



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO

PRÓ REITORIA DE PÓS GRADUAÇÃO

Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola



MODELAGEM DA TENSÃO APLICADA NO MODELO PSEUDO-ANALÍTICO NA
COLHEITA MECANIZADA DA CANA-DE-AÇÚCAR

TALITA XAVIER GOUVEIA

RECIFE, 2023



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PRÓ REITORIA DE PÓS GRADUAÇÃO
Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola



TALITA XAVIER GOUVEIA

**MODELAGEM DA TENSÃO APLICADA NO MODELO PSEUDO-ANALÍTICO
NA COLHEITA MECANIZADA DA CANA-DE-AÇÚCAR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco como parte dos requisitos para grau de Mestre em Engenharia agrícola.

Orientador:

Prof. Dr. Mario Monteiro Rolim

Co-Orientador: Dr. Renato Paiva de Lima

Recife-PE

MAIO, 2023

G719m

Gouveia, Talita Xavier

MODELAGEM DA TENSÃO APLICADA NO MODELO PSEUDO-ANALÍTICO NA COLHEITA
MECANIZADA DA CANA-DE-AÇÚCAR / Talita Xavier Gouveia. - 2023.
37 f. : il.

Orientador: Mario Monteiro Rolim.
Coorientador: Mario Monteiro Rolim.
Inclui referências e anexo(s).

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Agrícola, Recife, 2024.

1. modelos de compactação. 2. tratores agrícolas. 3. veículo transbordo. 4. tensão no solo. I. Rolim, Mario Monteiro,
orient. II. Rolim, Mario Monteiro, coorient. III. Título

SUMÁRIO

DECIDATÓRIA	4
AGRADECIMENTOS	5
LISTA DE FIGURAS	6
LISTA DE TABELA	7
RESUMO	8
ABSTRACT	9
1. INTRODUÇÃO	10
2. REVISÃO DE LITERATURA	12
2.1 Sistema de plantio e colheita	12
2.2 Máquinas e Implementos Agrícolas	13
2.3 Compactação	14
2.4 Modelos de Compactação	16
2.5 Área de contato	17
2.6 Tensões no solo	18
2.7 Modelagem+	20
3. OBJETIVOS	21
3.1 Objetivo geral	21
3.2 Objetivo específico	21
4. MATERIAL E MÉTODOS	21
4.1 Maquinário utilizado na simulação	21
4.2 Modelagem	24
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	25
6 CONCLUSÕES	31
7. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	32

DECIDATÓRIA

Dedico, a minha primeira professora, minha avó, Maria Barros Xavier (*in memoriam*) e aos meus pais Flávia Xavier Gouveia e André Ikamaan Gouveia os meus maiores incentivadores nos estudos. Sem vocês eu não estaria aqui e sou extremamente grata por todos os sacrifícios que fizeram em prol da minha educação e dos meus irmãos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus e toda a espiritualidade amiga, que até aqui me ajudou e fortaleceu.

Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE)

Ao Programa de Engenharia em Agrícola (PGEA)

A Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES)

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)

Em especial, aos meus pais, Flávia e André, que muito me incentivaram e acolheram quando foi necessário! Aos meus irmãos, Tatiana e Pedro! Ao meu namorado, João Victor, que tanto me ajudou e incentivou!

As minhas queridas amigas, que nos tempos difíceis se apresentaram para me dar a mão e me ajudar, o meu muito obrigada, Kátia Ribeiro, Beatriz Gomes, Juliana Medeiros, Raíssa Rattes!

Ao Prof. Dr. Mário Monteiro Rolim, pela paciência e dedicação em me orientar.

Aos professores do Programa, que me auxiliaram nessa jornada.

Aos meus colegas e amigos do Laboratório de Mecânica dos Solos e Aproveitamento de Resíduos, pela boa convivência e trocas realizadas Roberta, Raíssa, Denilson, Juez, Ana Paula, Evanilson, Eloyse e Brenda.

A todos os meus amigos e familiares, que contribuíram de forma direta ou indireta, para que eu chegasse até aqui, meu muito obrigada.

E a toda espiritualidade amiga que me fortaleceu e protegeu para eu conseguir chegar aos meus objetivos.

A todos, o meu muito obrigada!

