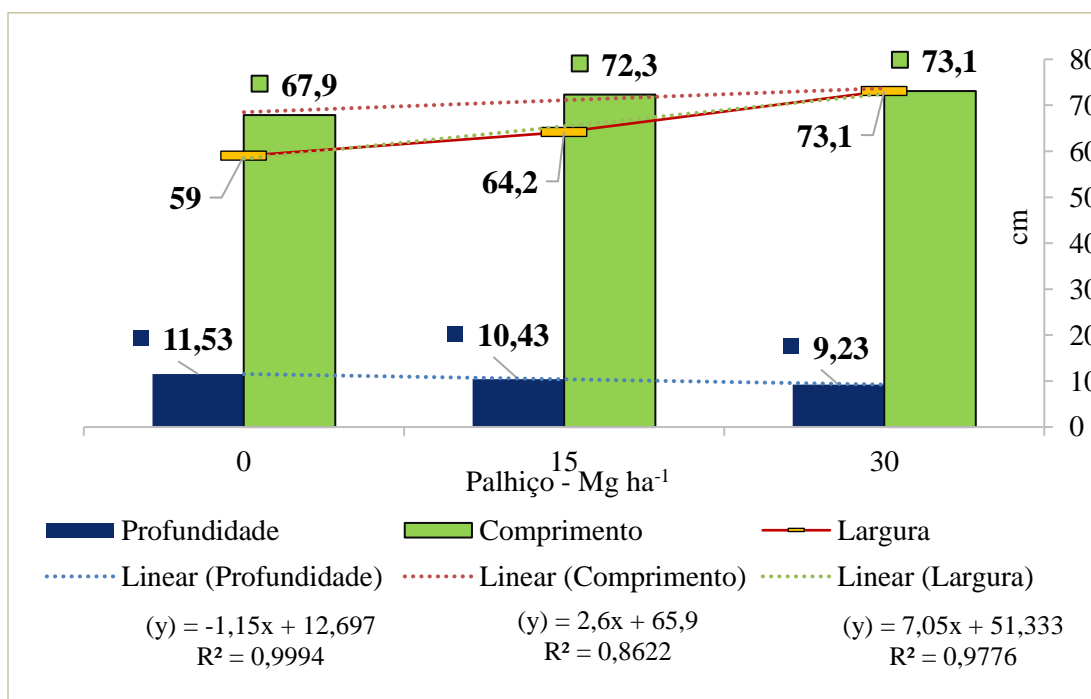


*médias com letras minúsculas diferentes indicam diferença estatística pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade para RSP; médias com letras maiúsculas diferentes indicam diferença estatística pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade.

Os resultados do teste de Tukey apresentaram diferenças estatísticas para as áreas de contato e resistências à penetração do solo em função da cobertura vegetal. A Figura 29 detalha o formato da área de contato em profundidade, comprimento e largura da deformação no solo. Verificou-se que ocorreu ajuste linear positivo para o aumento do comprimento e da largura da área de contato. As maiores médias de largura e comprimento foram expressas nos tratamentos com 15 e 30 Mg ha⁻¹ de palhiço em cobertura. Os coeficientes obtidos (r^2) de 0,98 e 0,99 indicam que o comportamento da variável apresenta linearidade com o aumento de biomassa no solo.

O coeficiente angular elevado para a largura de contato expõe os maiores ângulos de crescimento ou resposta em relação ao aumento da biomassa residual. A profundidade de contato conseqüentemente foi reduzida com o incremento de palhiço em cobertura. A dissipação de carga causada pelo aumento da biomassa atenuou o impacto do rodado no subsolo, aumentando a dissipação em superfície. Braida (2004) em estudo relacionando a qualidade física do solo com a cobertura vegetal e matéria orgânica, concluiu que a presença de resíduos vegetais na superfície do solo aumenta a sua elasticidade e resiliência à compactação.

Figura 29 - Coeficiente de Determinação (r^2) para a deformação causada pelo Pneu P3 (600/50-22.5) para as variáveis de comprimento, largura e profundidade do recalque em função das quantidades de 0; 15 e 30 Mg ha⁻¹ de palhiço em cobertura.



Considerando-se como referência os dados do solo descoberto, a profundidade foi reduzida em 9,5 e 20%, e a área de contato acrescida em 6,5% e 7,5% nos solos com cobertura de 15 Mg ha⁻¹ e 30 Mg ha⁻¹ respectivamente. Os coeficientes de correlação (r^2) de 0,99 para profundidade, 0,86 para o comprimento e 0,97 para a largura da área de contato, com ajuste linear, indicam que as variáveis são altamente correlacionadas

com a presença de cobertura no solo. A profundidade apresentou correlação inversa, como ocorreu com os demais modelos de pneu avaliados.

Tenelli et al. (2019), em pesquisa relacionando o estoque de carbono armazenado no solo, em relação a cada Mg ha^{-1} depositado em superfície, chegaram ao valor de 95kg ha^{-1} de carbono em solos argilosos e de 55kg ha^{-1} em franco-arenosos. Os autores afirmaram que a remoção total do palhicho pode prejudicar a qualidade física e diminuir a atividade microbiana do solo.

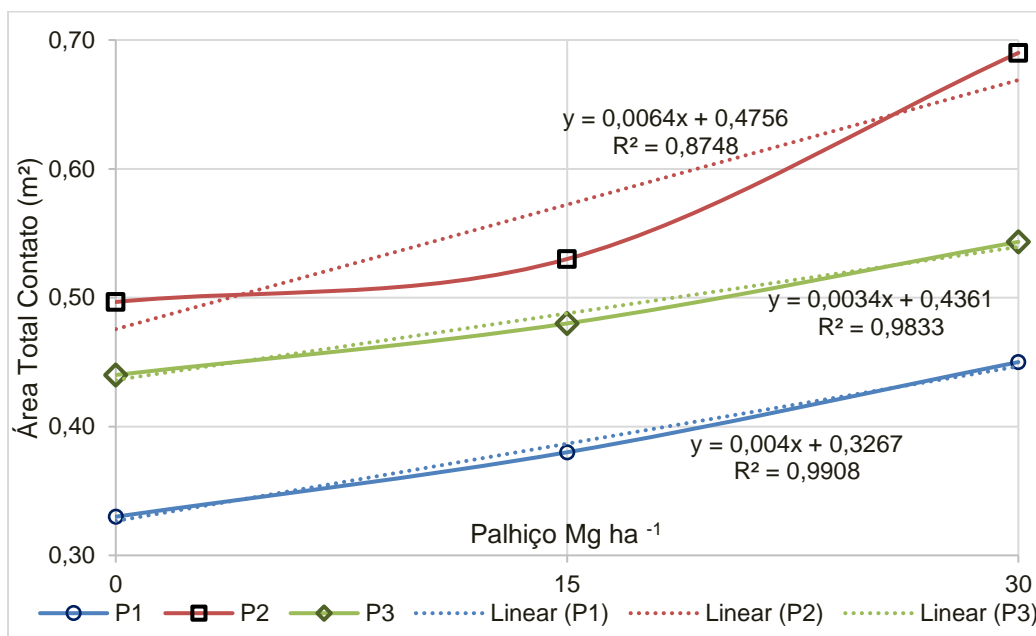
4.5 Resultados comparativos dos Ensaios em Superfícies Deformáveis (ESD) dos pneus P1, P2 e P3 em relação à diferentes superfícies de solo com 0; 15 e 30 Mg ha^{-1} de palhicho em cobertura.

Os resultados apresentados até o momento permitem a inferir que, independentemente do modelo de pneu ensaiado, as áreas totais de contato são incrementadas com o aumento de palhicho em superfície, bem como, a resistência à penetração do solo é reduzida proporcionalmente.

Neste tópico, os pneus foram comparados entre si em função das diferentes superfícies do tanque de solo. A Figura 30 apresenta o comportamento da área total do recalque em relação aos modelos de pneus P1, P2 e P3 nas condições de 0, 15 e 30 Mg ha^{-1} de palhicho em cobertura. Verifica-se pelo coeficiente de determinação (r^2) que, em todos os pneus avaliados ocorreu linearidade entre o aumento da área total de contato pneu-solo e o aumento da cobertura vegetal, indicando que as variáveis apresentam proporcionalidade. As maiores áreas de contato foram obtidas por P2, seguidas por P3 e P1 respectivamente.

Os resultados confirmaram que o aumento da cobertura vegetal propiciou atenuação da resistência à penetração do solo independentemente do modelo de pneu utilizado. Entretanto, o coeficiente angular apresentado por P2 foi o mais elevado dentre os pneus, indicando que a cobertura vegetal apresentou maior interferência nessa aplicação. A presença de palhicho em cobertura aumentou a área de contato total e reduziu a pressão sobre o solo. Os resultados colaboram com os obtidos por Silva et al. (2016).

Figura 30 - Coeficiente de Determinação (r^2) entre a área de contato total em diferentes coberturas de solo para P1, P2 e P3



A Tabela 4 apresenta as diferenças entre as áreas de contato total em diferentes superfícies pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade. O pneu P1 apresentou diferença estatística para a variável área de contato em função das condições de 0, 15 e 30 Mg ha⁻¹ de palhiço em cobertura. Os pneus P2 e P3 apresentaram diferença para a quantidade de palhiço em 30 Mg ha⁻¹, já em 0, 15 Mg ha⁻¹ as médias não diferiram estatisticamente.

Tabela 4 - Teste de médias da variável área de contato total para os modelos P1, P2 e P3 nas superfícies de 0, 15 e 30 Mg ha⁻¹ de palhiço em cobertura.

Área total	Pneu								
	P1		P2		P3				
Cobertura (Mg ha ⁻¹)	m	s	m	s	m	s			
0	0,33	c C	0,0058	0,50	a B	0,0208	0,44	b B	0,0100
15	0,38	c B	0,0100	0,53	a B	0,0300	0,48	b B	0,0100
30	0,45	c A	0,0265	0,69	a A	0,0265	0,54	b A	0,0208

*Comparação nas linhas: letras minúsculas distintas, as médias diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) **Comparação nas colunas: letras maiúsculas distintas, as médias diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) C.V. (%) = 4,09. m=média; s=desvio padrão.

Ao compararmos as médias entre os pneus podemos verificar que independentemente da superfície estudada as maiores áreas foram expressas por P2, seguido por P3 e P1, respectivamente. Os resultados evidenciam que, tanto o modelo de pneu, quanto a superfície interferem na área de contato rodado-solo. As maiores áreas de contato foram expressas por P2, e a superfície com 30 Mg ha⁻¹ de palhiço em cobertura apresentou as maiores áreas de contato, indicando para essa variável, que a manutenção de 100% do material no solo pode reduzir a pressão causada pelos rodados através do incremento da sua área de interação.

Considerando-se as médias da área de contato sem cobertura vegetal como referência, temos para o modelo de pneu P1 um acréscimo 15% na área de contato na superfície com 15 Mg ha⁻¹ e 36% em 30 Mg ha⁻¹ de palhiço. Para P2, a área de contato sofreu incremento de 6% e 38% nas superfícies de 15 e 30 Mg ha⁻¹, respectivamente.

Para o pneu P3 o incremento em área de contato foi de 9 e 22% nas superfícies de 15 e 30 Mg ha⁻¹. O incremento de área de contato acima de 30% obtido pelos pneus P1 e P2 na superfície com 30 Mg ha⁻¹ de palhiço em cobertura, correlacionam-se também com os altos coeficientes angulares que estes apresentaram para a variável estudada.

O pneu P3 aplicando cargas sobre um solo com 30 Mg ha⁻¹ de palhiço em superfície, apresenta área de contato superior à P2 em solo com 15Mg ha⁻¹, o que indica que a tecnologia diagonal pode superar a tecnologia radial em relação à área de contato em função da cobertura vegetal do solo. O mesmo fato ocorre com P1 na superfície com 30Mg ha⁻¹ quando comparado com P3 em solo descoberto, indicando que o pneu duplo de caminhão pode ser utilizado com desempenho superior à tecnologia diagonal se houver cobertura vegetal no solo.

A combinação entre o modelo de pneu utilizado e a quantidade de material vegetal sobre o solo pode servir de base para a tomada de decisão em termos de aquisição e uso de pneus nas áreas canavieiras, dessa forma, os locais que preservam 100% da biomassa residual sobre o solo, podem optar por modelos de pneus com menores áreas de contato, entre outras tecnologias de menor custo, como a aplicação de pneus diagonais em detrimento aos radiais.

A área de contato expressa pelos pneus estudados em função das diferentes superfícies, expande-se no sentido longitudinal e transversal do pneu, fato que pode ser evidenciado pela avaliação do comprimento e da largura da área do recalque.

A Tabela 5 apresenta os testes de médias para o comprimento do recalque dos pneus em função das superfícies com 0, 15 e 30 Mg ha⁻¹ de palhiço em cobertura. Comparando-se os pneus em relação ao comprimento do recalque, verificou-se que P2 e P3 apresentam médias estatisticamente iguais nas superfícies de 0 e 15 Mg ha⁻¹, enquanto em 15Mg ha⁻¹, o pneu diagonal P3 apresentou o maior comprimento. O pneu P1 apresentou as menores médias de comprimento total em todas as superfícies, diferenciando-se de P2 e P3 em todos os tratamentos.

Tabela 5 - Teste de médias para o comprimento do recalque no solo para os modelos P1, P2 e P3 nas superfícies com 0, 15 e 30 Mg ha⁻¹ de palhiço em cobertura.

Comprimento	Pneu					
	P1		P2		P3	
Cobertura (Mg ha ⁻¹)	m	s	m	s	m	s
0	51,60	b C 0,26	65,90	a B 0,98	67,97	a B 1,86
15	54,13	c B 0,45	67,63	b B 0,76	72,30	a A 0,61
30	62,73	b A 0,67	72,77	a A 1,72	73,13	a A 0,76

*Comparação nas linhas: letras minúsculas distintas, as médias diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) **Comparação nas colunas: letras maiúsculas distintas, as médias diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) C.V. (%) = 1,58. m=média; s=desvio padrão

A Tabela 6 evidencia as diferenças entre as larguras de recalque expressas pelos rodados em função das diferentes coberturas do tanque de solo. No solo sem cobertura vegetal a maior largura foi expressa por P2, diferenciando-se de P3 e P1. Já nas superfícies com 15 e 30 Mg ha⁻¹ de palhiço em cobertura não ocorreu diferença estatística entre P1 e P2 para a largura de contato, no entanto as menores médias ocorreram no recalque de P3. O fato de P3 apresentar menor largura pode ser relacionado com a sua maior deformação no sentido longitudinal (comprimento), já evidenciado anteriormente.

Em relação à cobertura vegetal, verificou-se que para os pneus P2 e P3 as superfícies com 15 e 30 Mg ha⁻¹ de palhiço em cobertura não apresentam diferença estatística para a variável largura do recalque. No entanto, para o pneu P1 verifica-se diferença estatística entre todas as superfícies, com aumento da largura em função do acréscimo de material em cobertura. Independentemente do modelo de pneu, as menores larguras foram expressas no solo sem cobertura vegetal, indicando que a presença de material sobre o solo contribui para o aumento da largura do recalque.

Tabela 6 - Teste de médias para a variável largura do recalque no solo para os modelos P1, P2 e P3 nas superfícies S1, S2 e S3.

Largura	Pneu					
	P1		P2		P3	
Cobertura (Mg ha ⁻¹)	m	s	m	s	m	s
0	61,23 b C	1,0263	67,77 a B	1,5144	59,03 b B	1,8175
15	72,43 a B	0,7638	74,03 a A	1,7954	64,23 b A	1,4978
30	76,50 a A	0,6083	76,33 a A	0,7767	66,10 b A	0,4359

*Comparação nas linhas: letras minúsculas distintas, as médias diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) **Comparação nas colunas: letras maiúsculas distintas, as médias diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) C.V. (%) = 1,81. m=média; s=desvio padrão

As maiores áreas de contato proporcionadas pelo incremento de palhiço podem atenuar o impacto no subsolo e na compactação. De acordo com Rossato, Crusciol e Martello (2016) a compactação do solo na cultura da cana-de-açúcar promove a redução no crescimento e no desenvolvimento, já que impede que a cultura expresse seu maior potencial produtivo em termos de açúcar recuperável e produção de biomassa.

Assim, a compactação produz um ciclo negativo no solo, já que este torna-se menos capaz de produzir biomassa vegetal e, com pouca biomassa sobre o solo, sofre degradação, necessitando de maior aporte de energia e fertilizantes, fato que exige mais entradas de máquinas e, por fim, com maiores intervenções mecanizadas o solo tende a tornar-se compactado, reiniciando-se o ciclo.

4.6 Resistência à penetração do solo nos ESD com os pneus P1, P2 e P3 em relação à diferentes pontos do recalque com 0; 15 e 30 Mg ha⁻¹ de palhiço em cobertura.

Em termos gerais, as maiores resistências à penetração do solo foram atribuídas ao pneu P1, seguidas por P3 e P2 respectivamente. Observou-se, no entanto, que mesmo apresentando a maior área de contato total, o pneu P2 apresentou desempenho semelhante à P3 para as quantidades de 15 e 30 Mg ha⁻¹ de palhiço em cobertura (Tabela 7).

As maiores resistências à penetração do solo nos pontos centrais, transversais e longitudinais da área de contato foram expressas por P1. Os pneus P2 e P3 não

diferiram estatisticamente entre si, entretanto em valores absolutos as menores resistências à penetração do solo foram demonstradas por P2. Em relação às superfícies, as resistências à penetração em solos com 0 e 15 Mg ha⁻¹ não apresentaram diferença nos pontos centrais, longitudinais e transversais. No entanto as menores resistências à penetração do solo foram obtidas na superfície com 30 Mg ha⁻¹ de palhiço em cobertura.

A cobertura vegetal mostrou-se eficiente em atenuar o impacto do rodado no subsolo. Silva et al. (2019) em estudo para quantificar a espessura necessária do palhiço para a correta proteção do solo, encontraram valores mínimos necessários de 7 Mg ha⁻¹ para cobertura. Os autores ainda trouxeram uma relação importante, que para cada Mg ha⁻¹ de palhiço sobre o solo, em média a espessura da camada aumenta em 0,5cm. Assim, as camadas utilizadas nessa pesquisa, teriam 7,5 e 15 cm para as quantidades de 15 e 30 Mg ha⁻¹ respectivamente.

Tabela 7 - Teste de médias para as resistências à penetração do solo, obtidas nos pontos PC-Ponto Central, PL-Pontos Longitudinais e PT-Pontos Transversais, gerados pelos pneus P1, P2 e P3 nas superfícies com 0, 15 e 30 Mg ha⁻¹ de palhiço em cobertura.

Fator	Nível	PC		PL		PT	
		m	s	m	s	m	s
Cobertura (Mg ha ⁻¹)	0	1,60	a 0,27	1,53	a 0,26	1,51	a 0,35
	15	1,44	a 0,26	1,48	a 0,29	1,44	ab 0,29
	30	1,25	b 0,29	1,25	b 0,22	1,38	b 0,20
Pneu	P1	1,75	a 0,22	1,74	a 0,21	1,80	a 0,19
	P2	1,24	b 0,17	1,24	b 0,11	1,28	b 0,07
	P3	1,31	b 0,21	1,28	b 0,12	1,25	b 0,05
C.V. (%)	-	9,98		6,72		7,02	

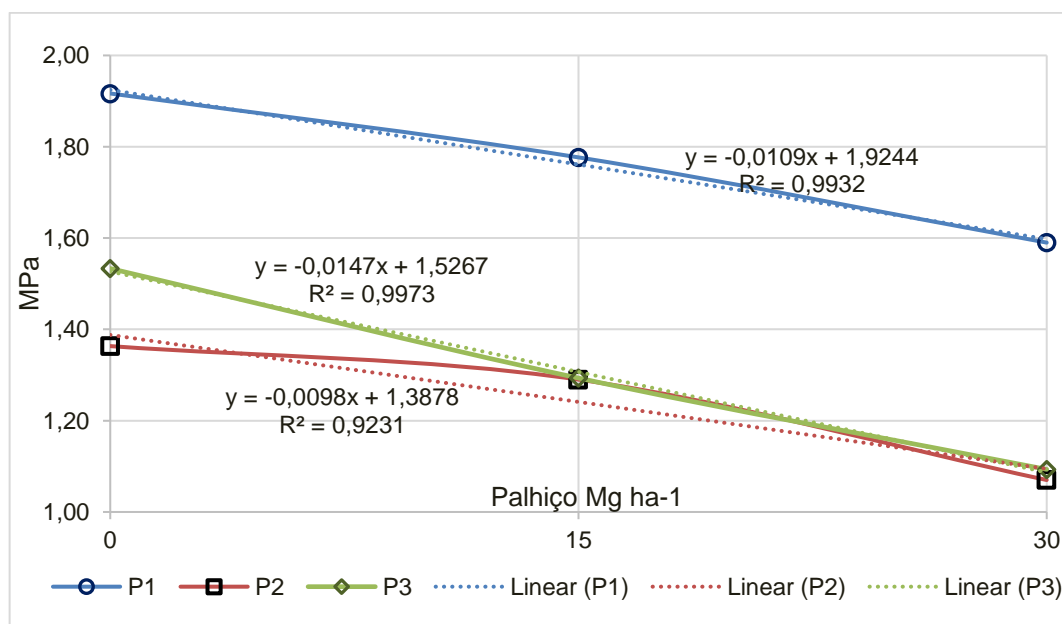
** letras distintas, as médias diferem entre si pelo teste de Tukey (p < 0,05). m=média; s=desvio padrão

A Figura 31 apresenta o coeficiente de determinação (r²) da resistência à penetração do solo no ponto central do recalque (PC) em função das diferentes superfícies estudadas. Observa-se alta correlação entre a quantidade de palhiço em cobertura e a atenuação da resistência à penetração no ponto central do recalque. Os coeficientes angulares negativos indicam inversão de proporcionalidade, de forma que o aumento de palhiço, reduz proporcionalmente a resistência à penetração do solo no ponto central do recalque. Os coeficientes de correlação (r²) de 0,99 para P1 e P3, e de 0,92

para P2, indicam o correto ajuste dos dados e do modelo linear para a redução da resistência à penetração em função da quantidade de palhiço sobre o solo.

De acordo com Júnnyor et al. (2019) no processo de colheita da cana de açúcar o veículo que causa maior estresse ao solo é o transbordo, aplicando-se tensões compressivas de até 157 kPa à profundidade de 21 cm no perfil do solo. Os autores concluíram que sistemas de preparo intensivos e rotações de cultura tendem a tornar o solo mais susceptível à compactação, como alternativas para minimizar os danos ao solo, esses autores recomendam o controle de tráfego nas áreas e a implantação de manejos conservacionistas. Esteban et al. (2019) verificaram ganhos de produtividade da ordem de 8,2 a 15,7 Mg ha⁻¹ em diferentes manejos na cultura da cana-de-açúcar. Novas formas de controle de tráfego e utilização de pneus que apresentem menor impacto no subsolo, são alternativas para minimizar o estresse no solo e manter a produtividade e longevidade do canavial.

Figura 31 - Coeficiente de Determinação (r^2) da resistência à penetração do solo no ponto central do recalque PC, valores médios para cada modelo de pneu (P1, P2 e P3) nas superfícies com 0, 15 e 30 Mg ha⁻¹ de palhiço em cobertura.