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Gráfico de compactação.....	14
Figura 2: . Completo estado de tensão agindo sobre um corpo cubo infinitesimal (Keller, 2004; Lima, 2017).	19
Figura 3: a) Os nove componentes da matriz tensor tensão, no completo estado de tensão do solo, que envolve as tensões principais e de cisalhamento. b) o estado de tensão de um corpo submetido a ação isotrópica normal, livre de tensão de cisalhamento. Adaptado de (KOOLEN & KIUPERS, 1983; LIMA, 2017).....	19
Figura 4: Trator Valtra BH 180	22
Figura 5: Trator New Holland T7 SWB 205	22
Figura 6: Transbordo TMA VTX 2410	23
Figura 7: Trator 1 - Valtra BH 180.....	26
Figura 8: Trator 2 - New Holland T7 SWB.....	27
Figura 9: Transbordo TMA VTX 2410	27
Figura 10: Tensão máxima vertical aplicada aos solos, através do pneu dianteiro dos tratores	29
Figura 11: Tensão máxima vertical aplicada aos solos, através do pneu traseiro dos tratores	29
Figura 12: Tensão máxima vertical aplicada aos solos, através do pneu dos tratores e do transbordo	30
Figura 13: Tensão máxima vertical aplicada aos solos, através do pneu dos tratores.....	31

LISTA DE TABELA

<u>Tabela 1: Formas e funções de distribuição de tensão sobre a área de contato pneu solo. Adaptado de Keller et al., 2007; Lima, 2017</u>	17
<u>Tabela 2: Divisão da carga total por eixo</u>	23
<u>Tabela 3 Referência dos pneus para cada veículo</u>	23
<u>Tabela 4: Pressão de insuflagem em kPa para os veículos agrícolas</u>	24
<u>Tabela 5: Parâmetros máquina-pneu dos tratores e transbordos utilizados na simulação</u> ...	25
<u>Tabela 6:Tensão máxima gerada na distribuição da área de contato ($\sigma_{\text{máx}}$) resultados da simulação, de acordo com as especificações de cada pneu, dos veículos avaliados.</u>	28

RESUMO

A produção de cana-de-açúcar no país é favorecida pelas condições edafoclimáticas, tornando assim, o Brasil reconhecido mundialmente por ser líder na produção. Com a necessidade de manter a demanda alimentar mundial se fez necessário a inserção de tecnologia no campo. Partindo desta demanda foi inserido maquinários que auxiliam na plantação e na colheita, otimizando e agilizando os processos agrícolas da cana-de-açúcar. O tráfego agrícola se tornou intenso e conseqüentemente acarretou alguns problemas, como o aumento de densidade dos solos, diminuição da microporosidade e da macroporosidade o que vem a limitar a passagem de ar e água no solo, aumento da resistência à penetração, que dificulta o crescimento das raízes das culturas. Este trabalho tem como objetivo avaliar as tensões transmitidas ao solo por dois tratores e um transbordo, utilizados na colheita mecanizada, através da modelagem pseudo-analítica. A modelagem de dados foi realizada com o auxílio do software PredComp 1.0, com o uso do modelo SoilFlex, através de informações dos catálogos das máquinas utilizadas para a simulação. Foi possível evidenciar as diferenças que as configurações de rodado proporcionaram na transmissão de tensões solo-pneu, com mesmo modelo de pneu com diferentes cargas e como as tensões podem sofrer modificações pelas pressões de insuflagem.

Palavras chave: modelos de compactação, tratores agrícolas, veículo transbordo, tensão no solo

ABSTRACT

Sugarcane production in the country is favored by edaphoclimatic conditions, making Brazil globally recognized as a leader in production. With the need to maintain global food demand, the insertion of technology in the field became necessary. To meet this demand, machinery was introduced to assist in planting and harvesting, optimizing and streamlining sugarcane agricultural processes. Agricultural traffic has become intense, resulting in some problems such as increased soil density, decreased microporosity and macroporosity, limiting the passage of air and water in the soil, increased resistance to penetration, which hinders crop root growth. This study aims to evaluate the stresses transmitted to the soil by two tractors and a transbord, used in mechanized harvesting, through pseudo-analytical modeling. The data modeling was carried out with the assistance of PredComp 1.0 software, using the SoilFlex model, through information from the catalogs of the machines used for simulation. It was possible to show the differences that wheel configurations provided in the transmission of soil-tire stresses, with the same tire model with different loads, and how stresses can be modified by inflation pressures.

Keywords: compaction, agricultural machinery, vertical stress

1. INTRODUÇÃO

A produção de cana-de-açúcar no Brasil vem desde o período colonial e possui grande importância no setor econômico nacional. As condições edafoclimáticas do país tornam a produção de cana-de-açúcar favorável, vindo a ser um dos participantes ativos na comercialização mundial. Segundo a CONAB (2018), o Brasil ocupa o primeiro lugar na escala mundial da produção de cana-de-açúcar, sendo reconhecido mundialmente por ser líder na capacidade produtiva.

Com a expansão da fronteira agrícola, tem se observado um aumento de maquinário no campo para realizarem o manejo, plantio e colheita de culturas. A chegada das máquinas agrícolas nas lavouras vem ganhando grandes proporções, com a finalidade de otimizar e agilizar os processos agrícolas da cana-de-açúcar. A introdução das máquinas no campo, vem ganhando crescimento exponencial, pois se faz necessário aperfeiçoar os processos agrícolas; junto aos benefícios há as desvantagens que estão atreladas as propriedades físicas do solo, ocasionando o aumento de risco de compactação.

O tráfego agrícola intenso gera aumento na densidade do solo, bem como limita o transporte de ar, água, penetração das raízes, ciclagem de nutrientes, reduzindo a produção agrícola e/ou florestal e a biota do solo (FAO, 2015). Os modernos sistemas de produção, podem resultar em compactação no solo, conforme relatado por Guimarães Júnnyor et al. (2019). Na atualidade é necessário que as máquinas agrícolas estejam em campo, pois a demanda alimentar que a população mundial carece é alta para uma subsistência sem auxílio mecânico.

Os modelos de compactação do solo servem para auxiliar no manejo adequado do solo, pois com a utilização da modelagem dos dados é possível monitorar e controlar os processos nos solos agrícolas. Com a utilização destas ferramentas é possível estimar e verificar as consequências que o efeito dos maquinários poderá causar naquele solo; podendo assim planejar estratégias para um manejo de solo, onde possa evitar os efeitos negativos.

O modelo Soilflex desenvolvido por Keller (2007), inclui diferentes abordagens para caracterização da relação tensão-deformação, através dos parâmetros de pneus, carga por eixo/roda e pressão de insuflagem. O modelo possibilita realizar uma comparação direta entre a relação tensão-deformação; ainda permite simular a passagem de diversas combinações de máquinas (diferentes tipos de rodados) e bem como diferentes combinações de rodas (rodas simples, duplas e tandem). O modelo também tem a função de estimar área

de contato e as tensões de contato através das características do pneu e de carga. Sendo assim, um modelo prático de uso, que pode ser usado por consultores agrícolas, rapidamente, trazendo respostas em tempo hábil.

O trabalho tem como objetivo avaliar as tensões verticais transmitidas ao solo, através de dois tratores (Valtra BH 180 e New Holland T7 SWB 205) e um transbordo (TMA VTX - 2410), em suas capacidades máximas de carga e em condições ótimas de transporte. Assim sendo possível avaliar, através da modelagem pseudo-analítica qual dos três maquinários avaliados impactam mais o solo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Sistema de plantio e colheita

A cultura da cana-de-açúcar é de grande relevância para o país, sendo que o momento da colheita é decisivo para a determinação da produção efetiva dos canaviais, uma vez que representa o encerramento do ciclo de cultivo, quando a cultura atinge seu potencial máximo de produção agrícola.

Segundo Embrapa (2022), no sistema convencional de preparo do solo geralmente são realizadas as seguintes operações: uma aração ou gradagem pesada; uma subsolagem ou mais uma gradagem; uma gradagem de destorroamento e uma gradagem de nivelamento. A utilização desse tipo de preparo do solo no decorrer de anos acaba os tornando suscetíveis ao processo erosivo. Segundo Arcoverde et al. (2019), as sucessivas operações mecanizadas do preparo do solo até a colheita, resultam em problemas de degradação do solo, sendo o principal a compactação (SILVA; CASTRO 2015; MARASCA et al., 2015; VISCHI FILHO et al., 2015), que pode afetar a produção e a longevidade do canavial (CAMILOTTI et al., 2005; FAGUNDES et al., 2014), bem como a área explorada pelo sistema radicular (BAQUERO et al., 2012; MARASCA et al., 2015).

Os procedimentos de colheita de cana-de-açúcar foram classificados, da seguinte forma:

- Sistema manual – onde o corte e o carregamento são realizados manualmente, podendo ocorrer de ter um transporte intermediário.
- Sistema semi-mecanizado – onde ocorre o corte manual, carregamento e transporte é feito através de maquinários agrícolas.
- Sistema mecanizado – onde ocorre o corte, carregamento e transporte de formas mecânicas, com apenas uso de profissionais especializados em conduzir os maquinários.

A colheita da cana-de-açúcar ao longo dos últimos anos vem sofrendo mudanças em seu processo. Em algumas regiões do país há legislações que proíbem o uso da queima da cana-de-açúcar, por questões de saúde pública. Segundo Conab (2018), o corte de cana manual vem sofrendo grande decréscimo em sua prática, onde saiu de 75,6% em sua produção total na safra de 2007/2008, passando para 8,4% na safra 2018/2019. Em contrapartida a colheita da cana-de-açúcar através do sistema mecanizado, está cada vez mais presente nos campos. Atualmente, de acordo com os dados da Conab (2018), o sistema de colheita mecanizada passou de 24,4% na safra de 2007/2008, para 91,6% na safra de 2018/2019.

2.2 Máquinas e Implementos Agrícolas

A teoria Malthusiana, que foi desenvolvida por Thomas Robert Malthus, em 1798, é uma teoria que tinha como objetivo alertar a população mundial sobre a grande problemática da falta de recursos naturais advindo do crescimento populacional, pois a população cresce em progressão geométrica e os recursos naturais em progressão aritmética. Com isso ele fez o alerta a população, onde em pouco tempo a população seria grande o suficiente para não haver alimentos para todos, em sua teoria, ele estimou 200 anos para acontecer este colapso.