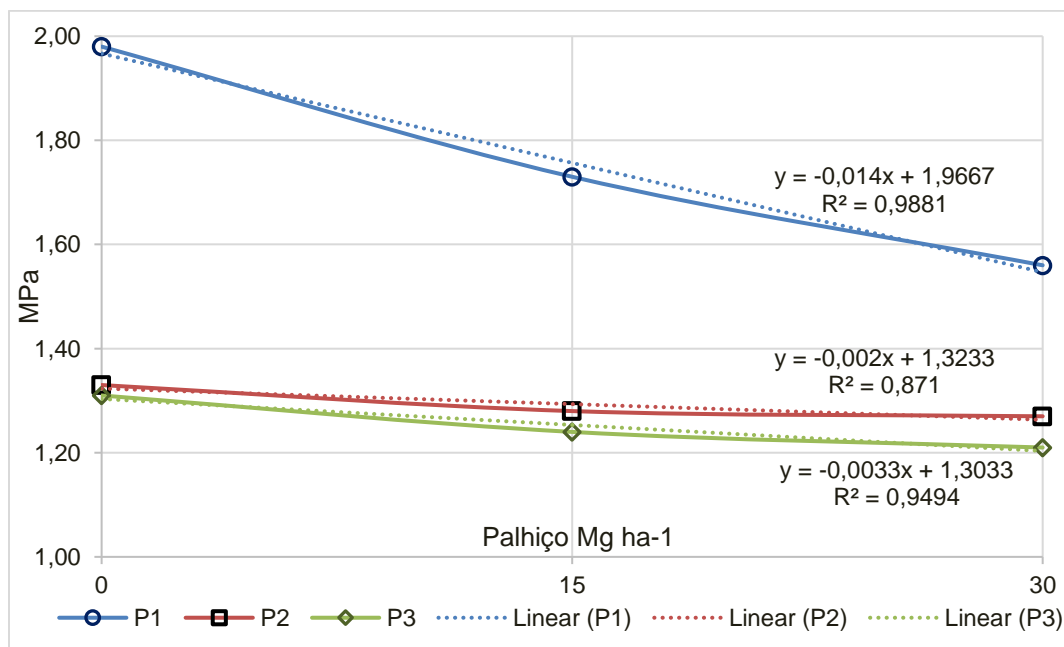


A Figura 32 apresenta o coeficiente de determinação (r^2) da resistência à penetração do solo nos pontos transversais do recalque gerado pelos pneus P1, P2 e P3 em função da quantidade de material vegetal em cobertura. Nesta aplicação as menores

resistências à penetração foram obtidas por P3, seguidas por P2 e P1 respectivamente.

O aumento da quantidade de palhiço promoveu a redução da resistência à penetração de forma linear em todos os pneus estudados. A atenuação encontrada nos pontos transversais para o pneu de tecnologia diagonal, pode estar relacionada ao modelo construtivo do pneu e seu formato ovalado. As cargas aplicadas no solo, através de uma área de contato elíptica, bem como uma banda lateral rígida, conferem a este tipo de pneu (P3) uma concentração maior de cargas no centro do recalque e menores distribuições laterais. Esta característica de dissipação das cargas é interessante em situações de tráfego controlado bem estabelecido, onde o centro das entrelinhas torna-se compactado, favorecendo o trânsito de máquinas e melhorando a eficiência destas.

Figura 32 - Coeficiente de Determinação (r^2) da resistência à penetração do solo nos pontos transversais (PT1 e PT2) do recalque; valores médios para cada modelo de pneu (P1, P2 e P3) em função de diferentes quantidades de palhiço



O preparo de solo nem sempre resolve o problema da compactação, em casos de realização no solo com alto teor de água, seu resultado pode ser altamente ineficiente (Awe, Reichert e Fontanella, 2020). Sob essa óptica, conhecer e aplicar

adequadamente os pneus em cada situação produtiva torna-se uma tarefa altamente complexa e importante. Resultados da presente pesquisa trazem informações relevantes a respeito da interação rodado-solo que podem contribuir com essa temática, já que a presença de palhiço no solo pode evitar a sua degradação. Os resultados apresentados vão de encontro com os de Silva et al. (2016) onde os autores observaram a redução da resistência à penetração e pressão de pré consolidação em áreas com cobertura vegetal.

Otto et al. (2011) verificaram que o crescimento radicular da cana-de-açúcar apresenta limitações quando em solos que impõem resistência à penetração maior do que 0,75 até 2,0MPa. Os autores concluíram que acima de 2,0MPa o desenvolvimento radicular é severamente afetado. De acordo com os resultados obtidos na presente pesquisa os valores de resistência à penetração do solo apresentaram as maiores limitações para o pneu P1 em solo descoberto, alcançando as maiores resistências à penetração em relação aos demais tratamentos.

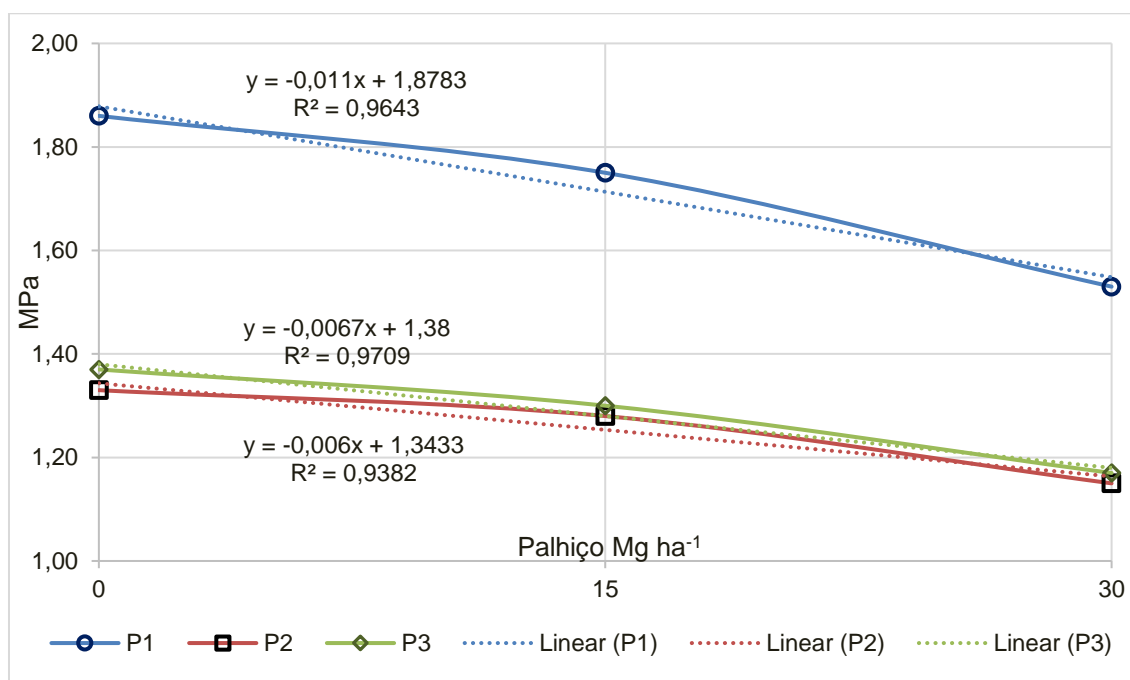
A Figura 33 descreve o comportamento da resistência à penetração do solo nos pontos longitudinais do recalque para cada um dos tratamentos avaliados. As maiores resistências à penetração expressas por P1, ficam desta forma evidenciadas através das curvas de regressão distanciadas da curva de P2 e P3. Os altos coeficientes de correlação, indicam o correto ajuste das variáveis para o modelo linear e demonstram que o incremento de palhiço propicia o decréscimo na resistência à penetração nos pontos longitudinais do recalque.

Castioni et al. (2018) afirmaram que a presença de palhiço no solo ao longo dos ciclos da cana-de-açúcar propicia benefícios estruturais e de suporte agrônômico dos solos, assim, solos com presença constante de cobertura vegetal, tornam-se mais resilientes aos processos agrícolas. Os dados colaboram com Cherubin et al. (2021), onde verificou-se o decréscimo do índice de saúde do solo à medida que as taxas de remoção do palhiço em cobertura aumentam.

Os resultados desta pesquisa demonstraram que a aplicação de ensaios em ambiente controlado, proporcionam informações confiáveis a respeito da interação rodado solo em diferentes superfícies. A aplicação de pneus rodoviários (de caminhão) em montagem dupla, pode ser justificada em termos econômicos e se aplicados em condição de solos firmes, devido sua alta área de garras em relação à área total. Em solos preparados e áreas produtivas esse tipo de pneu torna mais severo os danos ao solo, principalmente se o teor de água estiver elevado.

Modelos matemáticos de simulação e avaliação da compactação do solo na colheita da cana-de-açúcar, apresentados por Lozano et al. (2013), demonstram que os veículos que causam maior impacto no solo são os caminhões de carga e os veículos de transbordo, fato que encontra fundamentação nos resultados desta pesquisa, onde o pneu P1 em montagem dupla apresentou as maiores resistências à penetração no solo e as menores áreas de contato.

Figura 33 - Coeficiente de Determinação (r^2) da resistência à penetração do solo nos pontos longitudinais (PL1 e PL2) do recalque; valores médios para cada modelo de pneu (P1, P2 e P3) em função de diferentes quantidades de palhiço



Bordonal et al. (2018), avaliaram a intensidade de remoção do palhiço na cana-de-açúcar e observaram que, áreas com remoção total de palhiço em cobertura, apresentaram decréscimos de 28 até 62 $Mg\ ha^{-1}$ de produtividade da cultura, o que indica que o solo descoberto fica mais susceptível aos impactos externos de ordem física, química e biológica. Os autores afirmaram que a remoção do palhiço, mesmo que parcial, afeta negativamente a produtividade da cana-de-açúcar a longo prazo. Lisboa et al. (2018) em estudos de produtividade de canaviais em relação a cinco taxas de remoção do palhiço (0, 25, 50, 75 e 100%) concluíram que a manutenção de taxas moderadas de cobertura vegetal, entre 4 e 9 $Mg\ ha^{-1}$ contribuem para o aumento

de rendimento de colmos na lavoura. Os autores afirmaram ainda que, no período de curto prazo, a remoção parcial do palhicho da lavoura pode ser vantajosa e propiciar maior lucratividade através da geração de bioeletricidade ou produção de etanol de segunda geração.

A cobertura do solo pode atenuar o impacto dos rodados no solo, de forma que em áreas que se utilizam rodados com menores áreas de contato, se o manejo do palhicho for realizado com maior material sobre o solo, o desempenho pode ser equivalente à tecnologia de maior custo, no caso a tecnologia radial.

A resistência à penetração possui alta relação com a densidade e o teor de água do solo, podendo ser estimada, inclusive, através de modelos matemáticos (SOUZA et al. 2021), dessa forma, a presença do palhicho em cobertura afeta diretamente a dinâmica da água em subsuperfície. Com maiores áreas de contato na interação rodado-solo, ocorre menor deformação superficial e conseqüentemente menor compactação.

Adetoro et al. (2020) em estudos relacionando a presença de cobertura vegetal (palhicho) sobre o solo na cana-de-açúcar e a “pegada hídrica”, indicaram que a presença da cobertura vegetal sobre o solo incrementa a eficiência de aproveitamento da água. Os autores obtiveram os melhores resultados com a quantidade máxima de palhicho avaliada (10 Mg ha^{-1}).

A redução da resistência à penetração do solo em função da cobertura vegetal encontra fundamentação nos estudos de Gabriel et al. (2021), onde verificou-se em experimento de longo prazo que a resistência do solo à penetração pode ser reduzida em até 60% com a manutenção da cobertura vegetal no solo.

Castioni et al. (2018) afirmaram que a remoção do palhicho em cobertura contribui severamente para a degradação do solo na cultura da cana-de-açúcar, sendo que o mínimo a ser mantido para que não sejam verificadas significativas perdas é de 10 Mg ha^{-1} de material vegetal sobre o solo. A manutenção da cobertura vegetal é defendida também por Soltangheisi et al. (2021), já que contribui com a disponibilidade de fósforo para a cana-de-açúcar e Souza et al. (2020) pois reduz o acamamento da cultura. Os resultados apresentados nessa pesquisa indicam que a manutenção de 15 Mg ha^{-1} sobre o solo contribui para a manutenção da qualidade física na interação com os rodados e é incrementada até o valor de 30 Mg ha^{-1} .

Pimentel et al. (2019) afirmaram que o processo de retirada do palhicho para obtenção de etanol de segunda geração e bioenergia deve ser realizada mantendo-se no

mínimo 50% do material remanescente da colheita sobre o solo. Segundo os autores esse processo pode ser facilitado com ajustes no sistema de recolhimento e separação das colhedoras. Os resultados desta pesquisa indicaram em todos os tratamentos, a superioridade da qualidade física do solo a partir de 15Mg ha⁻¹ de palhiço em cobertura.

O tipo de solo pode afetar a quantidade de palhiço que deve ser mantida em cobertura. Satiro et al. (2017) afirmaram que em solos arenosos é necessária a manutenção de maior quantidade de cobertura vegetal, enquanto em solos argilosos e francos a cobertura de 8 Mg ha⁻¹ de palhiço provou ser sustentável. Esta pesquisa abre portas para futuras investigações em outros tipos de solo e com outros modelos de rodados. Cherubin et al. (2021) propuseram um modelo de índice de saúde do solo para a produção de cana-de-açúcar, baseados em modelo do departamento de agricultura dos Estados Unidos (USDA, 2014), em função de diferentes taxas de remoção do palhiço. Os autores afirmaram que em solos arenosos, sem cobertura vegetal o potencial produtivo do solo pelo índice de qualidade ficou em no máximo 56%, enquanto em solos argilosos o potencial máximo foi de 86%, dessa forma, estudos relacionados à remoção do palhiço e o impacto da retirada deste material para a produção de bioenergia deve ser avaliada de forma sistêmica.

Fundamentalmente, a cobertura vegetal afeta diretamente os processos de compactação do solo através de três processos principais, sendo eles, a proteção mecânica, a incorporação de matéria orgânica e a dissipação de cargas. A proteção mecânica superficial aumenta a rugosidade e atenua o impacto das gotas de chuva ou irrigação; a incorporação de matéria orgânica aumenta a resiliência e estabilidade dos agregados e o efeito dissipador de cargas aumenta a área de contato com os rodados, incorrendo em menores pressões no solo (SATIRO et al., 2017).

Esta pesquisa limitou-se a investigar a dissipação de cargas pelos rodados pneumáticos em condições controladas. Portanto, é fundamental racionalizar a operação de coleta ou retirada do palhiço com informações relacionadas aos diferentes modelos de rodados, número de passagens de máquinas, espaçamento da cultura, massa das máquinas, tipos de solo e quantidade mínima de material em cobertura a ser mantida na lavoura para obter a equalização dos benefícios agronômicos.

A quantidade de palhiço sobre o solo pode influir significativamente na interação rodado/solo, sendo possível que, pneus diagonais sejam mais viáveis do que os

radiais, em relação à área de contato em solos com presença de palhico. O modelo de pneu ideal para os veículos de transbordo pode ser determinado em função da quantidade de palhico em cobertura na lavoura.

A utilização de pneus rodoviários em montagem dupla para os veículos de carga na cultura da cana-de-açúcar pode ser aplicável em situações nas quais o tráfego de máquinas for controlado e em superfícies com 30 Mg ha^{-1} de palhico em cobertura.

5 CONCLUSÕES

Independentemente do modelo de pneu utilizado, o palhiço em cobertura atenuou a pressão sobre o solo.

A presença da cobertura vegetal reduziu a interferência dos rodados nas subsuperfícies, aumentando a área de contato ($r^2=0,98$) e reduzindo as pressões sobre o solo ($r^2=0,97$).

Maiores áreas de contato total do pneu com a superfície não significam, necessariamente, em maiores áreas de contato das garras.

A relação entre a área total e a área de garras foi de 66,9% em P1, 34,8% em P2 e 54,8% em P3.

O pneu P1 teve um acréscimo de 15% na área de contato com 15Mg ha⁻¹ em cobertura e 36% com 30Mg ha⁻¹. O pneu P2, teve a área de contato acrescida em 6 e 38%; e P3 em 9 e 22% nas superfícies cobertas com 15 e 30Mg ha⁻¹, respectivamente.

REFERÊNCIAS

- ADAMCHUK, V. I.; HUMMEL, J. W.; MORGAN, M. T.; UPADHYAYA, S. K. On-the-go soil sensors for precision agriculture. **Computers and Eletronics in Agriculture**. v.44, p.71-91, 2004.
- ADETORO, A. A.; ABRAHAM, S.; PARASKEVOPOULOS, A. L.; OWUSU-EKYERE, E.; JORDAAN, H.; ORIMOLOYE, I. R. Alleviating water shortages by decreasing water footprint in sugarcane production: The impacts of different soil mulching and irrigation systems in South Africa. **Groundwater for Sustainable Development**, v.11, n.1, p.100464, 2020.
- ALAOUI, A.; DISERENS, E. Mapping soil compaction—A review. **Current opinion in environmental science & health**, v. 5, p. 60-66, 2018.
- ALAPA - ASSOCIAÇÃO LATINO-AMERICANA DOS FABRICANTES DE PNEUS, AROS E RODAS. **Manual de normas técnicas**. São Paulo, 2018. 40p
- ALMALIKI, S.; HIMOUD, M.; AL-KHAFAJIE, A. Artificial neural network and stepwise approach for predicting tractive efficiency of the tractor (CASE JX75T). **The Iraqi Journal of Agricultural Science**, v. 50, n. 3, p. 1008-1017, 2019.
- AQUINO, G. S. DE; DE CONTI MEDINA, C.; DA COSTA, D. C.; SHAHAB, M.; SANTIAGO, A. D. Sugarcane straw management and its impact on production and development of ratoons. **Industrial Crops and Products**, v. 102, p. 58-64, 2017.
- ASABE - Standards. S313.3. **Soil cone penetrometer**, St.Joseph, MI, USA, 2012.
- ASSIS, R. L.; LAZARINI, G. D.; LANÇAS, K. P.; CARGNELUTTI FILHO, A. Avaliação da resistência do solo à penetração em diferentes solos com a variação do teor de água. **Engenharia Agrícola**, v.29, p.558-568, 2009.
- AWE, G. O.; REICHERT, J. M.; FONTANELLA, E. Sugarcane production in the subtropics: Seasonal changes in soil properties and crop yield in no-tillage, inverting and minimum tillage. **Soil and Tillage Research**, v. 196, p. 1-12, 2020. DOI: 10.1016/j.still.2019.104447
- BALASTREIRE, L. A. Máquinas agrícolas. São Paulo: Manole. 1990. 307p.
- BATISTA, G.; SOUZA, R. B.; PRATTO, B.; DOS SANTOS-ROCHA, M. S.; CRUZ, A. J. Effect of severity factor on the hydrothermal pretreatment of sugarcane straw. **Bioresource technology**, v. 275, p. 321-327, 2019.
- BEAUCLAIR, E.; TEZOTTO, T.; MANOCHIO JR., C. R. Tratos Culturais, manejo da cultura da cana-de-açúcar. In: BELARDO, G.C; CASSIA, M. T.; SILVA, R. P. **Processos Agrícolas e Mecanização da Cana-de-açúcar**. 1ed., 344p., Jaboticabal: SBEA, 2015. Cap.13, p.289-299.
- BELARDO, G. C.; ROSA, J. H. M.; MAGALHÃES, P. S. G. Evolução da colheita mecanizada na cultura da cana-de-açúcar. In: BELARDO, G.C; CASSIA, M. T.;

SILVA, R. P. **Processos Agrícolas e Mecanização da Cana-de-açúcar**. 1ed., 344p., Jaboticabal: SBEA, 2015. Cap.15, p.335-366.

BIGOT, A. F.; HOY, J. W.; FULTZ, L. M. Soil properties, microbial communities, and sugarcane yield in paired fields with short- or long-term sugarcane cultivation histories. **Applied Soil Ecology**, v.142, p.166–176, 2019. DOI: 10.1016/j.apsoil.2019.04.027

BORDONAL, R. O.; MENANDRO, L. M. S.; BARBOSA, L. C.; LAL, R.; MILORI, D. M. B. P.; KOLLN, O. T.; CARVALHO, J. L. N. Sugarcane yield and soil carbon response to straw removal in south-central Brazil. **Geoderma**, v.328, p.79-90, 2018.

BRAIDA, J. A. **Matéria orgânica e resíduos vegetais na superfície do solo e suas relações com o comportamento mecânico do solo sob plantio direto**. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Santa Maria – RS. P. 126. 2004.

BRAIDA, J. A.; REICHERT, J. M.; VEIGA, M.; REINERT, D. J. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio Proctor. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, n.4, p.605-614, 2006.

CARDOSO, T. F.; CAVALETT, O.; CHAGAS, M. F.; MORAIS, E. R.; CARVALHO, J. L. N.; FRANCO, H. C. J.; GALDOS, M. V.; SCARPARE, F. V.; BRAUNBECK, O. A., CORTEZ, L. A. B., BONOMI, A. Technical and economic assessment of trash recovery in the sugarcane bioenergy production system. **Sci. Agric.**, v.70, n.5, p.353–360, 2013.

CARDOSO, T. F.; CHAGAS, M. F.; RIVERA, E. C.; CAVALETT, O.; MORAIS, E. R.; GERALDO, V. C.; BONOMI, A. A vertical integration simplified model for straw recovery as feedstock in sugarcane biorefineries. **Biomass and Bioenergy**, v. 81, p. 216-223, 2015.

CARNEIRO, L. F.; OLIVEIRA, R. A. D.; WEBER, H.; DAROS, E.; BERTON, G. S.; RODRIGUES, F. V. Alternativa conservacionista de produção da cana-de-açúcar em solos arenosos: palhiço, consórcio e nitrogênio. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 44, 2020.

CARVALHO, J. L. N.; NOGUEIROL, R. C.; MENANDRO, L. M. S.; BORDONAL, R. D. O.; BORGES, C. D.; CANTARELLA, H.; FRANCO, H. C. J. Agronomic and environmental implications of sugarcane straw removal: a major review. **Gcb Bioenergy**, v. 9, n. 7, p. 1181-1195, 2017.

CASTIONI, G. A.; CHERUBIN, M. R.; MENANDRO, L. M. S.; SANCHES, G. M.; BORDONAL, R. D. O.; BARBOSA, L. C.; CARVALHO, J. L. N. Soil physical quality response to sugarcane straw removal in Brazil: A multi-approach assessment. **Soil and Tillage Research**, v.184, n.1, p.301-309, 2018.

CASTIONI, G. A. F.; CHERUBIN, M. R.; BORDONAL, R. O.; BARBOSA, L. C.; MENANDRO, L. M. S.; CARVALHO, J. L. N. Straw removal affects soil physical

quality and sugarcane yield in Brazil. **BioEnergy Research** v.12, p.789–800, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12155-019-10000-1>

CAVALIERI, K. M. V.; CARVALHO, L. A. D.; SILVA, A. P. D.; LIBARDI, P. L.; TORMENA, C. A. Qualidade física de três solos sob colheita mecanizada de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 5, p. 1541-1550, 2011.

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

CEPEA – Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. **PIB do Agronegócio**. Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil, CNA. ESALQ, USP, março, 2021.

CHANCELLOR, W.J. **Compaction of soil by agricultural equipment**. Berkeley: University of California, Division of Agricultural Sciences, p. 53, 1981.

CHEN H.; YANG, Y. Effect of fuel saving and crop energy output on controlled traffic system under small machinery in loess plateau of China. **Soil and Tillage Research**, v. 199, p. 1-6, 2020. DOI: 10.1016/j.still.2020.104570

CHEN, Y. L.; PALTA, J.; CLEMENTS, J.; BUIRCHELL, B.; SIDDIQUE, K. H.; RENGEL, Z. Root architecture alteration of narrow leafed lupin and wheat in response to soil compaction. **Field Crops Research**, v.165, p.61-70, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.04.007>

CHEONG, L.N.; KEE KWONG, K.N.; PREEZ, C.D. Soil compaction under sugar cane (*Saccharum hybrid sp.*) cropping and mechanization in Mauritius. **South African Journal of Plant and Soil**, v.1, n.26, p.199-205, 2009.