Por outro lado, ocorriam o surgimento das revoluções industriais, que propiciaram uma significativa ampliação na produtividade. Segundo Vian et al. (2013), após a Segunda Guerra Mundial houve a inserção de tecnologias nos veículos agrícolas, chegando com novos modelos maiores e mais potentes. A mecanização agrícola, apresenta como principal objetivo o aumento de produtividade, deixando de ser uma opção e se tornou regra para assim, poder dar conta da demanda alimentar da população mundial.

De acordo com Magro (2018), na atualidade é imprescindível que exista a mecanização dos campos, por conta da necessidade de produção em grande escala e que estudos sejam desenvolvidos para minimizar as desvantagens do uso de implementos agrícolas. A utilização de maquinários agrícolas no campo pode trazer vantagens e desvantagens.

Como desvantagens pode citar a compactação do solo (através de maquinários mais pesados); alto preço na aquisição de maquinário; e requer mão de obra especializada, despesas com lubrificantes e combustíveis; necessidade de assistência técnica especializada nas proximidades.

Como vantagens temos o atendimento da demanda atual alimentícia, com o aumento de produção; redução da mão de obra; redução de custos de produção; eficiência da operação e eficácia da produção; maior desenvolvimento tecnológico no campo; expansão sustentável da fronteira agrícola

2.3 Compactação

O termo compactação do solo refere-se ao processo que descreve o decréscimo de volume de solo não saturado quando uma determinada força externa é aplicada, a qual pode ser causada pelo tráfego de máquinas agrícolas, equipamentos de transporte ou animais (RICHART et al., 2005; LIMA, 2004).

De acordo com Santos et al. (2020) os estudos de compactação do solo se iniciaram após a teoria elaborada por Ralph Proctor, em 1933, onde houve a divulgação de seu conhecimento e a constatação que a compactação está diretamente ligada ao teor de umidade que o solo apresente, mostrando a relação existente entre a massa específica aparente seca, teor de umidade e energia de compactação.

A padronização internacional do ensaio de compactação, com pequenas variações, baseou-se nos estudos de Proctor, sendo o mais conhecido como Ensaio de Proctor, podendo-se referir no Brasil, às Normas Técnicas NBR 7182/86 (ABNT, 1986) e DNER – ME 129/94 (DNER, 1994) (CRISPIM, 2007).

Existe a relação entre os parâmetros do solo onde o peso específico aparente seco (γ_d) e o teor de umidade (w) pode ser descrito através de uma curva com formato parabólico, como demonstrado na Figura 1, abaixo.

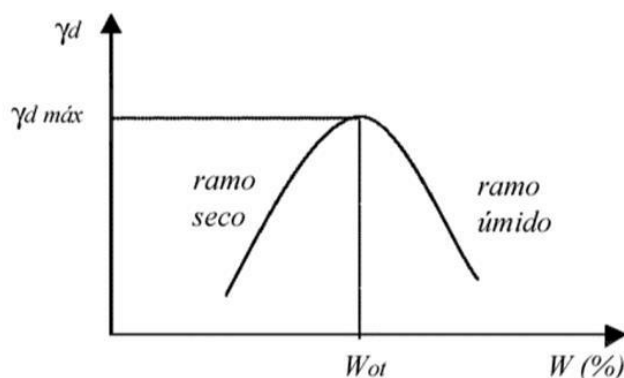


Figura 1. Relação da umidade e densidade seca máxima obtida do ensaio de compactação normal de Proctor.

Onde a curva possui o seu ponto de máximo definido pelo par de valores de peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{d\text{máx}}$) e a umidade ótima (W_{ot}). O trecho ascendente da curva de compactação é denominado de ramo seco e o descendente de ramo úmido.

As forças que atuam no solo podem ser classificadas em externas e internas. As forças causadoras da compactação podem ser externas, como o tráfego de veículos, animais ou pessoas e o crescimento de raízes, e internas, como umedecimento e secagem, expansão e contração do solo (REICHERT et al., 2007). Quando expressas como tensão essas forças provavelmente têm a mesma ação no sistema, não sendo necessária distinção entre elas (CAMARGO et al., 2008).

Com a necessidade de aumento de produção, veio o manejo inadequado do solo, com a utilização frequente e intenso de máquinas, operações em condições inadequadas, uso excessivo de maquinário pesado, ausência de práticas conservacionistas, o que vem a ser um mal uso, com uma má conservação, onde o solo tende a elevar os seus níveis de compactação e comprometer assim a sua estabilidade estrutural. A estrutura do solo está intimamente ligada ao seu sistema radicular, absorção de água e nutrientes e produtividade das culturas (CHERUBIM et al., 2017; ÇELIC et al., 2019; SILVA, 2021)

O risco de compactação em solo agrícola está sujeito as tensões mecânicas impostas pelo tráfego de veículos (ARVIDSSON et al., 2011), portanto conhecer a magnitude e a distribuição dessas tensões torna uma ferramenta útil nos estudos de compactação do solo (SCHJØNNING et al., 2008).