CHERUBIN, M. R.; BORDONAL, R. O.; CASTIONI, G. A.; GUIMARÃES, E. M.; LISBOA, I. P.; MORAES, L. A.; CARVALHO, J. L. Soil health response to sugarcane straw removal in Brazil. **Industrial Crops and Products**, v.163, n.1, p.113315, 2021.

CHETHAN, C. R.; TEWARI, V. K.; NARE, B.; KUMAR, S. P. Transducers for measurement of draft and torque of tractor-implement system—a review. **Agricultural mechanization in Asia, Africa and Latin America**, v. 49, n. 4, p. 82, 2018.

COLOMBI, T.; KELLER, T. Developing strategies to recover crop productivity after soil compaction - A plant eco-physiological perspective. **Soil and Tillage Research**, v.191, p.156-161, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.04.008>

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra Brasileira: Cana-de-açúcar**, safra 2020/21, vol. 7. Terceiro levantamento, Brasília-DF, p:1–62, n.1, 2020.

CONCENÇO, G.; LEME FILHO, J. R. A.; SILVA, C. J. O aleiramento do palhiço de

cana-de-açúcar agrava a infestação de plantas daninhas. **Embrapa Agropecuária Oeste-Comunicado Técnico** (INFOTECA-E), 2017.

CORRÊA, I.; YANAI, K.; GONZALEZ MAZIERO, J. V.; LANÇAS, K. P. Determinação da circunferência de rolamento de pneus agrícolas utilizando dois métodos: manual e eletrônico. **Bragantia**, v. 58, n. 1, p. 179-184, 1999.

COSTA, L.G.; MARIN, F.R.; NASSIF, D.S.P.; PINTO, H.M.S.; LOPES-ASSAD, M. L. R. C. Simulating trash and nitrogen management effects on sugarcane yield. **Rev. Bras. Eng. Agríc.**, v.18, n.5, p.469–474, 2014.

CUNHA, J. P. A. R. DA; CASCAO, V. N.; REIS, E. F. DOS. Compactação causada pelo tráfego de trator em diferentes manejos de solo. **Acta Scientiarum**, v. 31, n. 3, p. 371-375, 2009.

DZOMA, B.; WILHELM, N.; TELFER, P.; ZEPPEL, K. Effects of deep ripping on soil compaction and crop performance in Mallee sand. Proceedings of the 2019 **Agronomy Australia Conference**, Wale Wale, 2019.

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

FERRARI, J. M. S.; GABRIEL, C. P. C.; SILVA, T. B. G.; MOTA, F. D.; GABRIEL FILHO, L. R. A.; TANAKA, E. M. Análise da Variabilidade Espacial da Resistência à Penetração do Solo em Diferentes Profundidades. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 12, n. 2, p. 164-175, 2018.

FIGLIORINI, D. A.; MARASCA, I.; FERNANDES, B. B.; SANDI, J.; MORELLI-FERREIRA, F.; LANÇAS, K. P. Desempenho de três tratores agrícolas em ensaios de tração. **Journal of neotropical agriculture**, v. 2, n. 2, p. 68-76, 2015.

FURLANI, C. E. A.; VOLTARELLI, M. A. Aspectos sobre o plantio mecanizado da cana-de-açúcar. In: BELARDO, G.C; CASSIA, M. T.; SILVA, R. P. **Processos Agrícolas e Mecanização da Cana-de-açúcar**. 1ed., 344p., Jaboticabal: SBEA, 2015. Cap.11, p.259-272.

GABRIEL FILHO, A.; SILVA, S. D. L.; MODOLO, A. J.; SILVEIRA, J. Desempenho de um trator operando em solo com diferentes tipos de cobertura vegetal. **Engenharia Agrícola**, v. 24, n. 3, p. 781-789, 2004.

GABRIEL FILHO, A.; LANÇAS, K. P.; LEITE, F.; ACOSTA, J. J.; JESUINO, P. R. Desempenho de trator agrícola em três superfícies de solo e quatro velocidades de deslocamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 3, p. 333-339, 2010.

GABRIEL, J. L.; GARCÍA-GONZÁLEZ, I.; QUEMADA, M.; MARTIN-LAMMERDING, D.; ALONSO-AYUSO, M.; HONTORIA, C. Cover crops reduce soil resistance to penetration by preserving soil surface water content. **Geoderma**, v.386, n.1,

p.114911, 2021.

GAMERO, C. A.; LANÇAS, K. P. **Ensaio e certificação das máquinas de mobilização periódica do solo.** In: Mialhe, L. G. Máquinas Agrícolas: Ensaio e certificação. FEALQ - Fundação de estudos agrários Luiz de Queiroz, 722p. Piracicaba, 1996.

GILL, W. R.; BERG, G. E. V. D. **Soil dynamics in tillage and traction.** Agricultural Research Service, US Department of Agriculture, 1967.

GIRARDELLO, V. C. AMADO, TELMO J. C.; MISIEWICZ, P.; SMITH, E. K. Tráfego controlado de máquinas agrícolas: a experiência inglesa e perspectivas de adoção no sul do Brasil. **Revista Plantio Direto**, ed. 5, v.137-138, 2014.

GÍRIO, L. A. D. S.; DA SILVA, R. P.; DE MENEZES, P. C.; CARNEIRO, F. M.; ZERBATO, C.; ORMOND, A. T. S. Quality of multi-row harvesting in sugarcane plantations established from pre-sprouted seedlings and billets. **Industrial Crops and Products**, v. 142, p. 111831, 2019.

GOMES, A. R. D. A.; CORREIA, T. P. D. S.; DIAS, P. P.; KATO, L. H.; SILVA, P. R. A. Desempenho operacional e econômico de duas enfardadoras prismáticas de palhico de cana-de-açúcar. **Energia na Agricultura**, v. 31, n. 3, p. 207-214, 2016.

GONZAGA, L. C.; CARVALHO, J. L. N.; DE OLIVEIRA, B. G.; SOARES, J. R.; CANTARELLA, H. Crop residue removal and nitrification inhibitor application as strategies to mitigate N₂O emissions in sugarcane fields. **Biomass and Bioenergy**, v. 119, p. 206-216, 2018.

GUPTA, C.; TEWARI, V. K.; KUMAR, A. A.; SHRIVASTAVA, P. Automatic tractor slip-draft embedded control system. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 165, p. 104947, 2019.

HARTGE R. H.; HORN, R. **Essential soil physics an introduction to soil processes, functions, structure and mechanics.** Schweizerbart Sciences, Stephan Peth, 1ed., 2016, 389p.

HE, R.; SANDU, C.; OSORIO, J. E. Systematic tests for study of tire tractive performance on soft soil: Part I—Experimental data collection. **Journal of Terramechanics**, v. 85, p. 59-76, 2019.

HORN, R. Soil compaction and consequences of soil deformation on changes in soil functions. Task Force—Solutions under Foot. **Catena Verlag**, Reiskirchen, p. 28-32, 2015.

IAIA A. M.; MAIA, J.; KIM, M. E. Use of an electronic penetrometer to evaluate resistance of a soil cultivated with sugarcane. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, n. 2, p.523-530, 2006.

JÚNNYOR, W. D. S. G.; DISERENS, E., MARIA, I. C. D.; ARAUJO-JUNIOR, C. F.; FARHATE, C. V. V.; DE SOUZA, Z. M. Prediction of soil stresses and compaction

due to agricultural machines in sugarcane cultivation systems with and without crop rotation. **Science of the total environment**, v. 681, p. 424-434, 2019.

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

KELLER, T. **Soil compaction and soil tillage-studies in agricultural soil mechanics**. Swedish University of Agricultural Sciences. Doctoral thesis. Department of Soil Sciences, Uppsala, 2004.

KOOLEN, A.J. Mechanics of soil compaction. In: SOANE, B.D. & van OUWERKERK, C., eds. **Soil compaction in crop production**. Amsterdam, p.23-44, 1994.

KUČERA, M.; HELEXA, M.; ČEDÍK, J. Link between static radial tire stiffness and the size of its contact surface and contact pressure. **Agronomy Research**, v. 14, n. 4, p. 1361-1371, 2016.

KUMAR, S.; NOORI, M. T.; PANDEY, K. P. Performance characteristics of mode of ballast on energy efficiency indices of agricultural tyre in different terrain condition in controlled soil bin environment. **Energy**, v. 182, p. 48-56, 2019.

LEMOS, P. H. Análise de decisão multicritério para avaliação de alternativas de recolhimento de palhicho de cana-de-açúcar para a cogeração de energia. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de São Carlos - Campus Sorocaba. Sorocaba – SP. p. 120. 2018.

LIMA R. P. D.; DE LEÓN, M. J.; SILVA A. R. Compactação do solo de diferentes classes texturais em áreas de produção de cana-de-açúcar. **Rev. Ceres**, Viçosa, v. 60, n.1, p. 016-020, 2013.

LISBOA, I. P.; CHERUBIN, M. R.; LIMA, R. P.; CERRI, C. C.; SATIRO, L. S.; WIENHOLD, B. J.; CERRI, C. E. Sugarcane straw removal effects on plant growth and stalk yield. **Industrial Crops and Products**, v.111, p.794-806, 2018.

LISBOA, I. P.; CHERUBIN, M. R.; SATIRO, L. S.; SIQUEIRA-NETO, M.; LIMA, R. P.; GMACH, M. R.; CERRI, C. E. Applying Soil Management Assessment Framework (SMAF) on short-term sugarcane straw removal in Brazil. **Industrial Crops and Products**, v. 129, p. 175-184, 2019.

LOZANO, N.; ROLIM, M. M.; OLIVEIRA, V. S.; TAVARES, U. E.; PEDROSA, E. M. R. Evaluation of soil compaction by modeling field vehicle traffic with SoilFlex during sugarcane harvest. **Soil and Tillage Research**, v.129, n.1, p.61-68, 2013.

LOVERA, L. H.; DE SOUZA, Z. M.; ESTEBAN, D. A. A.; DE OLIVEIRA, I. N.; FARHATE, C. V. V.; DE SOUZA LIMA, E.; PANOSSO, A. R. Sugarcane root system: Variation over three cycles under different soil tillage systems and cover crops. **Soil and Tillage Research**, v.208, n.1, p.104866, 2021.

MACHADO, T. M.; LANÇAS, K. P.; FIORESE, D. A.; FERNANDES, B. B.; TESTA, J. V. Estimativa de gasto energético da operação de subsolagem em profundidades variáveis. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 11, p. 1121-1125, 2015.

MAMKAGH, A. M. Effect of tillage speed, depth, ballast weight and tire inflation pressure on the fuel consumption of the agricultural tractor: A review. **Journal of Engineering Research and Reports**, p. 1-7, 2018.

MAMKAGH, A. M. Effect of soil moisture, tillage speed, depth, ballast weight and, used implement on wheel slippage of the tractor: a review. **Asian Journal of Advances in Agricultural Research**, p. 1-7, 2019.

MAMKAGH, A. M. Review of fuel consumption, draft force and ground speed measurements of the agricultural tractor during tillage operations. **Asian Journal of Advanced Research and Reports**, p. 1-9, 2019b.

MARASCA, I.; GLADENUCCI, J; SPADIM, E. R.; BARBOSA, R. D.; LANÇAS, K. P. Geoestatística aplicada na determinação da compactação do solo no cultivo da cana-de-açúcar. **Revista de Agricultura Neotropical**, Cassilândia-MS, v. 4, n. 2, p. 49-55, 2017.

MARQUES FILHO, A. C.; MOURA, M. S.; LANÇAS, K. P. Rodados agrícolas, desafios e perspectivas relacionadas ao trânsito de máquinas em áreas cultivadas. **Revista Plantio Direto**, ed. 154, 2020.

MARQUEZ, L. **Tractores Agrícolas: Tecnología y utilización**. Blake y Helsey España S.L., Ed. BMeB, Madri, 2012, 844p.

MARTINS, P. C. C.; DIAS JUNIOR, M. S.; AJAYI, A. E.; TAKAHASHI, E. N.; TASSINARI, D. Soil compaction during harvest operations in five tropical soils with different textures under eucalyptus forests. **Ciência e Agrotecnologia**, v.42, p.58-68, 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/1413-70542018421005217>

MAZZA, J. A. Sistematização e manejo conservacionista dos solos: Manejo dos solos na cana-de-açúcar como subsídio à mecanização. In: BELARDO, G.C; CASSIA, M. T.; SILVA, R. P. **Processos Agrícolas e Mecanização da Cana-de-açúcar**. 1ed., 344p., Jaboticabal: SBEA, 2015. Cap.4, p.89-104.

MAZETTO, F. R.; LANÇAS, K. P.; NAGAOKA, A. K.; CASTRO NETO, P.; GUERRA, S. P. Avaliação do contato pneu-solo em três modelos de pneus agrícolas. **Engenharia Agrícola**, v. 24, n.3, p.750-757, 2004.

MAZURANA, M.; LEVIEN, R.; INDA JUNIOR, A. V.; CONTE, O.; BRESSANI, L. A.; MÜLLER, J. Soil susceptibility to compaction under use conditions in southern Brazil. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 41, n. 1, p. 60-71, 2017.

MELO, M. O.; ROSA, J. H. M. Corte Transbordo e Transporte: Uso de transbordo na colheita mecanizada e seus impactos no CTT. In: BELARDO, G.C; CASSIA, M. T.; SILVA, R. P. **Processos Agrícolas e Mecanização da Cana-de-açúcar**. 1ed.,

344p., Jaboticabal: SBEA, 2015. Cap.18.1, p.429-438.

MELO, P. L.; CHERUBIN, M. R.; GOMES, T. C.; LISBOA, I. P.; SATIRO, L. S.; P CERRI, C. E.; SIQUEIRA-NETO, M. Straw removal effects on sugarcane root system and stalk yield. **Agronomy**, v. 10, n. 7, p. 1048, 2020.

MIALHE, L.G. **Máquinas Agrícolas: Ensaio e certificação**. FEALQ - Fundação de estudos agrários Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1996, 722p.

MIALHE, L.G. **Máquinas agrícolas para o plantio**. Millenium, Campinas, 2012, 623p.

MICHELAZZO, M. B.; BRAUNBECK, O. A. Análise de seis sistemas de recolhimento do palhico na colheita mecânica da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 5, p. 546-552, 2008.

MILAN, M.; ROSA, J. H. M. Corte Transbordo e Transporte, aspectos relevantes e uso de modelagem para o CTT. In: BELARDO, G.C; CASSIA, M. T.; SILVA, R. P. **Processos Agrícolas e Mecanização da Cana-de-açúcar**. 1ed., 344p., Jaboticabal: SBEA, 2015. Cap.18, p.415-428.

MIRZAVAND, J.; MORADI-TALEBBEIGI, R. Relationships between field management, soil compaction, and crop productivity. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v.66, 2020. <https://doi.org/10.1080/03650340.2020.1749267>

MOLIN, J. P.; AMARAL, L. R.; COLAÇO, A. F. **Agricultura de precisão**. Ed. Oficina de textos, 1. ed. 238p. São Paulo, 2015.

MOLINA JR, W. F. **Comportamento mecânico do solo em operações agrícolas**. Escola superior de agricultura Luiz de Queiroz, ESALQ/USP, ed. autor, Piracicaba, 223p., 2017. DOI: 10.11606/9788592238407

MONTANHA, G. K.; GUERRA, S. P. S.; SANCHEZ, P. A.; CAMPOS, F. H.; LANÇAS, K. P. Consumo de combustível de um trator agrícola no preparo do solo para a cultura do algodão irrigado em função da pressão de inflação nos pneus. **Energia na Agricultura**, v. 26, n. 1, p. 39-51, 2011.

MONTEIRO, L. A.; MASIERO, F. C.; LANÇAS, K. P.; GUERRA, S. P. S.; JESUS, M. G. Avaliação de pneus para carretas transbordo em tanque de solo. **Revista Científica Eletrônica de Agronomia**, v.17, n.1, p.7-16, Garça, 2010.

MORAD, M. M.; AFIFY, M. K.; EL-SAYED, E. A. Study on the effect of some farm implements traffic on soil compaction. **Misr J. Agric. Eng**, v. 24, n. 2, p. 216-234, 2007.

MORAES, M. T.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; MASTROBERTI, A. A.; LEVIEN, R. LEITNER, D.; SCHNEPF A. Soil compaction impacts soybean root growth in an Oxisol from subtropical Brazil. **Soil and Tillage Research**, v.200, p.1-14, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104611>

NASTARI, P. M. Perspectivas para o setor canavieiro: Análise e perspectivas do setor para o Brasil. In: BELARDO, G.C; CASSIA, M. T.; SILVA, R. P. **Processos Agrícolas e Mecanização da Cana-de-açúcar**. 1ed., 344p., Jaboticabal: SBEA, 2015. Cap.1, p.31-34.

NEVES, M. F.; KALAKI, R. B. Dimensão do setor sucroenergético: Mapeamento e quantificação da safra 2013/2014. In: BELARDO, G.C; CASSIA, M. T.; SILVA, R. P. **Processos Agrícolas e Mecanização da Cana-de-açúcar**. 1ed., 344p., Jaboticabal: SBEA, 2015. Cap.2, p.35-72.

OLIVEIRA FILHO, F. X. D.; MIRANDA, N. D. O.; MEDEIROS, J. F. D.; SILVA, P. C. M. D.; MESQUITA, F. D. O.; COSTA, T. K. G. Compactação de solo cultivado com cana-de-açúcar em Baía Formosa, Rio Grande do Norte. **Revista Ceres**, v. 63, n. 5, p. 715-723, 2016.

OLIVEIRA ROQUE, A. A. D.; DE SOUZA, Z. M.; BARBOSA, R. S.; DE SOUZA, G. S. Controle de tráfego agrícola e atributos físicos do solo em área cultivada com cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 7, p. 744-750, 2011.

OLUBANJO, O. O.; YESSOUFOU, M. A. Effect of Soil Compaction on the Growth and Nutrient Uptake of Zea Mays L. **Sustainable Agriculture Research**, v.8, n.2, 2019. DOI: <https://doi.org/sar.v8n2p46>

OTTO, R.; SILVA, A. D.; FRANCO, H. C. J.; OLIVEIRA, E. D.; TRIVELIN, P. C. O. High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development. **Soil and Tillage Research**, v.117, n.1, p. 201-210, 2011.

PAIVA, I. A. D.; RITA, Y. L.; CAVALIERI-POLIZELI, K. M. Knowledge and use of visual soil structure assessment methods in Brazil—A survey. **Soil and Tillage Research**, v. 204, p. 104704, 2020.

PANKRATH, H.; THIELE, R.; HERLE, I.; VON WOLFFERSDORFF, P. A. **Optical high-speed measurements of dynamic soil compaction**. Earthquake Geotechnical Engineering for Protection and Development of Environment and Constructions, Rome, Italy, 2019.

PEIXOTO, D. S.; SILVA, B. M.; OLIVEIRA, G. C.; MOREIRA, S. G.; SILVA F.; CURI, N. A Soil compaction diagnosis method for occasional tillage recommendation under continuous no tillage system in Brazil. **Soil and Tillage Research**, v.94, p.1-12, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104307>

PIMENTEL, L. G.; CHERUBIN, M. R.; OLIVEIRA, D. M.; CERRI, C. E.; CERRI, C. C. Decomposition of sugarcane straw: Basis for management decisions for bioenergy production. **Biomass and Bioenergy**, v.122, n.1, p.133-144, 2019.

POPIN, G. V.; SANTOS, A. K.; OLIVEIRA, T. D. P.; DE CAMARGO, P. B.; CERRI, C. E.; SIQUEIRA-NETO, M. Sugarcane straw management for bioenergy: effects of global warming on greenhouse gas emissions and soil carbon storage. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, p. 1-19, 2019.

PYTKA, J.; ŚLICZNIAK, T.; KASPRZAK, P.; GNAPOWSKI. Tyre-Soil Interface Determination by Photogrammetric Method. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. **IOP Publishing**, v. 421, n. 2 p. 022-030, 2018.

QUEIROZ-VOLTAN, R. B.; PRADO, H.; MORETTI, F. C. Aspectos estruturais de raízes de cana-de-açúcar sob o efeito da compactação do solo. **Bragantia**, v. 57, n. 1, 1998.

RASCHE, L.; DEL DIEGO, R. S. Pros and cons of sugarcane straw recovery in São Paulo. **BioEnergy Research**, p. 1-10, 2019.

RASOOL, S.; RAHEMAN, H. Improving the tractive performance of walking tractors using rubber tracks. **Biosystems engineering**, v. 167, p. 51-62, 2018.

REINERT, D. J.; ALBUQUERQUE, J. A.; REICHERT, J. M.; AITA, C.; ANDRADA, M. M. C. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 5, p. 1805-1816, 2008.

RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C. **Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente**. Ed. Autores, Piracicaba, 2009. 333p.

RIPOLI, T.C.C.; RIPOLI, M. L. C. Evaluation of five sugarcane planters. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n.6, p.1110-1122, 2010.

ROSIM, D. C.; DE MARIA, I. C.; SILVA, R. L.; SILVA, Á. P. D. Compactação de um Latossolo Vermelho Distroférico com diferentes quantidades e manejos de palha em superfície. **Bragantia**, v. 71, n. 4, p. 502-508, 2012.

ROSOLEM, C. A. Interpretação de análise de solo e desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar. In: **Seminário sobre Tecnologias de Manejo de Solo e Adubação da Cana-de-Açúcar**, Ribeirão Preto. Anais, p.53-73, 1994.

ROSOLEM, C. A.; FERNANDEZ, E. M.; ANDREOTTI, M.; CRUSCIOL, C. A. C. Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, n. 5, p. 821-828, 1999.

ROSSATO, O. B.; CRUSCIOL, C. A. C.; MARTELLO, J. M. Fitomassa e acúmulo de macronutrientes em cana-de-açúcar sob compactação e umidade do solo. **Irriga**, v. 21, n. 3, p. 605-605, 2016.

SÁ, M. A. C.; SANTOS JR. J. D. G. Compactação do solo: consequências para o crescimento vegetal. Planaltina, DF: **Embrapa Cerrados**, 26p., 2005.

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

SÁNCHEZ-GIRÓN, V.; ANDREU, E.; HERNANZ, J.L. Response of five types of soil

to simulated compaction in the form of confined uniaxial compression test. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.48, p.37-50, 1998.

SANTOS, P.; LANÇAS, K. Determinação da área de contato entre um pneu agrícola e uma superfície rígida utilizando-se o método da prensa hidráulica. **Energia na Agricultura**, v.14, n.3, p.57-64, 1999.

SANTOS, H.G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAUJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**, EMBRAPA, 5 ed., Brasília-DF, 2018.

SATIRO, L. S.; CHERUBIN, M. R.; SAFANELLI, J. L.; LISBOA, I. P.; DA ROCHA JUNIOR, P. R.; CERRI, C. E. P.; CERRI, C. C. Sugarcane straw removal effects on Ultisols and Oxisols in south-central Brazil. **Geoderma Regional**, v.11, n.1, p.86-95, 2017.

SEKI, A. S.; SEKI, F. G.; JASPER, S. P.; SILVA, P. R. A.; BENEZ, S. H. Efeitos de práticas de descompactação do solo em área sob sistema plantio direto. **Revista Ciência Agronômica**, v. 46, n. 3, p. 460-468, 2015.

SEVERIANO, E. D. C.; DIAS JÚNIOR, M. D. S.; CASTRO, M. B. D.; DE OLIVEIRA, L. F.; COSTA, K. A. D. P. Compactação de solos cultivados com cana-de-açúcar: II-quantificação das restrições às funções edáficas do solo em decorrência da compactação prejudicial. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 3, p. 414-423, 2010.

SILVA, A. G.; LISBOA, I. P.; CHERUBIN, M. R.; CERRI, C. E. How much sugarcane straw is needed for covering the soil? **BioEnergy Research**, v. 12, n. 4, p. 858-864, 2019.

SILVA, R. B. D.; IORI, P.; SOUZA, Z. M. D.; PEREIRA, D. D. M. G.; VISCHI FILHO, O. J.; SILVA, F. A. D. M. Pressões de contato e o impacto de conjuntos motomecanizados em Latossolo com presença e ausência de palhada de cana-de-açúcar. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 40, n. 3, p. 265-278, 2016.

SILVA, V. R. D.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em plantio direto. **Ciência Rural**, v. 34, n. 2, p. 399-406, 2004.

SINGH, K.; CHOUDHARY, O. P.; SINGH, H. P.; SINGH, A.; MISHRA, S. K. Sub-soiling improves productivity and economic returns of cotton-wheat cropping system. **Soil and Tillage Research**, v.189, p.131-139, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.01.013>

SOLTANGHEISI, A.; HAYGARTH, P. M.; PAVINATO, P. S.; CHERUBIN, M. R.; TELES, A. P. B.; BORDONAL, R. D. O.; MARTINELLI, L. A. Long term sugarcane straw removal affects soil phosphorus dynamics. **Soil and Tillage Research**, v.208, n.1, p.104898, 2021.

SOUZA, C. A. A. D.; SILVA, T. G. F. D.; SOUZA, L. S. B. D.; MOURA, M. S. B. D.;

SILVA, P. P.; MARIN, F. R. Straw management effects on sugarcane growth, nutrient cycling and water use in the Brazilian semiarid region. **Bragantia**, v.79, n.1, p.525-533, 2020.

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

SOUZA, R.; HARTZELL, S.; FERRAZ, A. P. F.; DE ALMEIDA, A. Q.; DE SOUSA LIMA, J. R.; ANTONINO, A. C. D.; DE SOUZA, E. S. Dynamics of soil penetration resistance in water-controlled environments. **Soil and Tillage Research**, v.205, n.1, p.104768, 2021.

SOUZA, Z. M. D.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Geoestatística e atributos do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, v. 40, n. 1, p. 48-56, 2010.

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

SOUZA, Z. M. D.; PRADO, R. D. M.; PAIXÃO, A. C. S.; CESARIN, L. G. Sistemas de colheita e manejo da palhada de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, p. 271-278, 2005.

SPAROVEK, G.; MAULE, R. F. Técnicas de Conservação do solo e da água: Controle do escoamento superficial difuso de água. In: BELARDO, G.C; CASSIA, M. T.; SILVA, R. P. **Processos Agrícolas e Mecanização da Cana-de-açúcar**. 1ed., 344p., Jaboticabal: SBEA, 2015. Cap.5, p.129-148.

SUNUSI, I. I.; ZHOU, J.; WANG, Z. Z.; SUN, C.; IBRAHIM, I. E.; OPIYO, S.; OLANREWAJU, T. O. Intelligent tractors: Review of online traction control process. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 170, p. 105176, 2020.

TAVARES, O.C.H.; LIMA, E.; ZONTA, E. Sugarcane growth and productivity under different tillage and crop systems. **Acta Sci.**, v.32, n.1, p.61-68, 2010.

TAYLOR, H.; BRAR, G. S. Effect of soil compaction on root development. **Soil and Tillage Research**, v. 19, n. 2-3, p. 111-119, 1991.

TEIMOURLOU, R. F.; TAGHAVIFAR, H. Determination of the super-elliptic shape of tire-soil contact area using image processing method. **Cercetari Agronomice in Moldova**, v.48, n.2, p.5-14, 2015.

TENELLI, S.; BORDONAL, R. O.; BARBOSA, L. C.; CARVALHO, J. L. N. Can reduced tillage sustain sugarcane yield and soil carbon if straw is removed?. **BioEnergy Research**, v. 12, n. 4, p. 764-777, 2019.

THEODORO, G. D. F.; DE OLIVEIRA GOLIN, H.; SILVA, M. S.; REZENDE, R. P.; DE

ABREU, V. L. S. Influência de sistemas de preparo na manutenção da palhada e resistência do solo à penetração. **Journal of Neotropical Agriculture**, v. 5, n. 2, p. 25-30, 2018.

UNGUREANU, N.; VLĂDUȚ, V.; CUJBESCU, D. Soil compaction under the wheel of a sprayer. In: **E3S Web of Conferences**. EDP Sciences, v. 112, 2019.

UPADHYAYA, S. K.; CHANCELLOR, W.; PERUMPRAL, J.V.; SHAFER, R. L.; GILL, W. R.; VENDERBERG, G. E. Advances in soil dynamics. v.1; 2 e 3 American Society of Agricultural Engineers, **ASAE**, st. Joseph, Michigan 1994.

USDA. **Keys to soil taxonomy**. Soil Conserv. Serv., V.12, n.410, 2014.
<https://doi.org/10.1109/TIP.2005.854494>.

VARÓN-RAMÍREZ, V. M.; CAMACHO-TAMAYO, J. H.; GONZÁLEZ-NIVIA, J. Management zones determination based on physical properties of the soil. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 42, n. 3, p. 248-260, 2018.

VASCONCELOS, R. F. D.; SOUZA, E. R.; CANTALICE, J. R. B.; SILVA, L. S. Qualidade física de Latossolo Amarelo de tabuleiros costeiros em diferentes sistemas de manejo da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, p.381-386, 2014.

VERECKEN, H.; SCHNEPF, A.; HOPMANS, J.W. JAVAUX, M.; ROOSE, T.; YOUNG, I. M. Modeling soil processes: review, key challenges, and new perspectives. **Soil Science Society of America**. v.15, n.5, 2016. DOI: [doi:10.2136/vzj2015.09](https://doi.org/10.2136/vzj2015.09).

VIAN, C. E. F.; SILVA, R. P.; BARICELO, L. G.; PISSINATO, B. Evolução da produção e mecanização da cana no estado de São Paulo: Desafios e Perspectivas. In: BELARDO, G.C; CASSIA, M. T.; SILVA, R. P. **Processos Agrícolas e Mecanização da Cana-de-açúcar**. 1ed., 344p., Jaboticabal: SBEA, 2015. Cap.3, p.73-88.

VISCHI FILHO, O. J.; SOUZA, Z. M.; DA SILVA, R. B.; LIMA C. C.; PEREIRA, D. M. G.; DE LIMA, M. E.; SOUSA, A. C.; SOUZA, G. S. Capacidade de suporte de carga de Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar e efeitos da mecanização no solo. **Pesq. Agrop. Brasileira**, v.50, p.322–332. 2015. DOI: [https://10.1590/S0100-204X2015000400008](https://doi.org/10.1590/S0100-204X2015000400008)

YANG, S.; LIU, J.; XU, L.; ZHANG, M.; JENG, D. S. A New Approach to Explore the Surface Profile of Clay Soil Using White Light Interferometry. **Sensors**, v. 20, n. 11, p. 3009, 2020.

WEN, C.; XIE, B.; LI, Z.; YIN, Y.; ZHAO, X.; SONG. Power density based fatigue load spectrum editing for accelerated durability testing for tractor front axles. **Biosystems Engineering**, v. 200, p. 73-88, 2020.

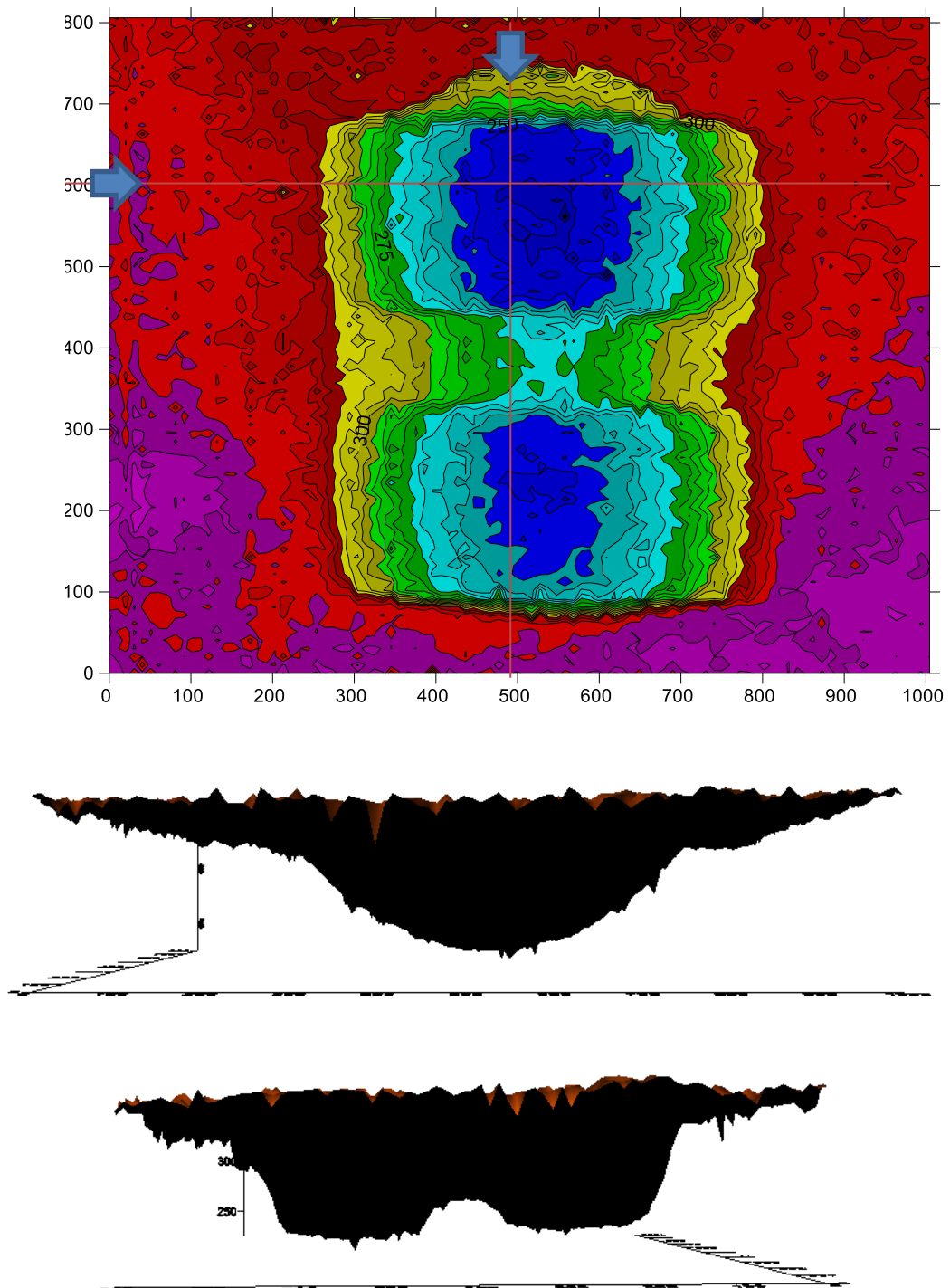
APÊNDICE A - Resultados das análises em superfície deformável para o pneu P1 275/80R22.5 em solo sem cobertura vegetal

Pneu 275/80R22.5 em ensaio de superfície deformável sobre solo sem a presença de cobertura vegetal – superfície S1.

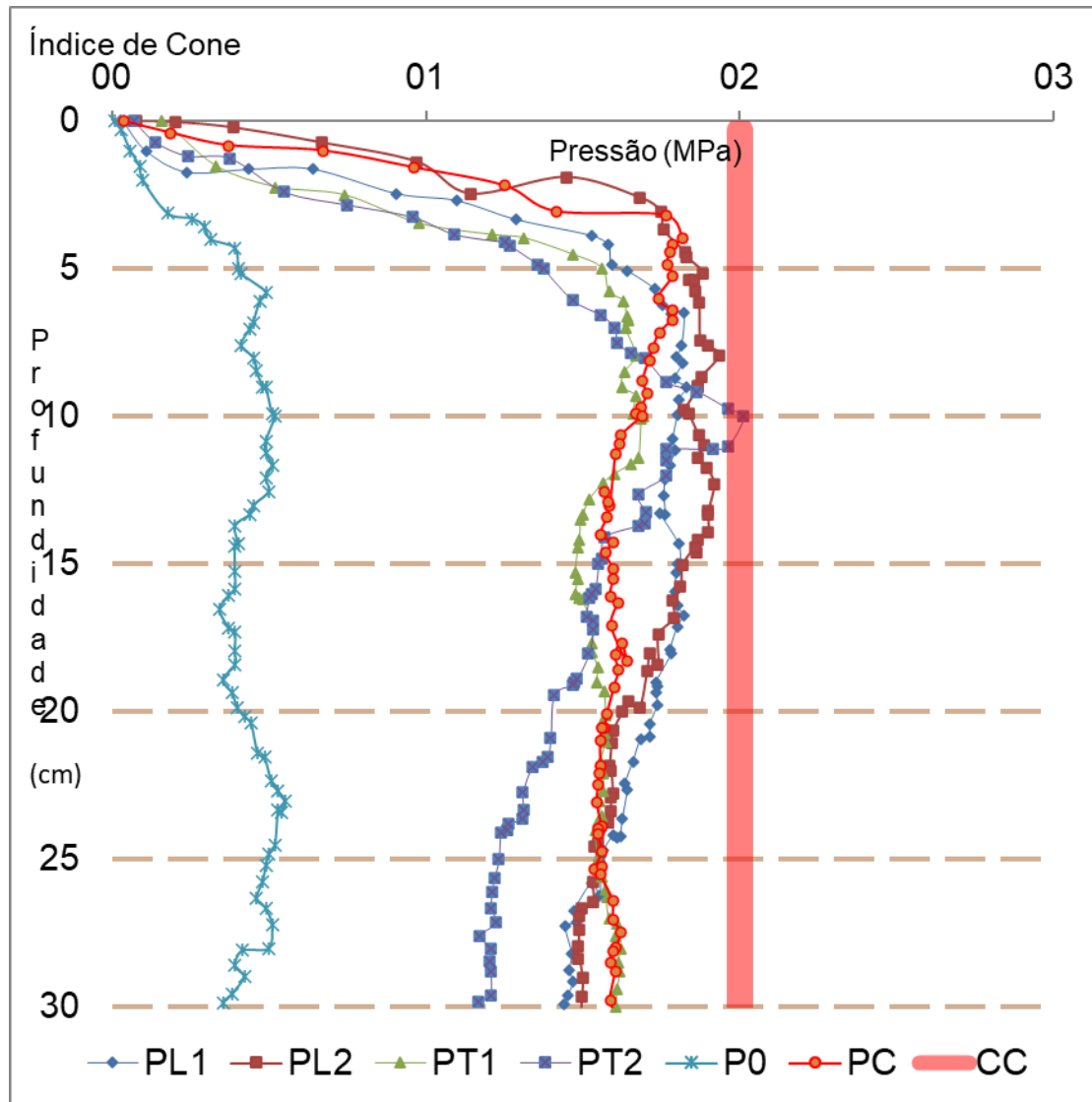


A impressão do pneu no tanque de solo resultou em um recalque médio de 0,61 m de largura, 0,51 m de comprimento e 0,10 m de profundidade. **A área de contato real foi de 0,24m², e a área total impactada foi de 0,33m².**

Mapa de isolinhas do recalque gerado pelo Pneu P1 275/80R22.5, em solo sem a presença de cobertura vegetal (S1), com cortes de secção AA e BB.

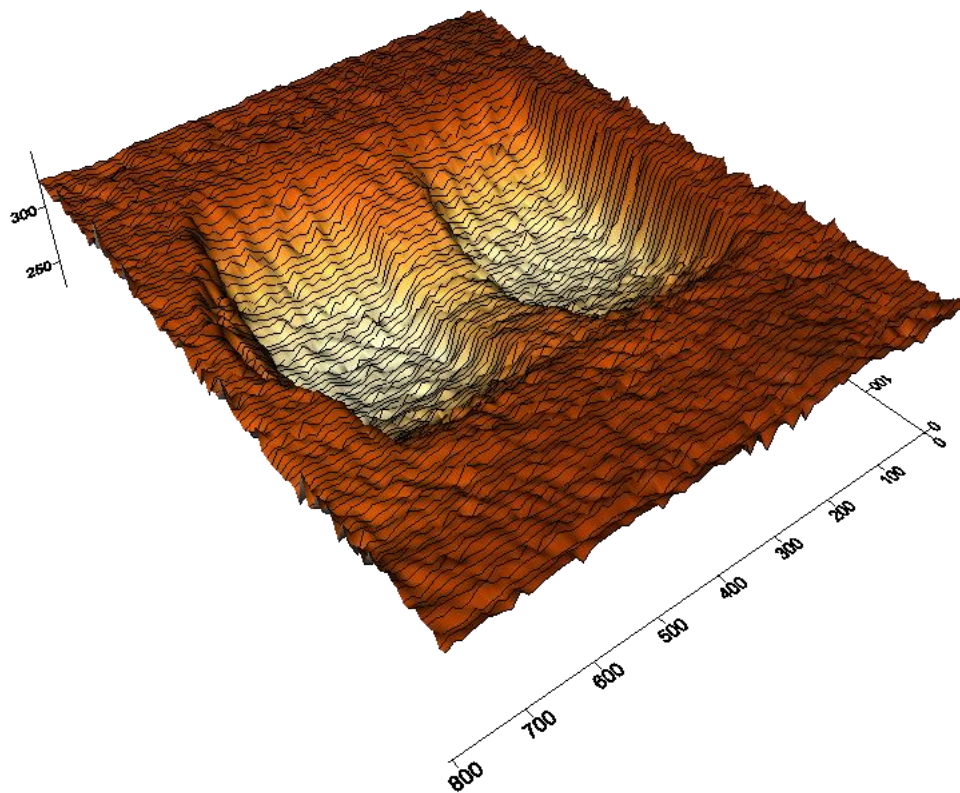


Índice de cone (IC), obtido no ensaio de resistência à penetração do solo com o Pneu P1 275/80R22.5, em solo sem a presença de cobertura vegetal (S1).

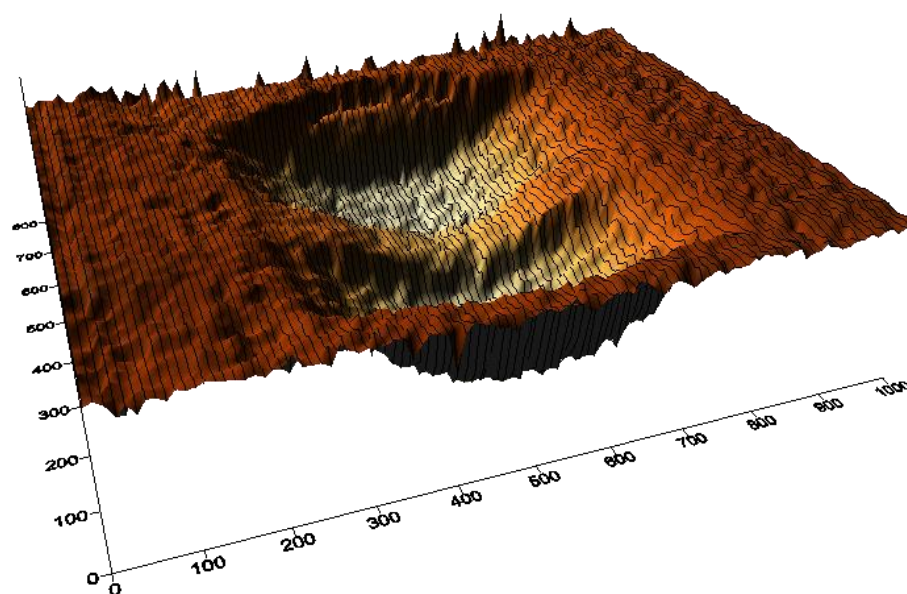


P0: Ponto de controle; PC: ponto central; PL1: Ponto longitudinal 1; PL2: Ponto longitudinal 2; PT1: Ponto transversal 1 e PT2: Ponto transversal 2; CC: Ponto de referência para compactação do solo (2,0MPa).

Mapa tridimensional do recalque ocasionado pelo Pneu P1 275/80R22.5, em solo sem a presença de cobertura vegetal (S1)



Mapa de secção transversal e longitudinal do recalque ocasionado pelo Pneu P1 275/80R22.5, em solo sem a presença de cobertura vegetal (S1)



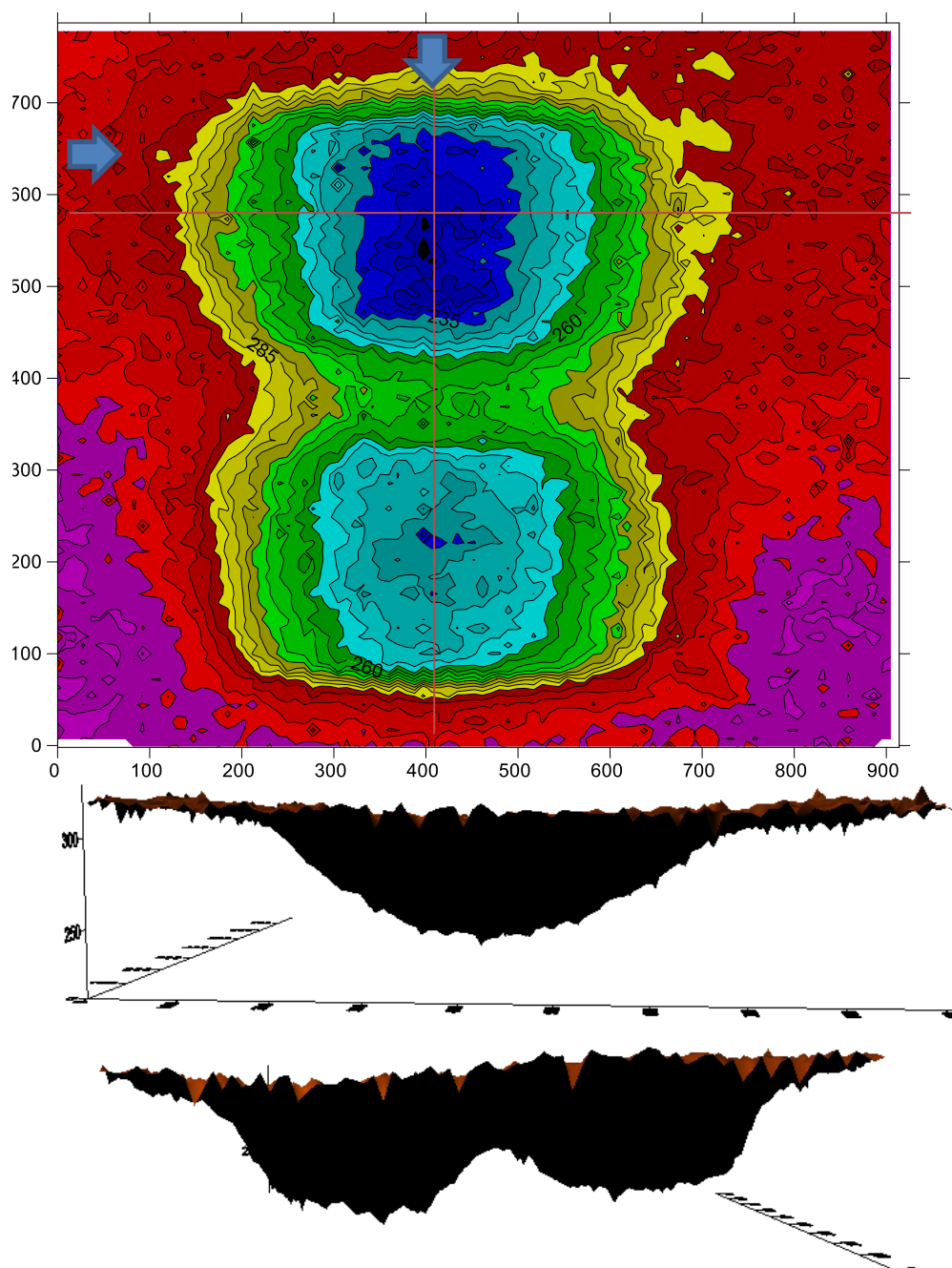
APÊNDICE B - Resultados das análises em superfície deformável para o pneu P1 275/80R22.5 em solo com 15Mg ha⁻¹ de palhiço de cana em cobertura

Recalque do Pneu P1 275/80R22.5 em ensaio superfície deformável sobre solo (S2).