De acordo com Albert et al. (2018), a mecanização quando não controlada resulta na compactação e ocasiona falhas no rebrote da cana-de-açúcar, este seria uma das maiores problemáticas encontradas na agricultura moderna. O dimensionamento das atividades mecanizadas através da energia total aplicada no solo e o tráfego dos veículos na entrelinha do plantio, reduz o risco de compactação (KELLER et al., 2007; LOZANO et al., 2013; JIMENEZ, 2021) existindo assim, um melhor planejamento.

2.4 Modelos de Compactação

Os modelos de compactação são instrumentos relevantes empregados para aferir o grau de compactação do solo resultante do tráfego de máquinas agrícolas sobre sua estrutura. Por meio destes modelos, torna-se viável a elaboração de estratégias e recomendações específicas para prevenir a compactação do solo, permitindo orientar os produtores de forma mais eficiente.

De acordo com Defossez e Richards (2002), há duas categorias de modelos de compactação do solo relacionadas ao tráfego agrícola, que são os modelos analíticos e os numéricos. Os modelos analíticos estão fundamentados na teoria de Boussinesq (1985), que apresentou equações sobre a propagação de tensões no solo, considerando o solo homogêneo com deformação elástica linear. Fröhlich (1934) introduziu o fator de concentração(ξ) para casos em que as tensões no solo são mais concentradas abaixo do centro de carga, com a aplicação em um meio elástico. Desta forma, torna-se possível calcular a tensão e a

deformação, mediante a relação tensão-deformação. O modelo analítico, requer menos dados de entrada, mais fácil de trabalhar e apresentam resultados bastante satisfatórios.

Os modelos pseudo-analíticos são baseados na equação de Söhne (1953), que modela a distribuição de tensões na área de contato e calcula a tensão de pré-consolidação como tensão principal no solo. Esses modelos também incorporam uma adaptação da fórmula de Frohlich (1934), derivada da solução analítica da equação de Boussinesq (1885).

De acordo com Keller (2007), modelo SoilFlex possibilita uma comparação direta entre as relações tensão-deformação, permitindo a simulação da passagem de máquinas agrícolas, bem como a combinação de rodados com diferentes características. Além disso, o modelo possui uma função para estimar a área de contato com o solo. O SoilFlex apresenta facilidade de uso e agilidade, podendo ser uma ferramenta útil em campo.

Keller (2007) descreve como um modelo bidimensional, o modelo SoilFlex que calcula o estado de tensão, mudanças na densidade do solo e deslocamentos verticais no solo devido ao tráfego de campo agrícola. O modelo contém três componentes principais. Em primeiro lugar, é descrita a tensão na superfície; as tensões normais e de cisalhamento são consideradas. Em segundo lugar, a propagação de tensões através do solo é calculada analiticamente. Em terceiro lugar, a deformação do solo é calculada em função da tensão.

Os modelos numéricos permitem uma análise mais completa, se comparada aos modelos pseudo-analíticos, pois possuem uma abordagem física mais realista e com a possibilidade de se considerar geometrias, heterogeneidade e anisotropia, bem como diferentes situações de carregamento do solo (Silva et al., 2018).

De acordo com Alves Filho (2018) os modelos de elementos numéricos se utilizam da mecânica do contínuo, que consiste em estudar o movimento e a deformação distribuída de forma contínua, onde as tensões e deformações são calculadas ao mesmo tempo. Este tipo de modelo necessita de um maior número de dados de entrada para conseguir ser eficaz.

2.5 Área de contato

O termo "área de contato" refere-se à parte da roda ou pneu que está em contato com a superfície do solo, e pode ser classificada em dinâmica e estática. "Área de contato dinâmica" é a interface pneu-solo, quando há um carregamento dinâmico, ou seja, em 4 movimento (SANDU et al., 2019). A "Área de contato estática" é a superfície de contato

entre o pneu e uma peça rígida ou superfície deformável, quando o pneu é carregado estaticamente, sem estar em movimento (THORPE, 2022).

A área de contato está diretamente relacionada com a carga por roda e a pressão de insuflagem do pneu (O’SULLIVAN et al., 1999; KELLER et al., 2007; DISERENS, 2009; LOZANO, 2012). Uma correta predição da área de contato é uma das bases sobre as quais se constroem os modelos de compactação dos solos agrícolas.

De acordo com Lima (2017), atualmente existem diversos meios de estimativas e distribuição de tensão sobre a área de contato, resultados da evolução dos modelos, os quais consideram tanto a tensão vertical, como a tensão horizontal (Keller et al., 2007). Na Tabela 1, é apresentado as formas mais utilizadas para descrever área de contato e distribuição de tensão imediatamente abaixo do pneu.

Segundo Thorpes (2022), as interações pneu-solo particularmente em solos agrícolas, se torna desafiador, pois a deformação vertical do solo às vezes é maior que a dos pneus, portanto, para simular de maneira mais exata as deformações causadas na interação, se faz necessário realizar uma caracterização do solo e das tensões atuantes no solo. Além disso, a dinâmica e a cinemática dos pneus em terrenos deformáveis são afetados por diferentes fatores de design e operação, bem como pelas características do terreno (UNGUREANU et al., 2016; SANDU et al., 2019).

Tabela 1: Formas e funções de distribuição de tensão sobre a área de contato pneu solo.
Adaptado de Keller et al., 2007; Lima, 2017

Referência	Forma da área	Função de distribuição
Guta & Larson (1982)	Elíptica	Potência
Johnson & Burt (1990)	Retangular	Uniforme ou Potência
O’Sullivan et al. (1999)	Circular	Potência
van den Akker (2004)	Retangular, Elíptica	Uniforme, parabólica, trapezoidal
Keller (2005)	Super-Elipse	Potência e exponencial
Schjønning et al. (2008)	Super-Elipse	Potência e exponencial

2.6 Tensões no solo

O conhecimento das tensões atuantes em um maciço de terra sejam elas advindas do peso próprio ou em decorrência de carregamentos em superfície, ou ainda pelo alívio de cargas provocado por escavações é de vital importância no entendimento do comportamento de praticamente todas as obras de engenharia geotécnica (MARAGON, 2018). Segundo Primo (2022), o conhecimento das tensões aplicadas ao solo resulta em diminuição da intensificação da compactação. O estado de tensão no solo resulta em estados de tensão normal (σ) e cisalhante (τ), que variam em função do plano considerado.

Na Figura 2, em sua forma mais simplificada, as tensões em uma das faces podem ser caracterizadas por uma tensão perpendicular atuante na mesma face, denominada de tensão normal, e duas tensões tangenciais a este plano (face), chamadas de tensão de cisalhamento (KOOLEN & KIUPERS, 1983; KELLER, 2004, LIMA, 2017).

Note que, em cada face Z, X e Y há uma tensão normal e duas tangenciais ou de cisalhamento. As tensões ditas normais são denotadas por σ_1 , σ_2 , σ_3 , enquanto que, as tangenciais ao plano são indicadas por τ , para cada um dos planos correspondentes. O completo estado é descrito, portanto, por nove componentes (Figura 3a). Na matriz tensor tensão (Figura 3a), os componentes de tensões normais σ_1 , σ_2 , σ_3 , são alocados na diagonal, e caso sejam de magnitudes distintas, são denominadas de tensões maior, intermediária e menor, respectivamente. Quando as σ_1 , σ_2 , σ_3 , assumem magnitudes iguais, o estado de tensão normal é chamado de isotrópico. Neste caso, o corpo estaria em equilíbrio e livre de tensões de cisalhamento (Figura 3b), sendo essa uma propriedade importante nos estudos e análises de tensões em solos (KOOLEN & KIUPERS, 1983; LIMA, 2017).

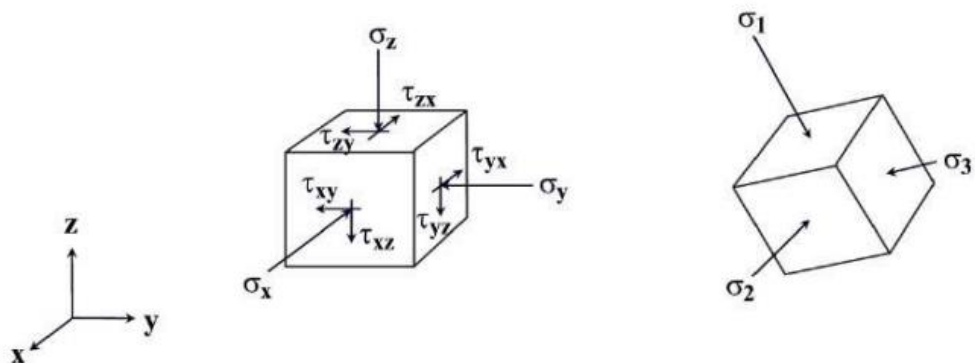


Figura 2: . Completo estado de tensão agindo sobre um corpo cubo infinitesimal (Keller, 2004; Lima, 2017).

$$\begin{array}{cc} \text{a)} & \text{b)} \\ \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{pmatrix} \end{array}$$

Figura 3: a) Os nove componentes da matriz tensor tensão, no completo estado de tensão do solo, que envolve as tensões principais e de cisalhamento. b) o estado de tensão de um corpo submetido a ação isotrópica normal, livre de tensão de cisalhamento. Adaptado de (KOOLEN & KIUPERS, 1983; LIMA, 2017)

Especificamente para um ponto imediatamente abaixo do centro de um pneu agrícola, em direção ao perfil do solo, a σ_1 é tomada como maior vertical; a σ_2 seria tomada como a tensão longitudinal e intermediária, paralela ao eixo longitudinal da área carregada (isto é, ao longo da direção de tráfego); e a σ_3 seria a tensão menor, perpendicular a direção de tráfego, ao longo da largura do pneu (KOOLEN & KIUPERS, 1983; DÉFOSSEZ et al., 2003; LIMA, 2017).