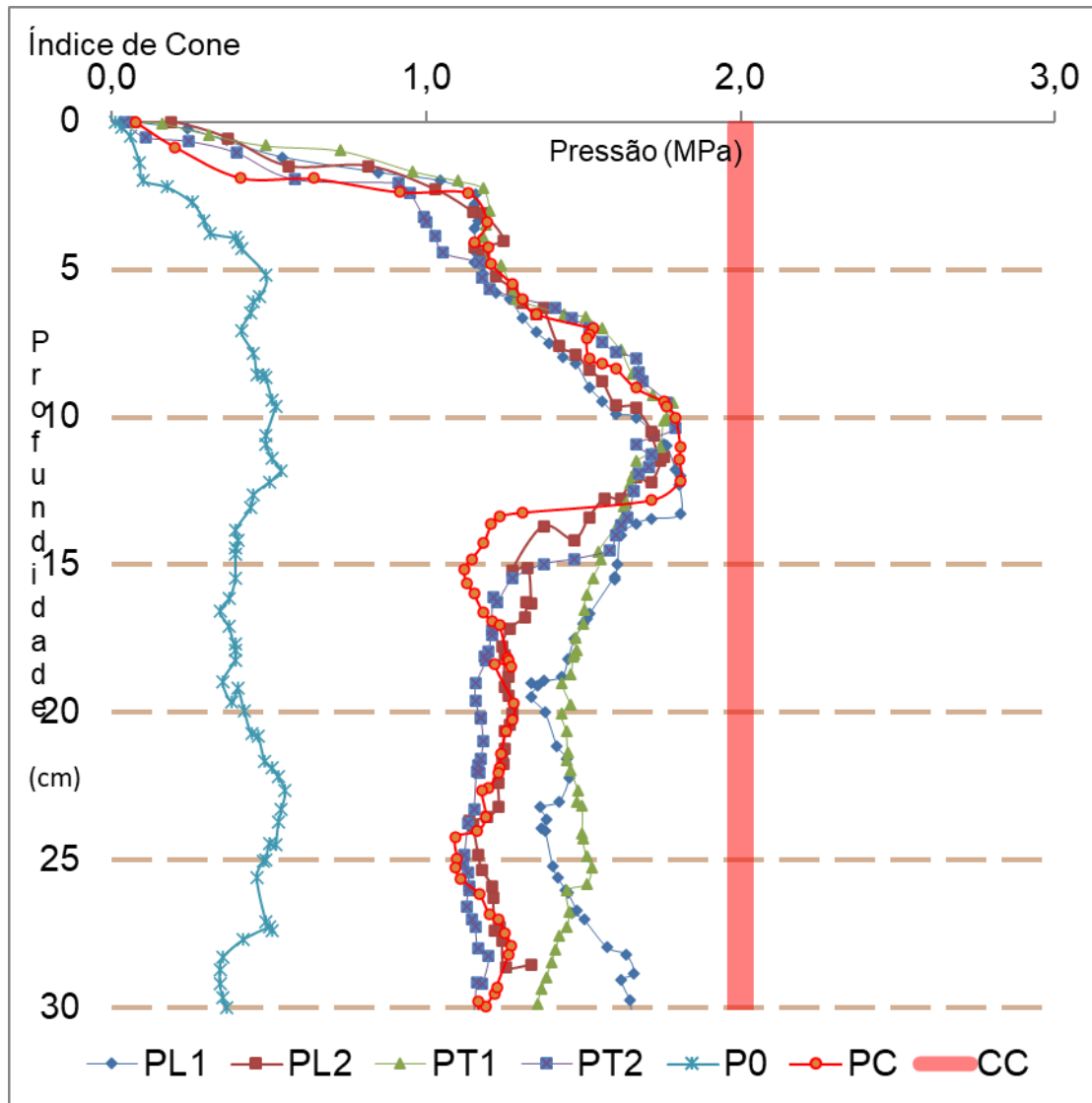


A impressão do pneu no tanque de solo resultou em um recalque médio de 0,72 m de largura, 0,54 m de comprimento e 0,08 m de profundidade. **A área de contato real foi de 0,31m², e a área total impactada foi de 0,38m².**

Mapa de isolinhas do recalque gerado pelo Pneu P1 275/80R22.5 - superfície S2, com cortes de secção AA e BB.

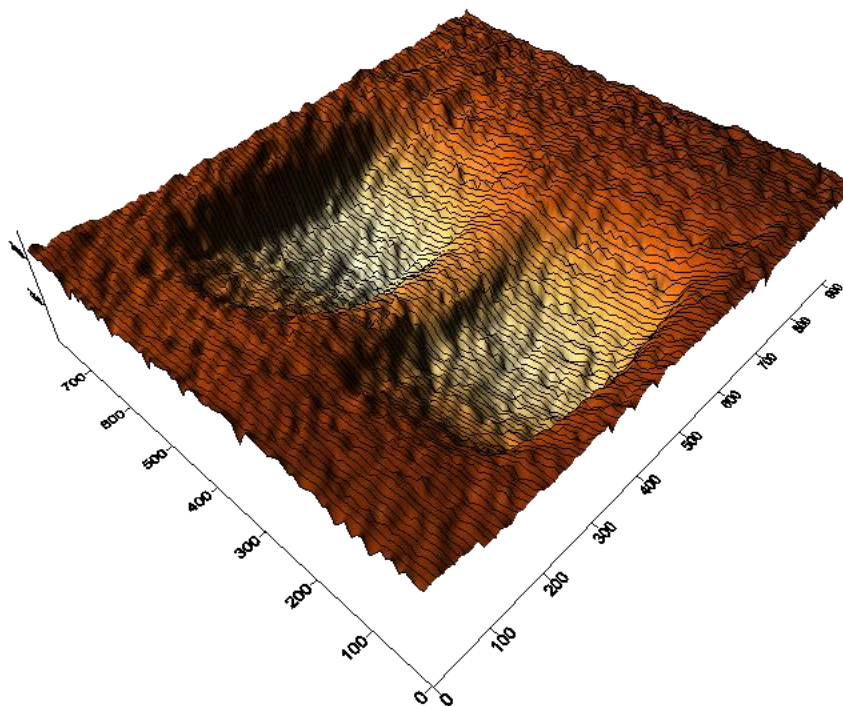


Índice de cone (IC), obtido no ensaio de resistência à penetração do solo com o Pneu P1 275/80R22.5, sobre solo com 15Mg ha⁻¹ de cobertura vegetal.

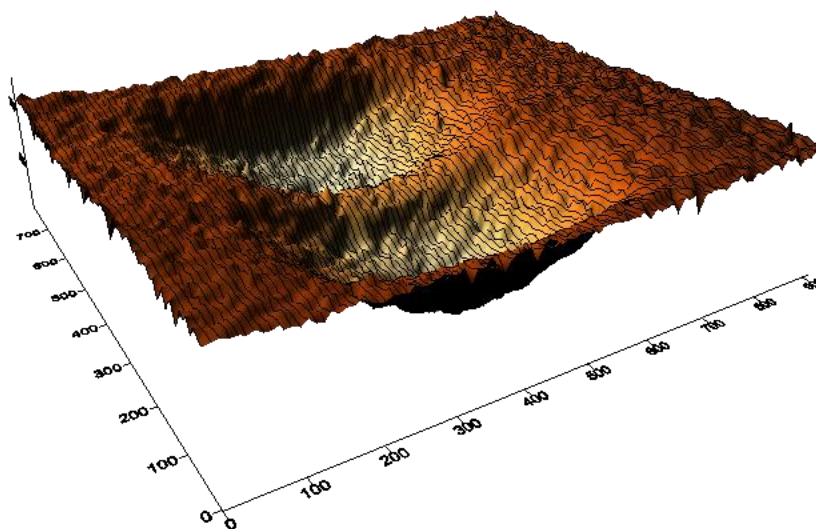


P0: Ponto de controle; PC: ponto central; PL1: Ponto longitudinal 1; PL2: Ponto longitudinal 2; PT1: Ponto transversal 1 e PT2: Ponto transversal 2; CC: Ponto de referência para compactação do solo (2,0MPa).

Mapa tridimensional do recalque ocasionado pelo Pneu P1 275/80R22.5, sobre solo com 15Mg ha⁻¹ de cobertura vegetal



Mapa de secção transversal e longitudinal do recalque ocasionado pelo Pneu P1 275/80R22.5, sobre solo com 15Mg ha⁻¹ de cobertura vegetal



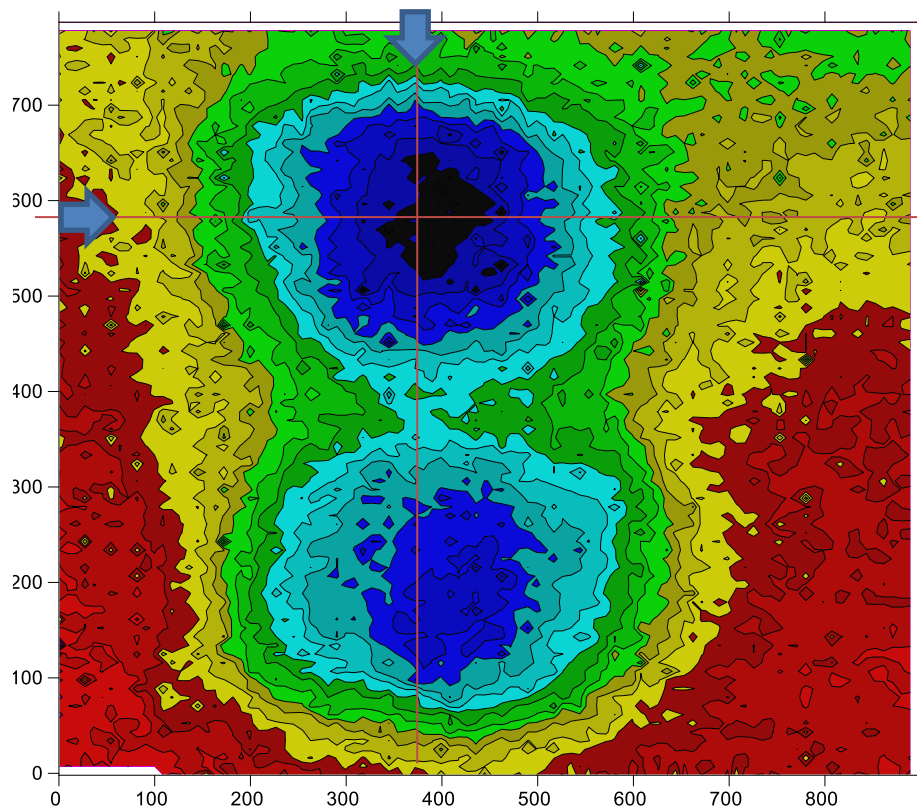
APÊNDICE C - Resultados das análises em superfície deformável para o pneu P1 275/80R22.5 em solo com 30Mg ha⁻¹ de palhiço de cana em cobertura

Recalque do pneu P1 275/80R22.5 em ensaio de superfície deformável sobre solo com 30Mg ha⁻¹ de cobertura vegetal – superfície S3.

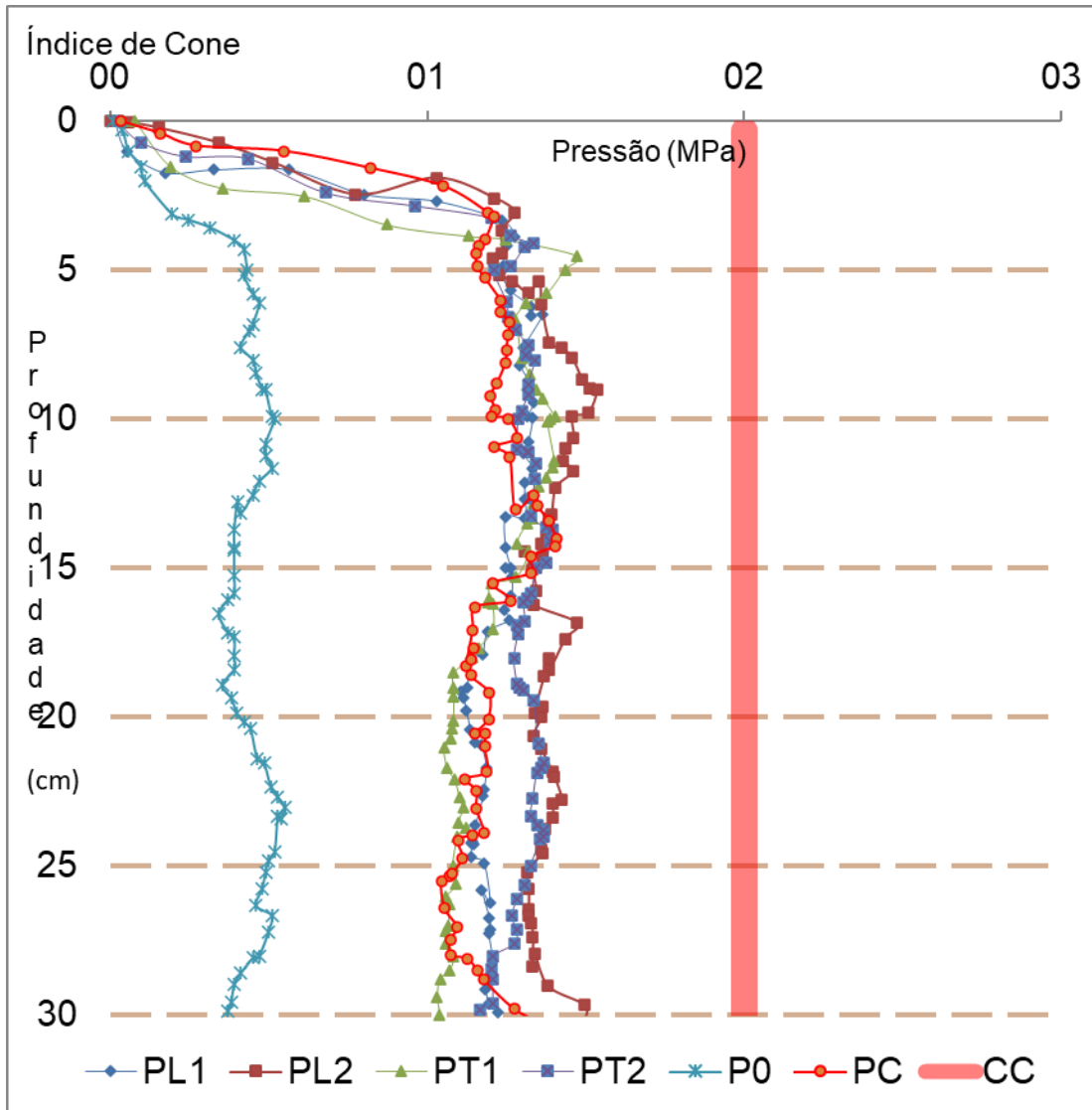


A impressão do pneu no tanque de solo resultou em um recalque médio de 0,76 m de largura, 0,63 m de comprimento e 0,07 m de profundidade. **A área de contato real foi de 0,36m², e a área total impactada foi de 0,45m².**

Mapa de isolinhas do recalque gerado pelo Pneu P1 275/80R22.5 em ensaio de superfície deformável sobre solo com 30Mg ha^{-1} de cobertura vegetal – superfície S3, com cortes de secção AA e BB.

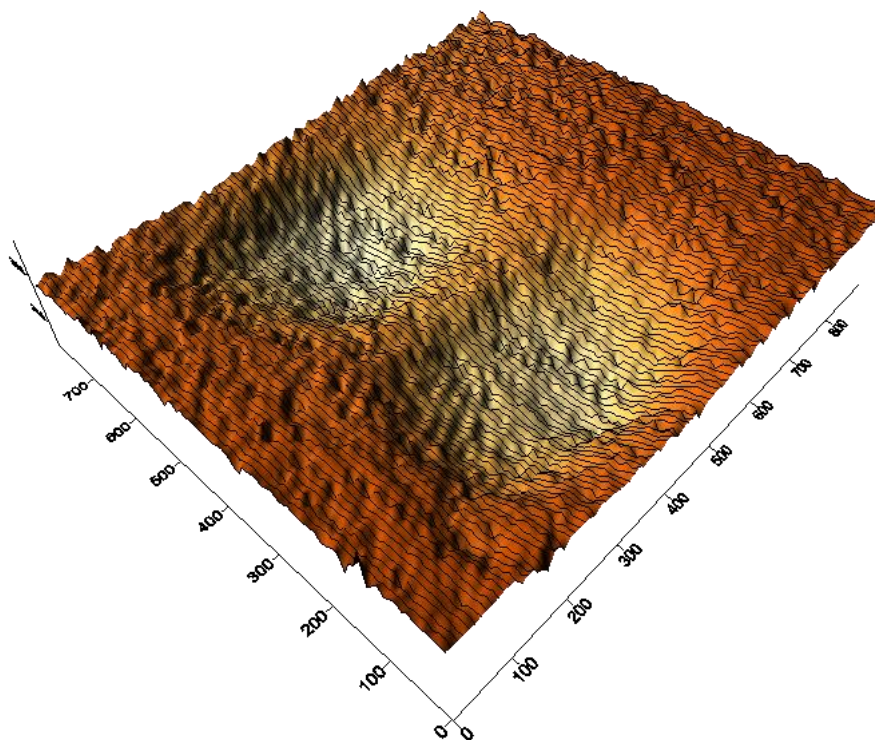


Índice de cone (IC), obtido no ensaio de resistência à penetração do solo com o Pneu P1 275/80R22.5 em ensaio de superfície deformável sobre solo com 30Mg ha⁻¹ de cobertura vegetal – superfície S3

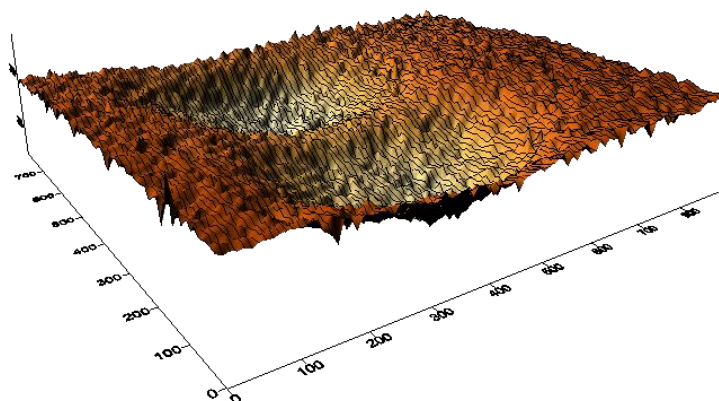


P0: Ponto de controle; PC: ponto central; PL1: Ponto longitudinal 1; PL2: Ponto longitudinal 2; PT1: Ponto transversal 1 e PT2: Ponto transversal 2; CC: Ponto de referência para compactação do solo (2,0MPa).

Mapa tridimensional do recalque ocasionado pelo Pneu P1 275/80R22.5 em ensaio de superfície deformável sobre solo com 30Mg ha⁻¹ de cobertura vegetal – superfície S3



Mapa de secção transversal e longitudinal do recalque ocasionado pelo Pneu P1 275/80R22.5 em ensaio de superfície deformável sobre solo com 30Mg ha⁻¹ de cobertura vegetal – superfície S3



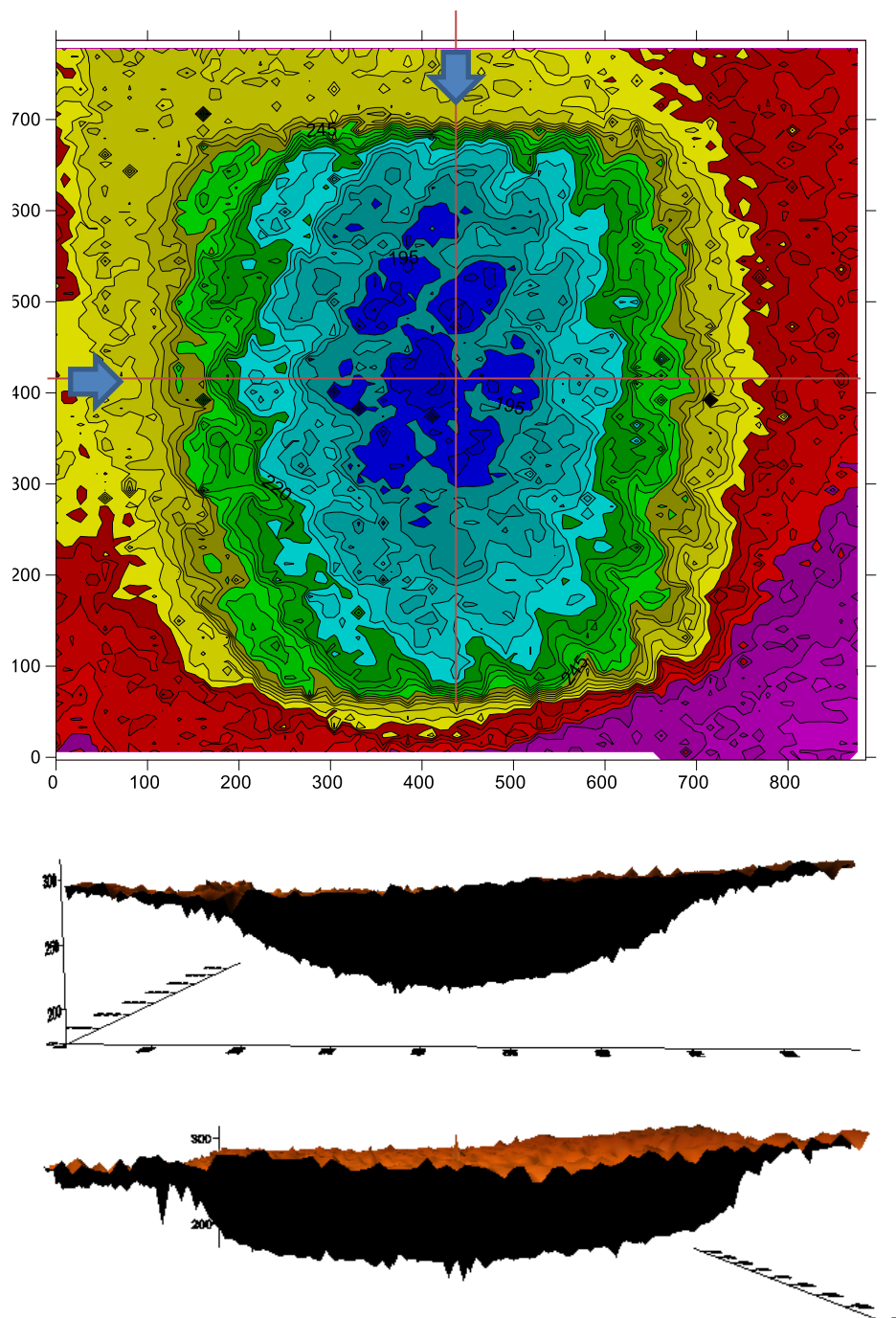
APÊNDICE D - Resultados das análises em superfície deformável para o pneu P2 600/50R22.5 em solo sem cobertura vegetal

Recalque do pneu P2 600/50R22.5 em ensaios de superfície deformável sobre solo sem a presença de cobertura vegetal (S1).

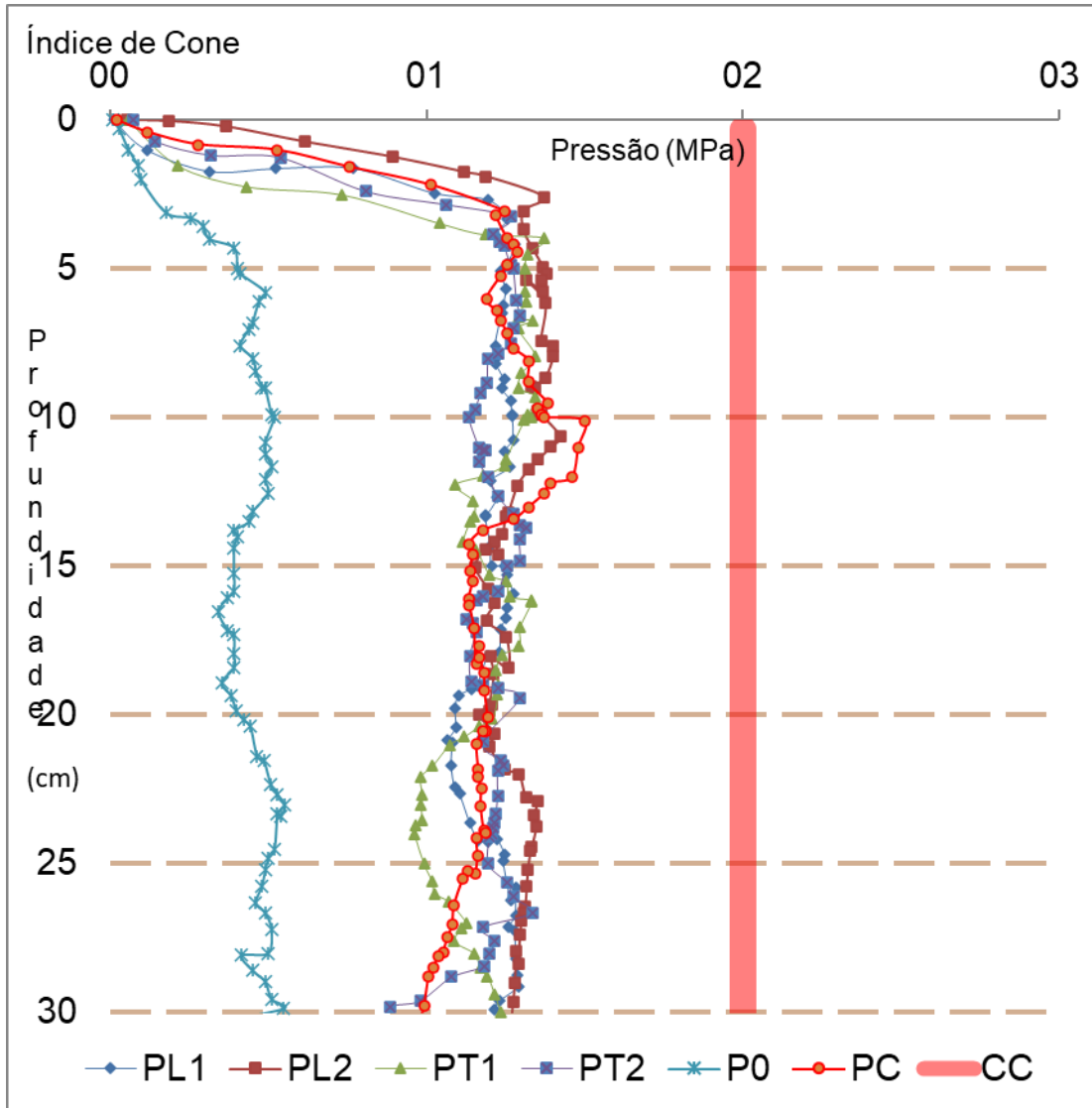


A impressão do pneu no tanque de solo resultou em um recalque médio de 0,68 m de largura, 0,66 m de comprimento e 0,09 m de profundidade. **A área de contato real foi de 0,36m², e a área total impactada foi de 0,50m².**

Mapa de isolinhas do recalque gerado pelo Pneu P2 600/50R22.5, em solo sem a presença de cobertura vegetal (S1), com cortes de secção AA e BB.

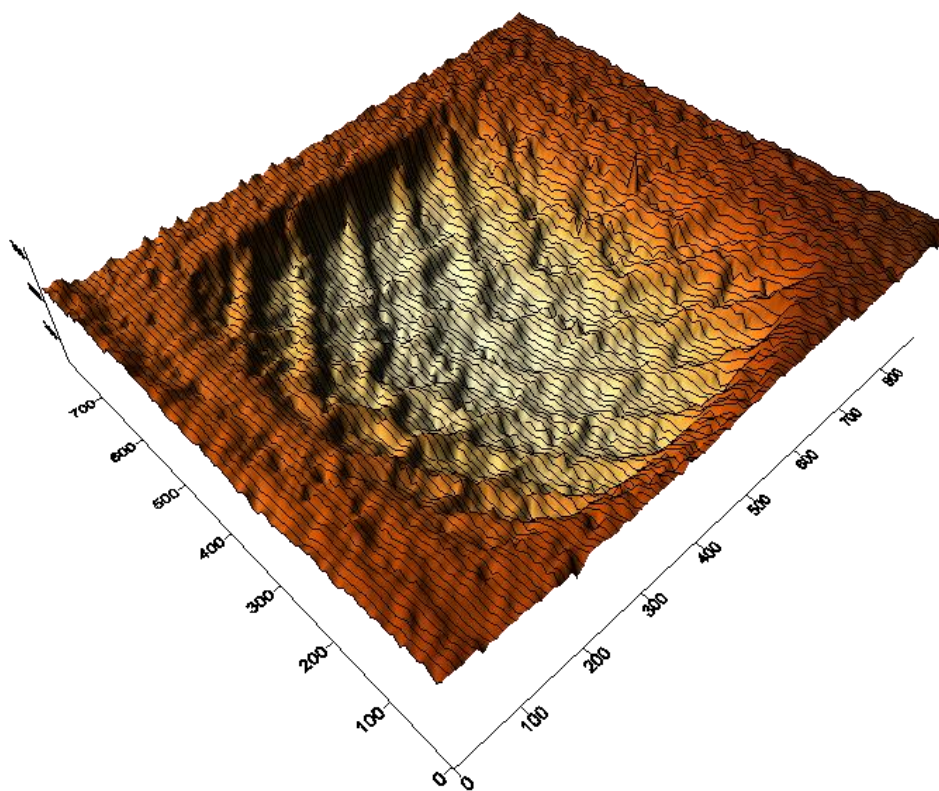


Índice de cone (IC), obtido no ensaio de resistência à penetração do solo com o Pneu P2 600/50R22.5, em solo sem a presença de cobertura vegetal (S1).

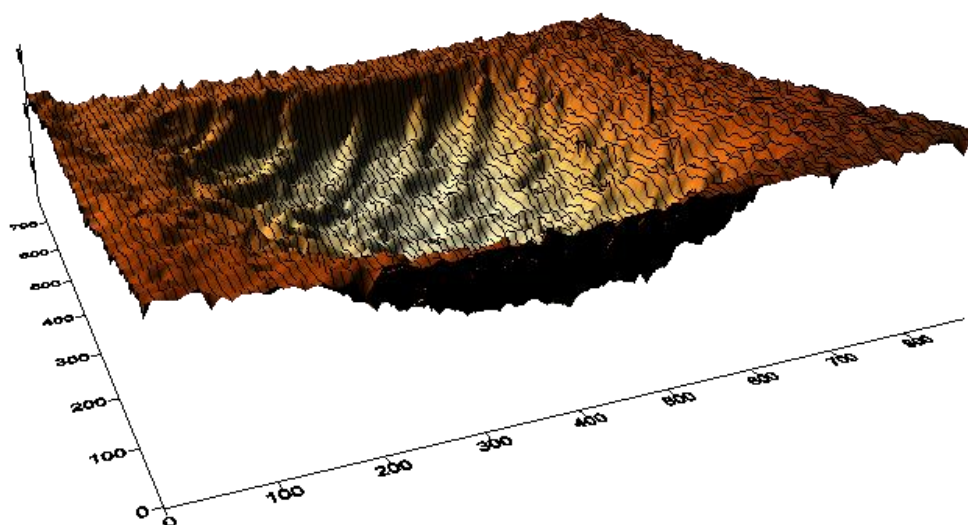


P0: Ponto de controle; PC: ponto central; PL1: Ponto longitudinal 1; PL2: Ponto longitudinal 2; PT1: Ponto transversal 1 e PT2: Ponto transversal 2; CC: Ponto de referência para compactação do solo (2,0MPa).

Mapa tridimensional do recalque ocasionado pelo Pneu P2 600/50R22.5, em solo sem a presença de cobertura vegetal (S1).



Mapa de secção transversal e longitudinal do recalque ocasionado pelo Pneu P2 600/50R22.5, em solo sem a presença de cobertura vegetal (S1)



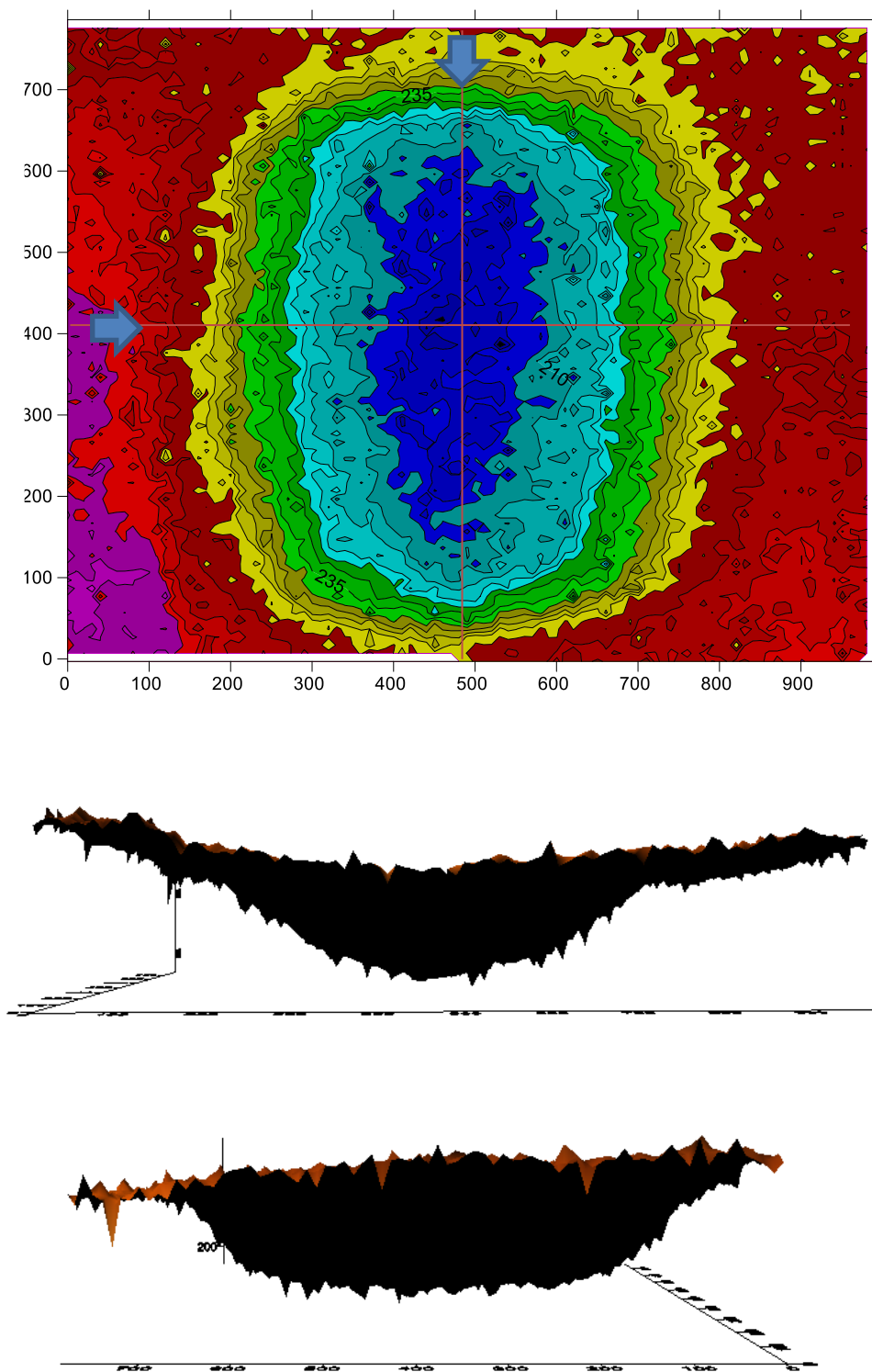
APÊNDICE E - Resultados das análises em superfície deformável para o pneu P2 600/50R22.5 em solo com 15Mg ha⁻¹ de palhiço de cana em cobertura

Recalque do pneu P2 600/50R22.5 em ensaio de superfície deformável sobre superfície de solo (S2) com cobertura vegetal (15Mg ha⁻¹ de palhiço de cana).

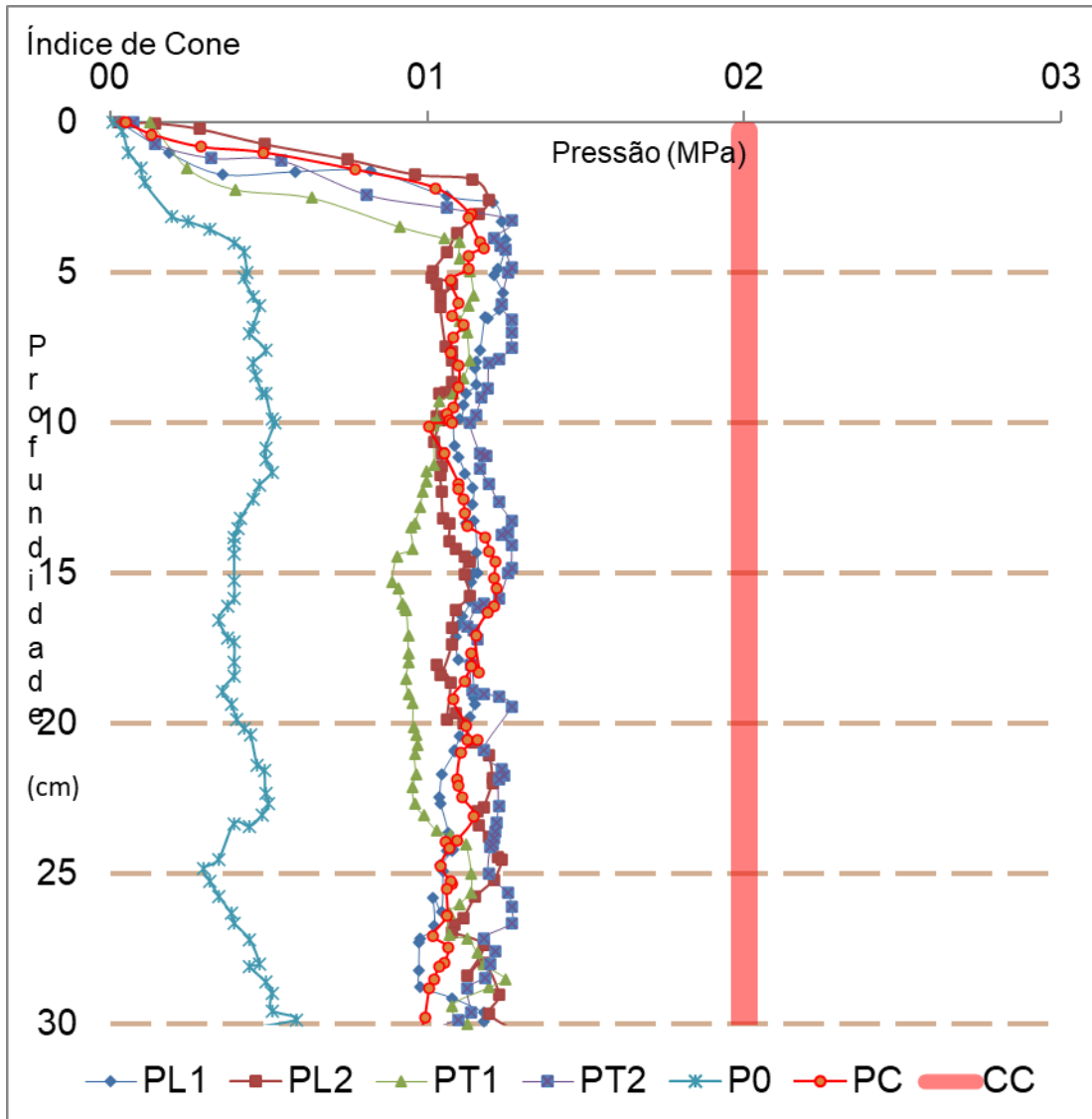


A impressão do pneu no tanque de solo resultou em um recalque médio de 0,74 m de largura, 0,67 m de comprimento e 0,08 m de profundidade. **A área de contato real foi de 0,39m², e a área total impactada foi de 0,53m².**

Mapa de isolinhas do recalque gerado pelo Pneu P2 600/50R22.5, sobre superfície de solo (S2) com cobertura vegetal (15Mg ha⁻¹ de palhiço de cana), com cortes de secção AA e BB.

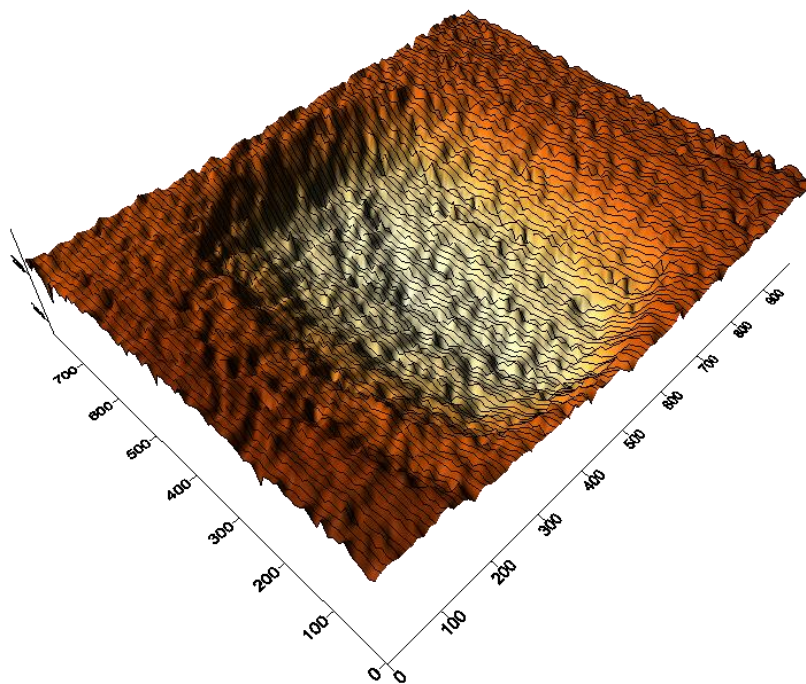


Índice de cone (IC), obtido no ensaio de resistência à penetração do solo com o Pneu P2 600/50R22.5, sobre superfície de solo (S2) com cobertura vegetal (15Mg ha⁻¹ de palhiço de cana).

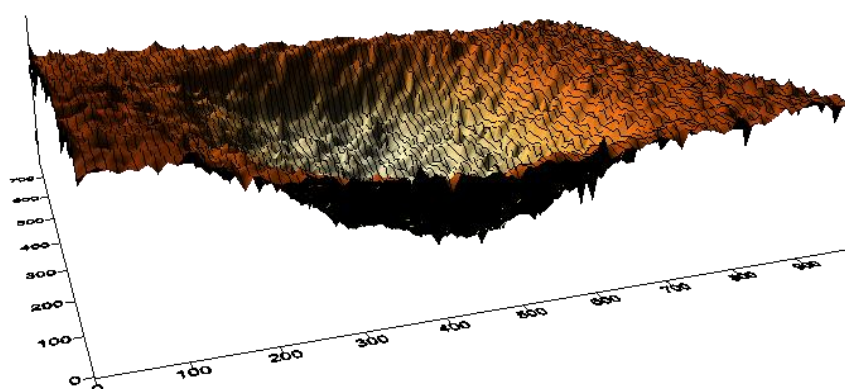


P0: Ponto de controle; PC: ponto central; PL1: Ponto longitudinal 1; PL2: Ponto longitudinal 2; PT1: Ponto transversal 1 e PT2: Ponto transversal 2; CC: Ponto de referência para compactação do solo (2,0MPa).

Mapa tridimensional do recalque ocasionado pelo Pneu P2 600/50R22.5, sobre superfície de solo (S2) com cobertura vegetal (15Mg ha⁻¹ de palhiço de cana)



Mapa de secção transversal e longitudinal do recalque ocasionado pelo Pneu P2 600/50R22.5, sobre superfície de solo (S2) com cobertura vegetal (15Mg ha⁻¹ de palhiço de cana)



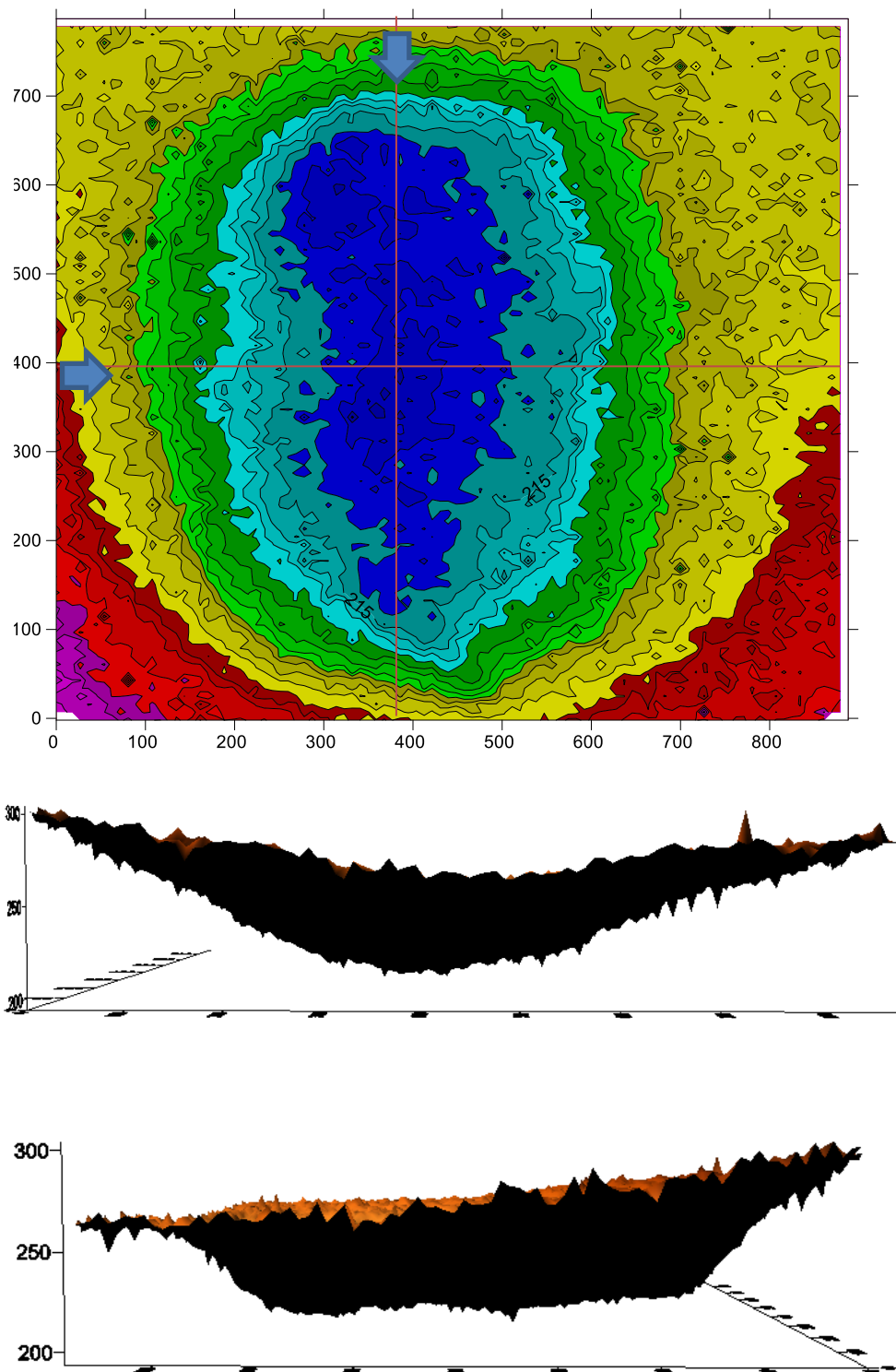
APÊNDICE F - Resultados das análises em superfície deformável para o pneu P2 600/50R22.5 em solo com 30Mg ha⁻¹ de palhiço de cana em cobertura

Pneu P2 600/50R22.5 em ensaio de superfície deformável sobre solo (S3) com cobertura vegetal (30Mg ha⁻¹ de palhiço de cana).