Modelos analíticos para propagação de σ através do solo são baseados nos trabalhos de Boussinesq (1885), Fröhlich (1934) e Söhne (1953) (DÉFOSSEZ & RICHARD, 2002; VAN DEN AKKER, 2004; KELLER, 2004; KELLER et al., 2007; STETTLER et al., 2014; LIMA, 2017). Uma solução analítica para a propagação de tensão radial (σ_r), sob um ponto de carga P, agindo sobre um semi infinito, homogêneo, isotrópico e ideal elástico-médio espaço, foi dada por Boussinesq (1885):

$$\sigma_1 = \frac{3P}{2\pi r^2} \cos^3 \theta \quad (1)$$

Onde r é a distância radial da carga pontual até um ponto desejado e θ é a ângulo entre o vetor de carga normal e o vetor de posição da carga pontual até o ponto desejado Equação 1.

Baseado na equação de Boussinesq (1885), Fröhlich (1934) sugeriu a aplicação da Equação 2 ao solo, introduzindo o chamado fator de concentração (ξ), porque notou que as tensões medidas no solo não correspondiam aos valores das tensões estimadas pela equação de Boussinesq (1885). De acordo com a pressuposição de Fröhlich (1934), a equação com a inclusão do tão chamado fator de concentração é dado por:

$$\sigma_1 = \frac{\xi P}{2\pi r^2} \cos^\xi \theta \quad (2)$$

Söhne (1953) calculou a tensão vertical sob o centro de um pneu de trator usando a Equação 2. Söhne (1953), considerou que o fator de concentração do solo assume valores de 3, 4, 5 e 6 em função da rigidez do solo, sendo correspondente a muito duro, duro, firme e solto, respectivamente. Note que, para o fator de concentração (ξ) 3, a equação de Fröhlich (1934) torna-se semelhante a dada por Boussinesq (1885) (KELLER, 2004; LIMA, 2017).

Uma vez que a distribuição de σ sobre área de contato não uniforme Söhne (1953), para calcular a σ_r , Söhne (1953), dividiu a área de contato, A , em pequenos elementos, i , com uma área A_i , uma tensão normal, σ_i , carregando a carga $P_i = \sigma_i A_i$, a qual é tratada como um individual ponto de carga. A σ , a uma certa profundidade (z), é então calculada pela soma da contribuição de cada P_i . O procedimento de Söhne (1953) foi usado por Keller et al. (2007) no modelo SoilFlex.

2.7 Modelagem

O PredComp é uma implementação computacional com um conjunto vasto de funções, desenvolvidos no Software R, como, *StressTraffic* que calcula as tensões de contato e a distribuição das tensões sobre a área de contato, assim como, a distribuição da tensão no perfil do solo; *SoloDeformation* calcula a variação da densidade do solo após a tensão normal média aplicada. *SoloStrength* e *CompressiveProperties* são dois grupos de funções implementadas a física do solo que fornecem estimativas de tensão de pré compressão e de parâmetros compressivos a partir das propriedades do solo disponíveis. Assim como no Software R, o PredComp tem uma aplicação em página web iterativa que desenvolve as mesmas funções, o que o torna acessível a todos, pois se encontra em um ambiente computacional de código aberto.

O modelo ele vem a simular a compactação do solo com base em critérios científicos, utilizando as propriedades do solo e os parâmetros de máquinas que se encontram prontamente disponíveis, os algoritmos presentes no modelo têm como fornecer detalhes numéricos e gráficos da área de contato assim como da propagação das tensões exercidas pela passagem dos rodados.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

Avaliar as tensões transmitidas por dois veículos tratores e um veículo de transbordo na colheita da cana-de-açúcar por meio de modelo pseudo analítico.

3.2 Objetivo específico

Analisar o efeito das tensões transmitidas ao solo através do contato pneu-solo dos tratores e transbordo.

Avaliar o efeito das tensões verticais máximas exercidas pelos tratores e transbordo.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Maquinário utilizado na simulação

Para o desenvolvimento das simulações, foram selecionadas três máquinas, sendo dois tratores, de marca New Holland e outro Valtra, além de um veículo de transbordo da marca TMA. A seleção dos veículos obedeceu ao critério de capacidade de carga. Para calcular o peso por eixo, utilizou se a carga máxima especificada no catálogo do fabricante.

O trator Valtra BH 180 (Figura 4), com 180 cv e peso bruto de 7,29 toneladas.



Figura 4: Trator Valtra BH 180

Por sua vez, o trator New Holland T7 SWB 205 (Figura 5), possui 205 cv e peso bruto total de 10,5 toneladas.