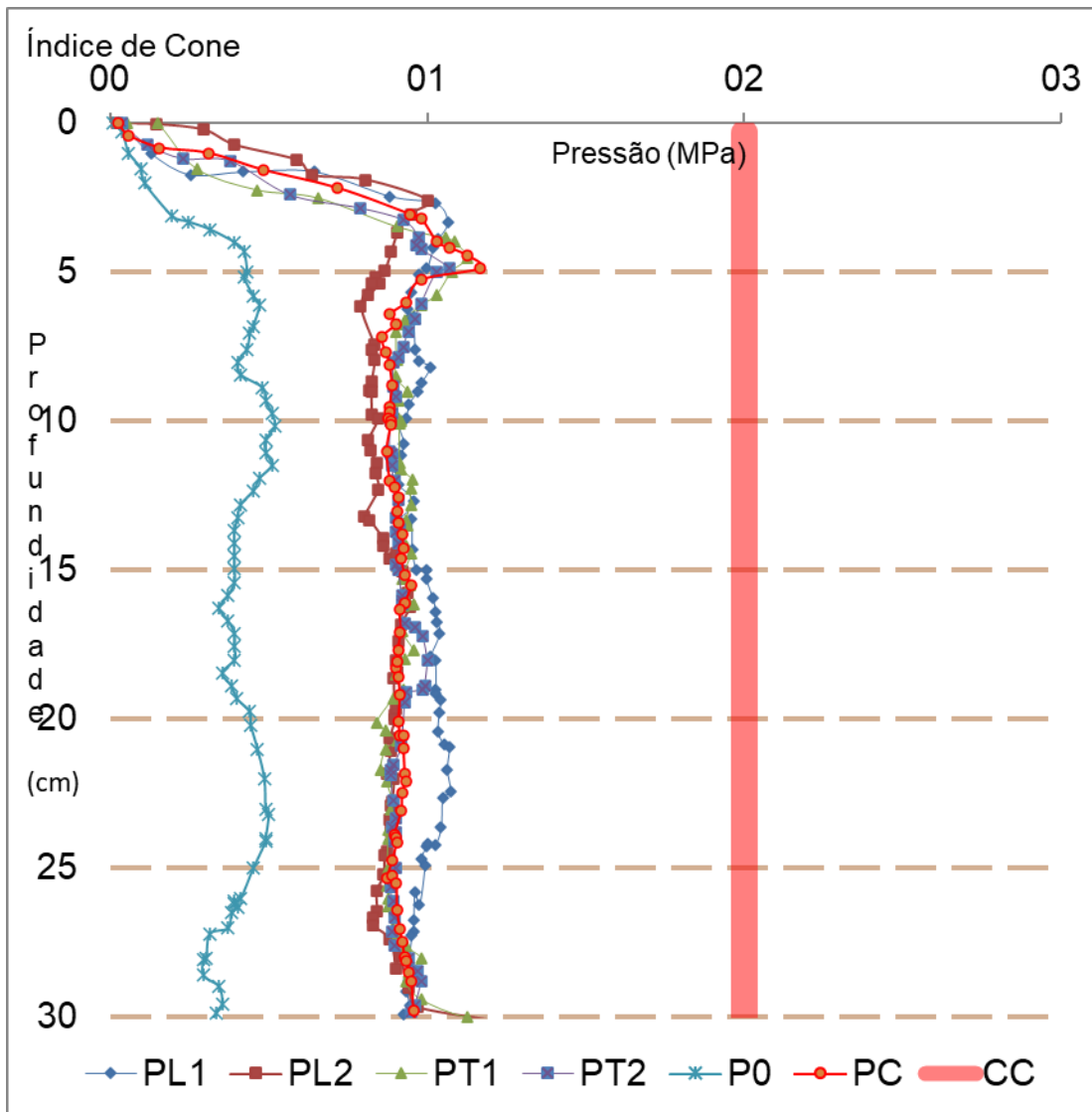


A impressão do pneu no tanque de solo resultou em um recalque médio de 0,76 m de largura, 0,72 m de comprimento e 0,07 m de profundidade. **A área de contato real foi de 0,44m², e a área total impactada foi de 0,69m².**

Mapa de isolinhas do recalque gerado pelo Pneu P2 600/50R22.5, sobre superfície de solo (S3) com cobertura vegetal (30Mg ha⁻¹ de palhiço de cana), com cortes de secção AA e BB.

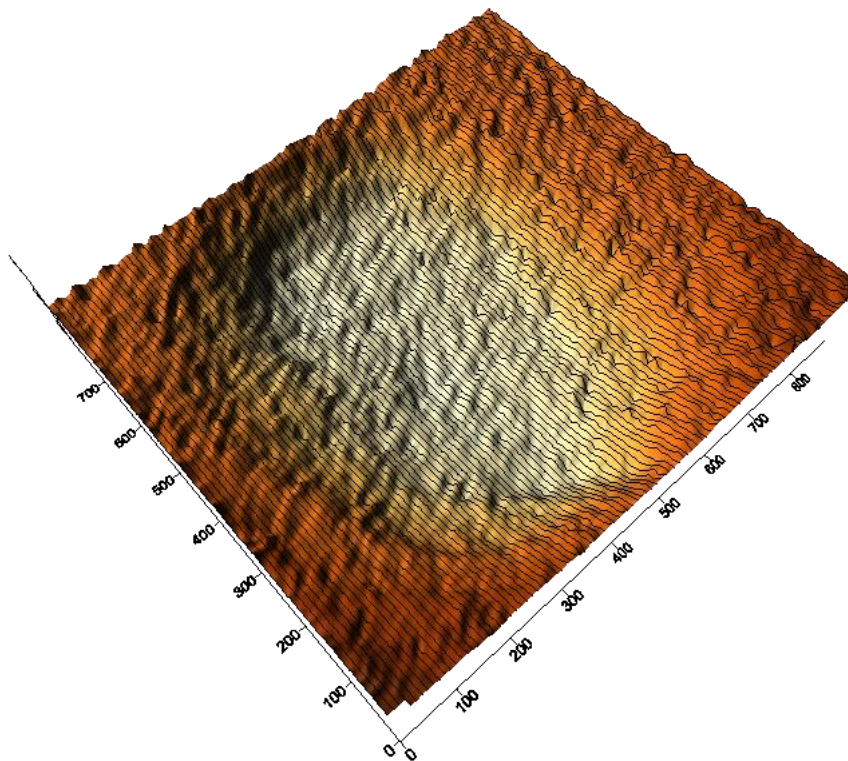


Índice de cone (IC), obtido no ensaio de resistência à penetração do solo com o Pneu P2 600/50R22.5, sobre superfície de solo (S3) com cobertura vegetal (30Mg ha⁻¹ de palhico de cana).

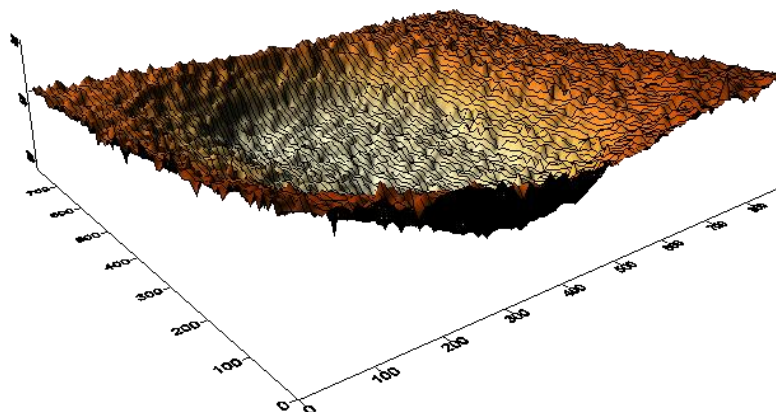


P0: Ponto de controle; PC: ponto central; PL1: Ponto longitudinal 1; PL2: Ponto longitudinal 2; PT1: Ponto transversal 1 e PT2: Ponto transversal 2; CC: Ponto de referência para compactação do solo (2,0MPa).

Mapa tridimensional do recalque ocasionado pelo Pneu P2 600/50R22.5, sobre superfície de solo (S3) com cobertura vegetal (30Mg ha⁻¹ de palhiço de cana)

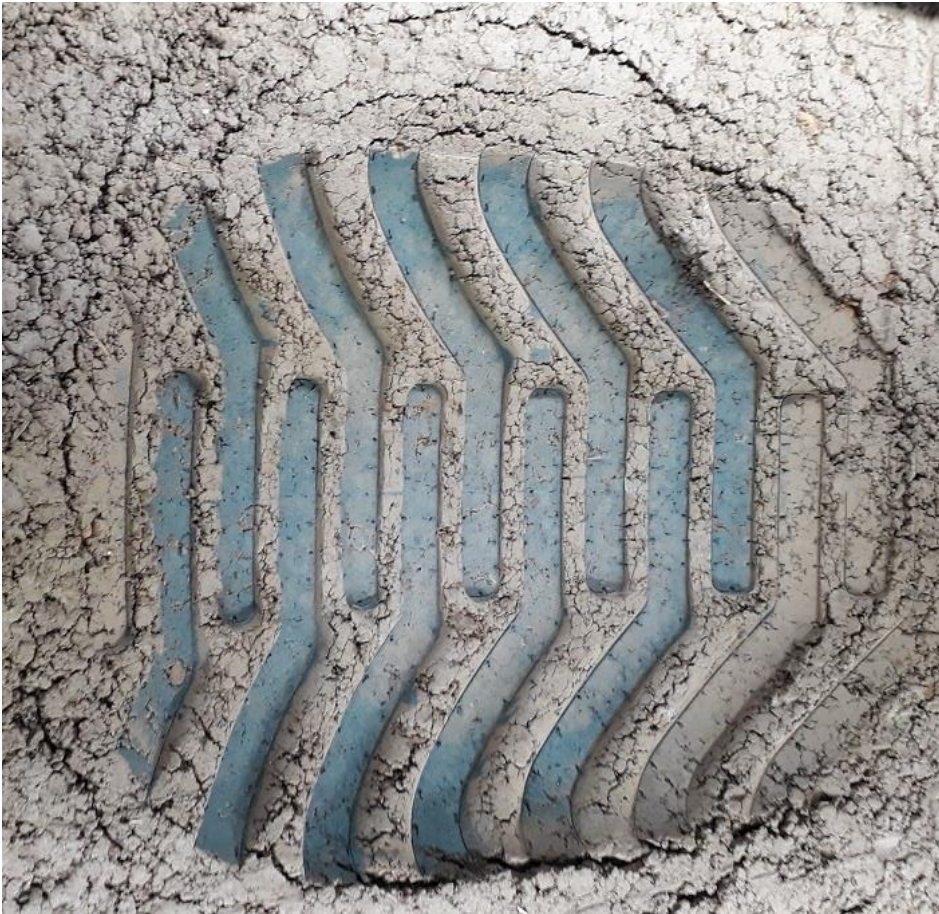


Mapa de secção transversal e longitudinal do recalque ocasionado pelo Pneu P2 600/50R22.5, sobre superfície de solo (S3) com cobertura vegetal (30Mg ha⁻¹ de palhiço de cana)



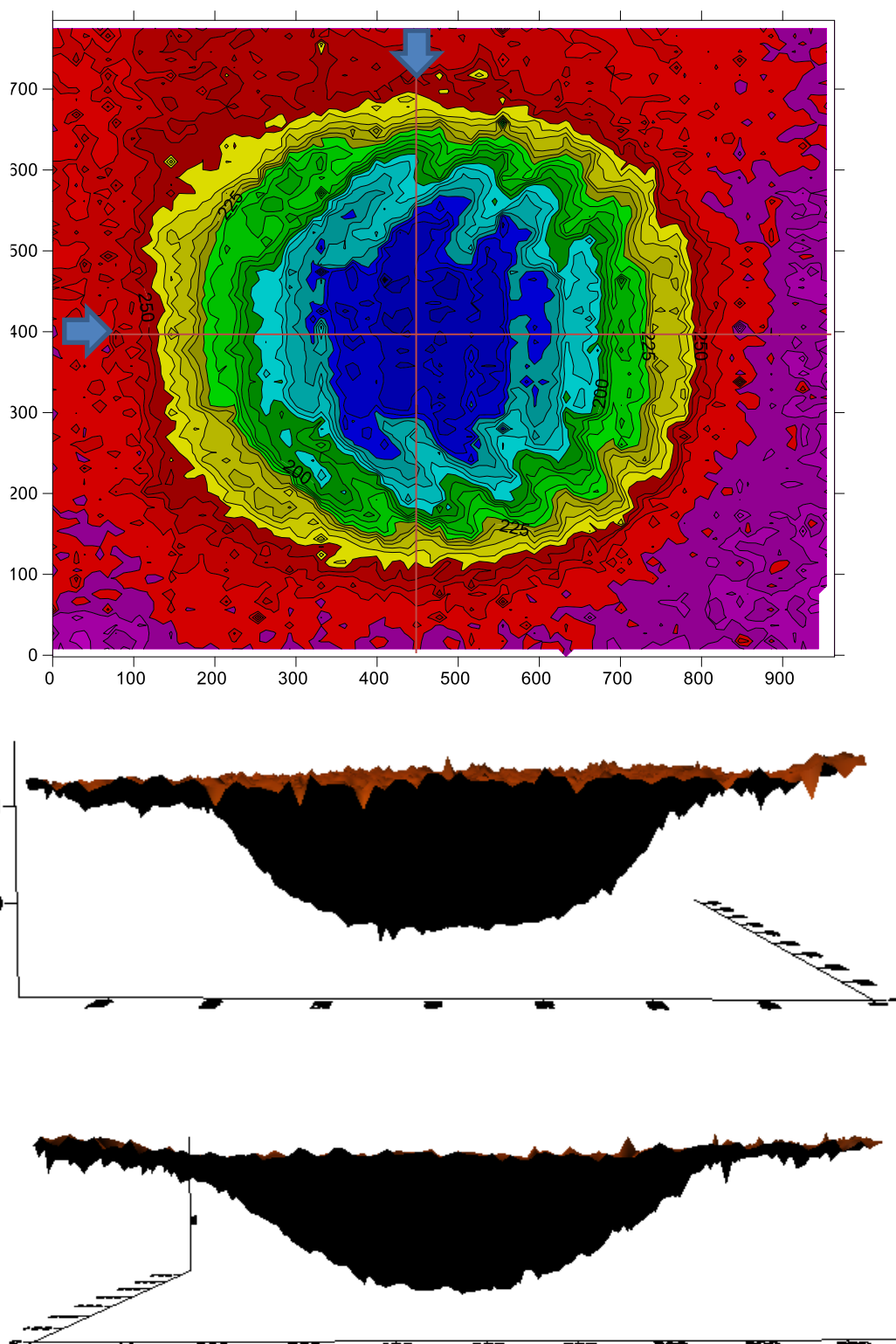
APÊNDICE G - Resultados das análises em superfície deformável para o pneu P3 600/50-22.5 em solo sem cobertura vegetal

Recalque do pneu P3 600/50-22.5 em ensaio de superfície deformável sobre solo sem a presença de cobertura vegetal – superfície S1.

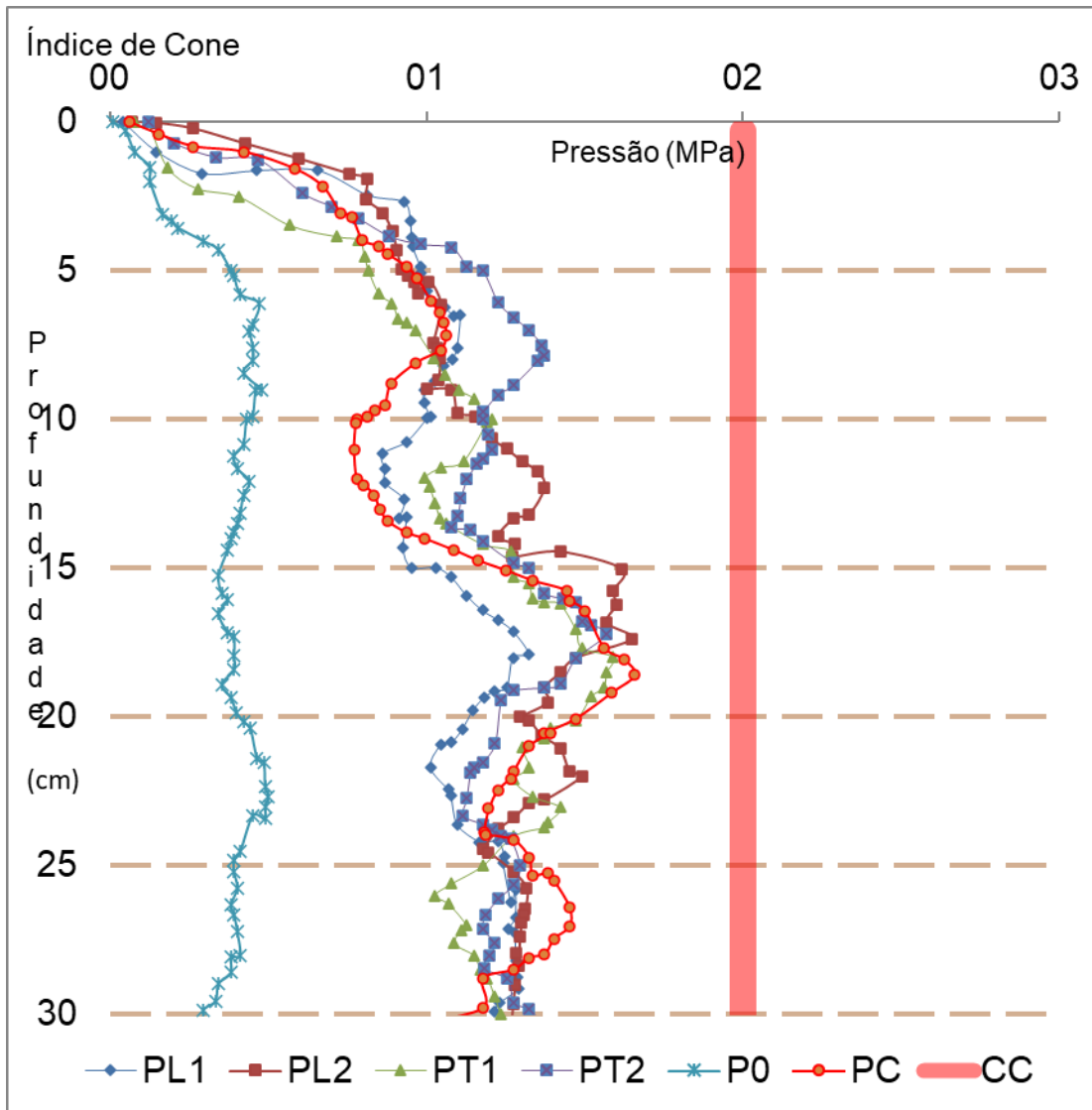


A impressão do pneu no tanque de solo resultou em um recalque médio de 0,59 m de largura, 0,68 m de comprimento e 0,11 m de profundidade. **A área de contato real foi de 0,33m², e a área total impactada foi de 0,44m².**

Mapa de isolinhas do recalque gerado pelo Pneu P3 600/50-22.5, sem a presença de cobertura vegetal (S1), com cortes de secção AA e BB.

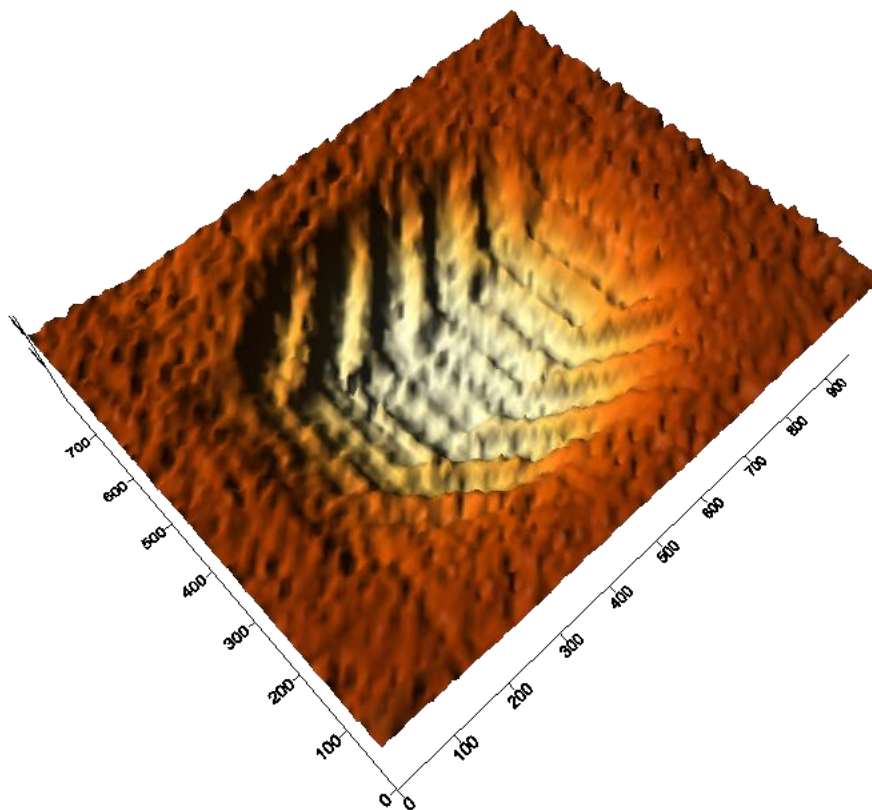


Índice de cone (IC), obtido no ensaio de resistência à penetração do solo com o Pneu P3 600/50-22.5, em solo sem a presença de cobertura vegetal (S1).

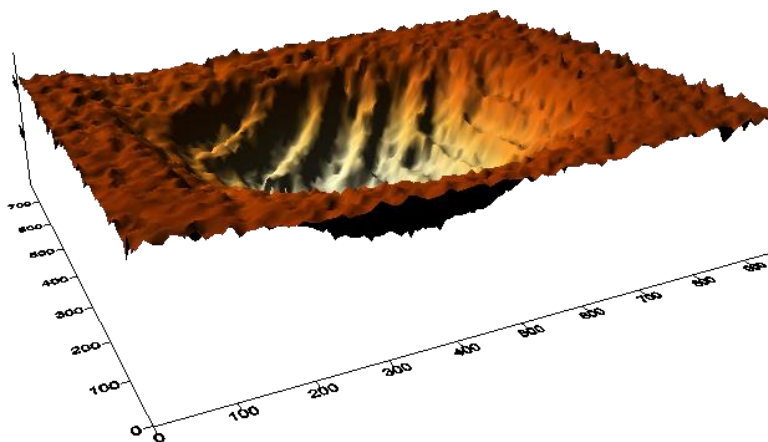


P0: Ponto de controle; PC: ponto central; PL1: Ponto longitudinal 1; PL2: Ponto longitudinal 2; PT1: Ponto transversal 1 e PT2: Ponto transversal 2; CC: Ponto de referência para compactação do solo (2,0MPa).

Mapa tridimensional do recalque ocasionado pelo Pneu P3 600/50-22.5, em solo sem a presença de cobertura vegetal (S1)



Mapa de secção transversal e longitudinal do recalque ocasionado pelo Pneu P3 600/50-22.5, em solo sem a presença de cobertura vegetal (S1)



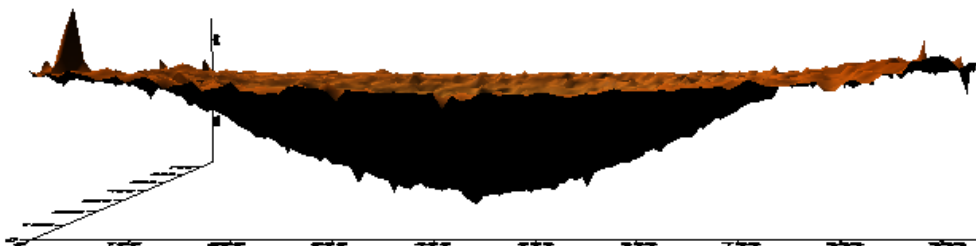
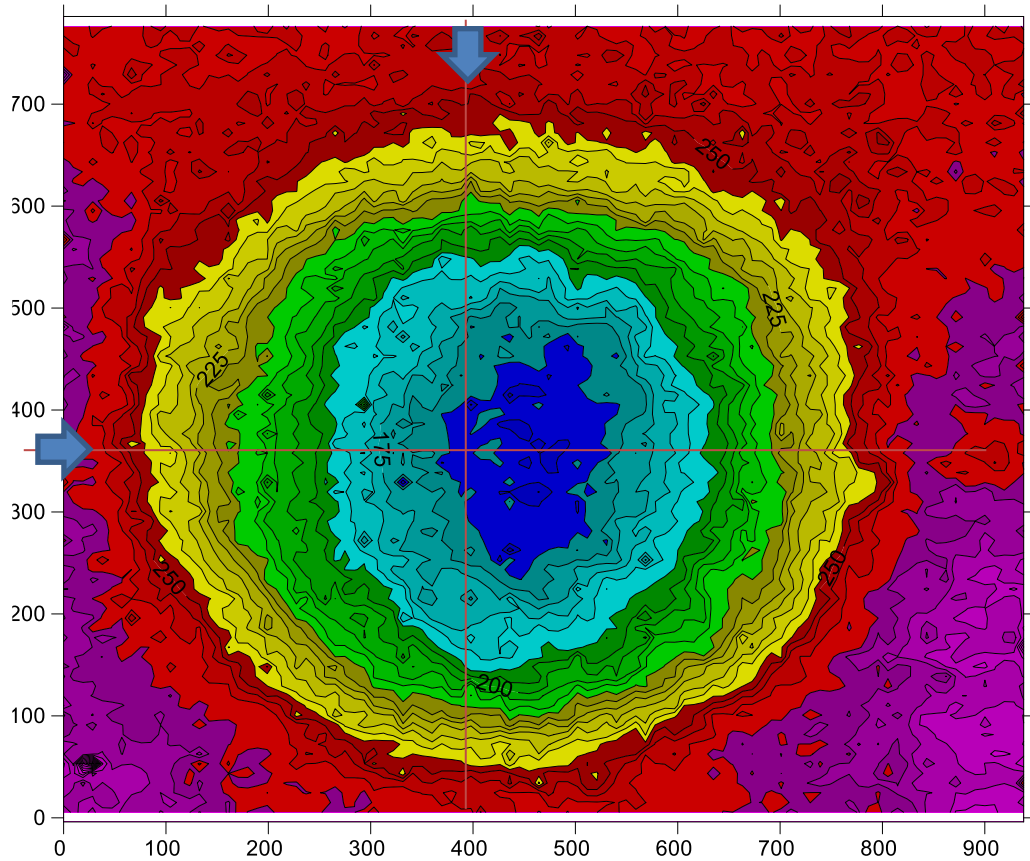
APÊNDICE H - Resultados das análises em superfície deformável para o pneu P3 600/50-22.5 em solo com 15Mg ha⁻¹ de palhiço de cana em cobertura

Recalque do pneu P3 600/50-22.5 em ensaio de superfície deformável, sobre superfície de solo (S2) com cobertura vegetal (15Mg ha⁻¹ de palhiço de cana).

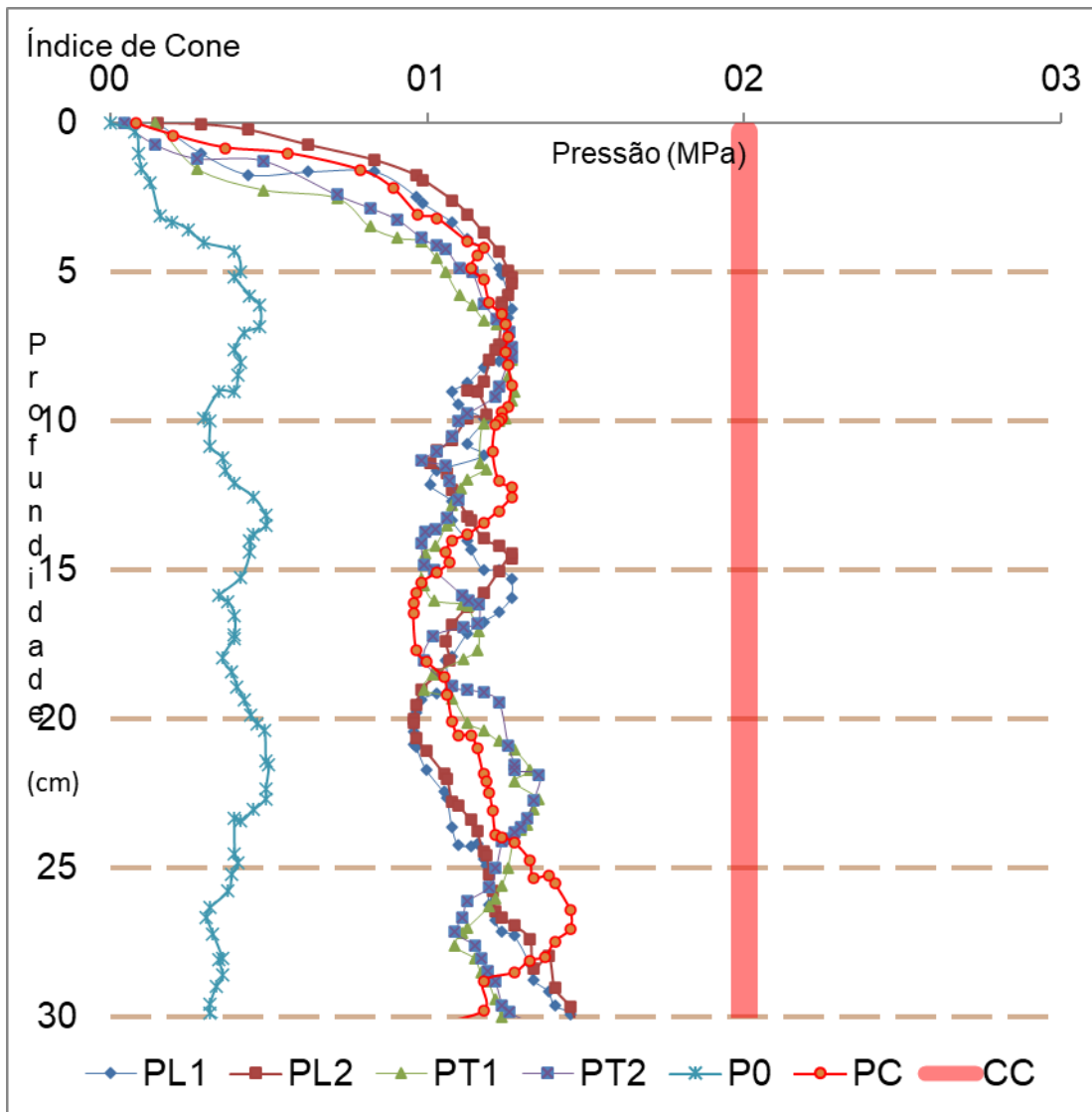


A impressão do pneu no tanque de solo resultou em um recalque médio de 0,64m de largura, 0,72 m de comprimento e 0,10m de profundidade. **A área de contato real foi de 0,36m², e a área total impactada foi de 0,48m².**

Mapa de isolinhas do recalque gerado pelo Pneu P3 600/50-22.5, sobre superfície de solo (S2) com cobertura vegetal (15Mg ha⁻¹ de palhiço de cana), com cortes de secção AA e BB.

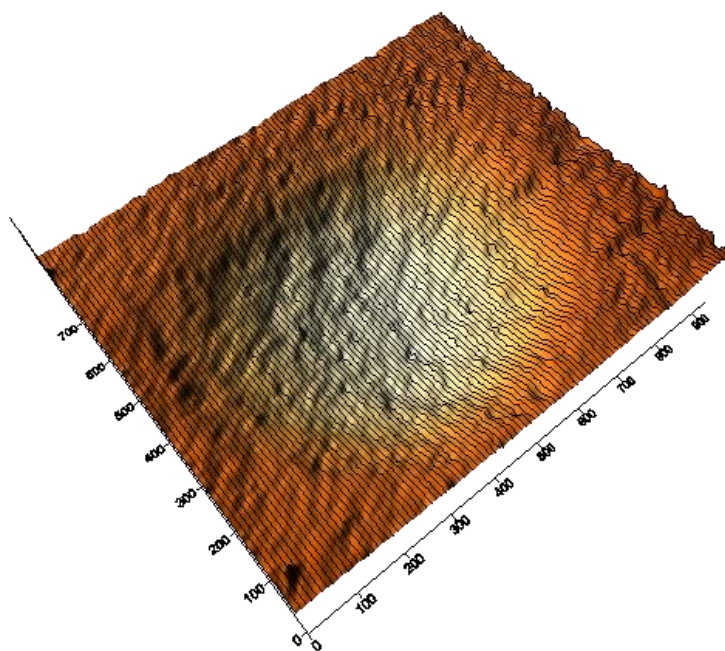


Índice de cone (IC), obtido no ensaio de resistência à penetração do solo com o Pneu P3 600/50-22.5, sobre superfície de solo (S2) com cobertura vegetal (15Mg ha⁻¹ de palhico de cana).

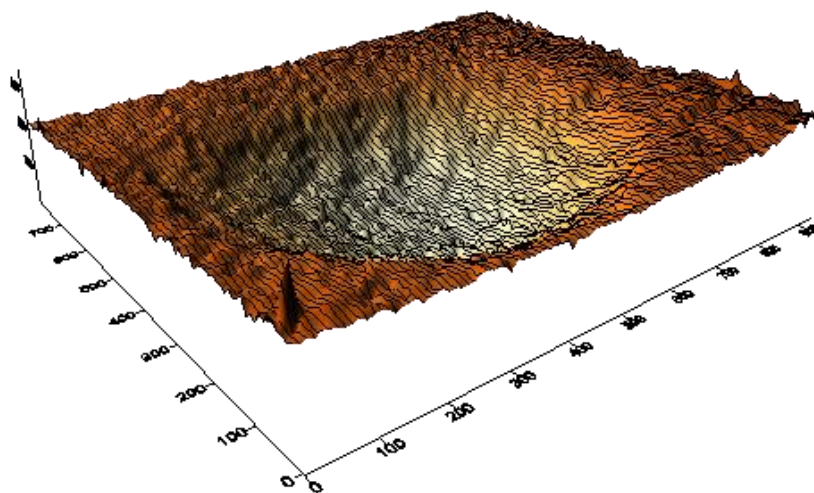


P0: Ponto de controle; PC: ponto central; PL1: Ponto longitudinal 1; PL2: Ponto longitudinal 2; PT1: Ponto transversal 1 e PT2: Ponto transversal 2; CC: Ponto de referência para compactação do solo (2,0MPa).

Mapa tridimensional do recalque ocasionado pelo Pneu P3 600/50-22.5, sobre superfície de solo (S2) com cobertura vegetal (15Mg ha⁻¹ de palhiço de cana)



Mapa de secção transversal e longitudinal do recalque ocasionado pelo Pneu P3 600/50-22.5, sobre superfície de solo (S2) com cobertura vegetal (15Mg ha⁻¹ de palhiço de cana)



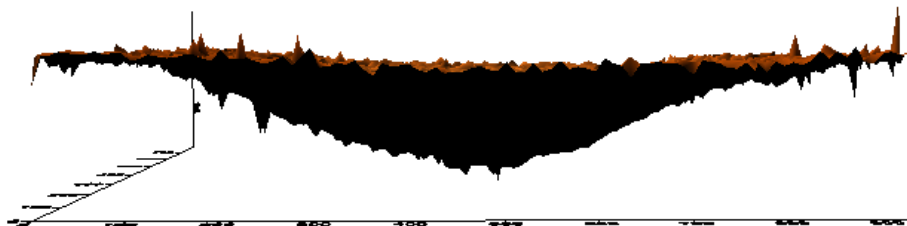
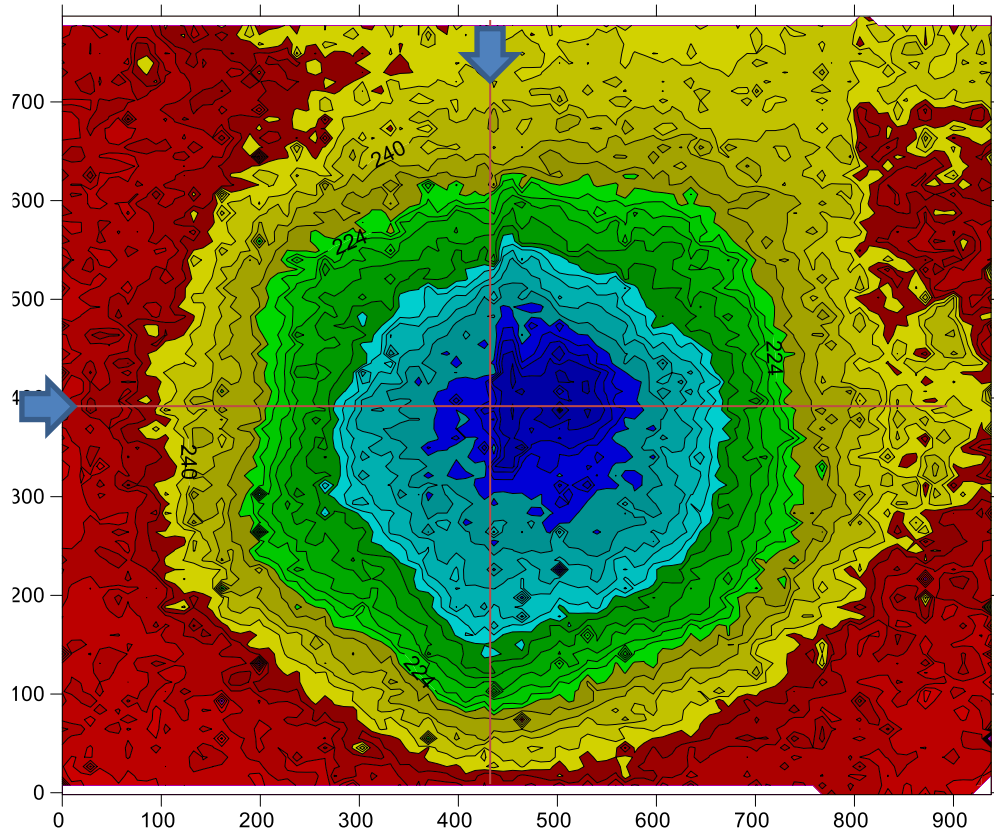
APÊNDICE I - Resultados das análises em superfície deformável para o pneu P3 600/50-22.5 em solo com 30Mg ha⁻¹ de palhiço de cana em cobertura

Pneu P3 600/50-22.5 em ensaio de superfície deformável, sobre superfície de solo (S3) com cobertura vegetal (30Mg ha⁻¹ de palhiço de cana).

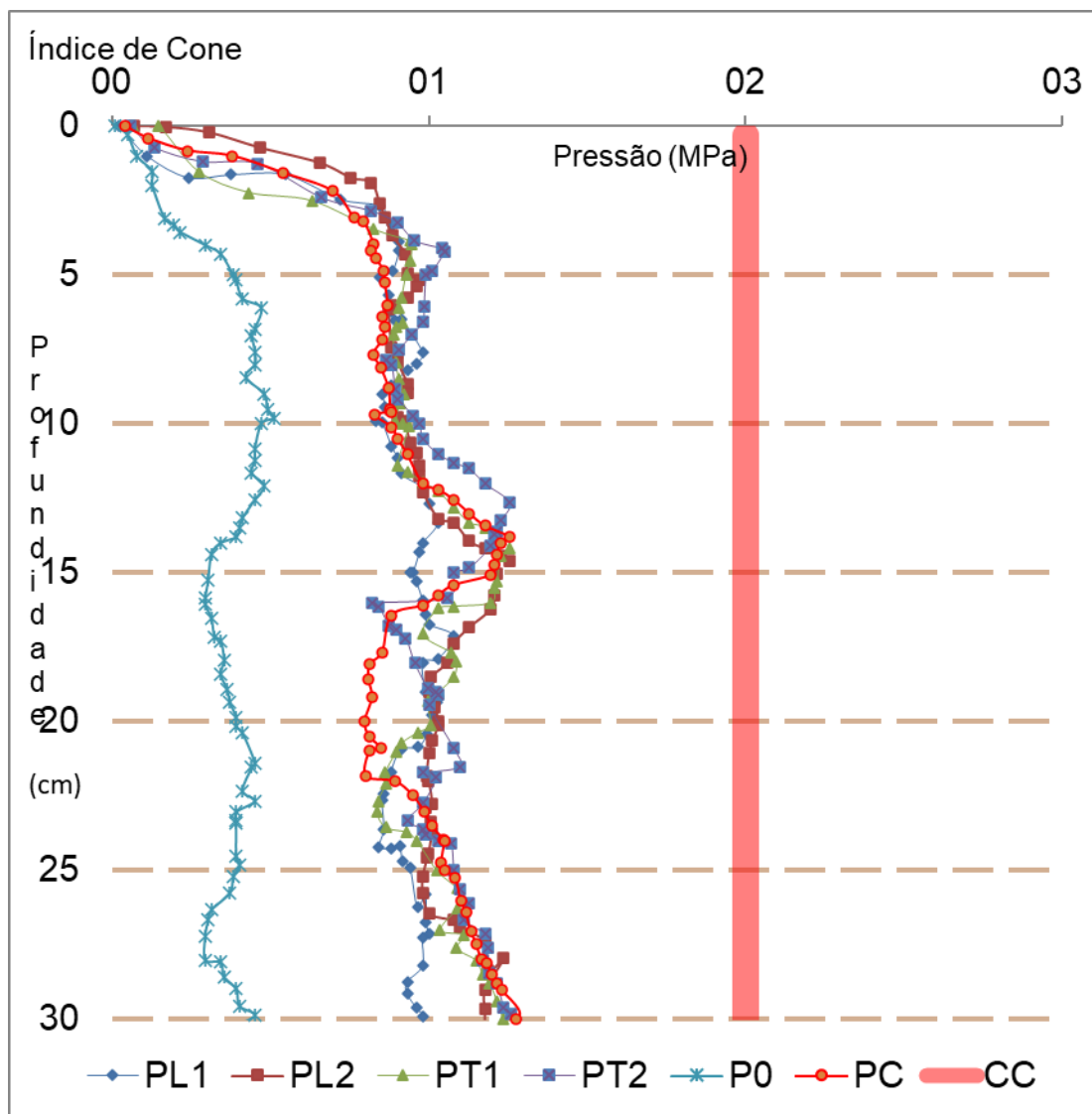


A impressão do pneu no tanque de solo resultou em um recalque médio de 0,66m de largura, 0,73 m de comprimento e 0,09m de profundidade. **A área de contato real foi de 0,38m², e a área total impactada foi de 0,54m².**

Mapa de isolinhas do recalque gerado pelo Pneu P3 600/50-22.5, sobre superfície de solo (S3) com cobertura vegetal (30Mg ha⁻¹ de palhiço de cana), com cortes de secção AA e BB.

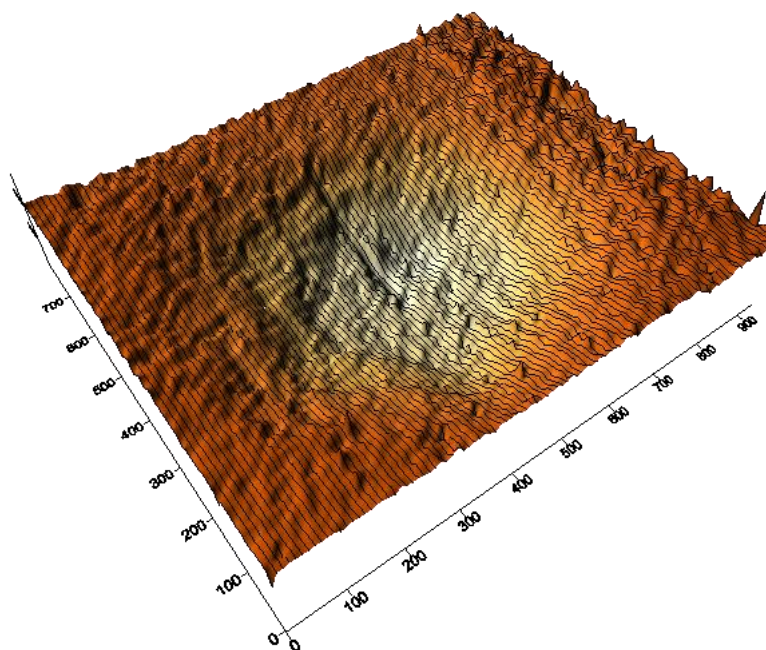


Índice de cone (IC), obtido no ensaio de resistência à penetração do solo com o Pneu P3 600/50-22.5, sobre superfície de solo (S3) com cobertura vegetal (30Mg ha⁻¹ de palhico de cana).



P0: Ponto de controle; PC: ponto central; PL1: Ponto longitudinal 1; PL2: Ponto longitudinal 2; PT1: Ponto transversal 1 e PT2: Ponto transversal 2; CC: Ponto de referência para compactação do solo (2,0MPa).

Mapa tridimensional do recalque ocasionado pelo Pneu P3 600/50-22.5, sobre superfície de solo (S3) com cobertura vegetal (30Mg ha⁻¹ de palhiço de cana)



Mapa de secção transversal e longitudinal do recalque ocasionado pelo Pneu P3 600/50-22.5, sobre superfície de solo (S3) com cobertura vegetal (30Mg ha⁻¹ de palhiço de cana)