Figura 5: Trator New Holland T7 SWB 205

O veículo de transbordo, o VTX 2410 (Figura 6) possui um peso vazio de 8,5 toneladas, conta com apenas eixo tandem e peso bruto de 11 toneladas.



Figura 6: Transbordo TMA VTX 2410

Neste estudo, assumiu-se que os tratores e o transbordo estariam com suas cargas máximas e que a carga por eixo dos tratores dividida de forma que 60% ficaria no eixo traseiro e 40% no eixo dianteiro. Para o veículo de transbordo, foi definido que o peso seria dividido de forma igual. Estando o resultado dessa proporção na Tabela 2.

Tabela 2: Divisão da carga total por eixo

Veículo	Trator 1	Trator 2	Transbordo
Marca	Valtra	New Holland	TMA
Modelo	BH 180	SWB 205	VTX 2410
Kg/eixo (D)	2916	4200	9750

Kg/eixo (T)	4374	6300	
-------------	------	------	--

Em relação aos pneus dos veículos, as suas medidas originais foram respeitadas, no entanto, foi constatado que todas as pressões de insuflagem recomendadas seriam decorrentes do catálogo da marca Trelleborg, com base nas medidas dos pneus fornecidas pelos desenvolvedores das máquinas, como consta na Tabela 3.

Tabela 3 Referência dos pneus para cada veículo

Veículo	Trator 1	Trator 2	Transbordo
Marca	Valtra	New Holland	TMA
Modelo	BH 180	SWB 205	VTX 2410
Eixo (D)	18.4 – 26 R1	18.4-26 R2	600/50-22.5
Eixo (T)	24.5 – 32 R1	20.8-38 R2	

Por sua vez, as pressões de insuflagem utilizadas nas simulações seguiram o catálogo Trelleborg de 2022 e podem ser conferidas na Tabela 4

Tabela 4: Pressão de insuflagem em kPa para os veículos agrícolas

Veículo	Trator 1	Trator 2	Transbordo
Marca	Valtra	New Holland	TMA
Modelo	BH 180	SWB,205	VTX 2410
Eixo (D)	206,84	103,42	530,9
Eixo (T)	151,9	117,21	

4.2 Modelagem

Foram realizadas simulações através do modelo pseudo-analítico com auxílio do software *PredComp1.0*, onde foram gerados dados como área de contato, tensão máxima, comprimento de contato e largura de contato, além de gráficos de tensão de contato e tensão vertical.

Nas simulações foi possível avaliar a área de contato e a distribuição da tensão vertical, de acordo com os parâmetros de máquina-pneu. Neste estudo foi admitido que a pressão medida e a recomendada assumiram o mesmo valor.

Tabela 5: Parâmetros máquina-pneu dos tratores e transbordos utilizados na simulação

	Trator 1		Trator 2		Transbordo
Parâmetros da máquina	Pneu		Pneu		Pneu
	Dianteiro	Traseiro	Dianteiro	Traseiro	
Pressão de insuflagem medida (kPa)	105	155	105	120	530
Pressão de insuflagem recomendado (kPa)	105	155	105	120	530
Diâmetro do pneu (m)	1,6	2,06	1,6	2,02	1,232
Largura do pneu (m)	0,47	0,62	0,47	0,53	0,6
Carga por roda (Kg)	1458	2187	2100	3150	4875

Através das informações de entrada foi possível gerar os dados a serem discutidos neste estudo.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

De acordo com Schjonning et al. (2008) as tensões no solo são maiores abaixo do centro da roda, e vai sendo reduzida até as laterais sendo possível evidenciar nas Figuras 08, 09 e 10 as quais são referentes a área de contato apresentada pelos Tratores 1 e 2, e do Transbordo. Com isso é possível notar como a distribuição das cargas acaba por impactar na área, pois estão relacionadas as suas composições.

Quando geradas as simulações, demonstraram que há diferença entre as áreas de contato, que se explica pelas diferentes especificações das máquinas. As tensões

representadas nas áreas de contato são as transmitidas ao solo pelo maquinário agrícola, obtidas nas simulações com o Soilflex, que se referem as tensões que foram transmitidas abaixo do centro de cada roda. É possível notar que a área de contato adquire formatos geométricos onde o pneu dianteiro com o formato circular ou elipsoidal, já o pneu traseiro retangular.

As simulações apontam formas e tamanhos de área de contato diferente, podendo ser observado formatos retangulares, circulares e elipsoidais. Consequentemente, a diferença entre os formatos é esperada para pneus com especificações diferentes, o modelo tem como parâmetros a carga por roda, diâmetro do pneu, largura do pneu, pressão de insuflagem e pressão de insuflagem recomendada. De acordo com Lima (2017), a carga da roda é aplicada sobre a área para transmitir a tensão em direção ao solo, motivo pelo qual os detalhes sobre a área de contato (tabela 5) estudados por (KELLER, 2005; KELLER et al., 2007; LIMA, 2017; LIMA et al., 2021) e aqui utilizados. De acordo com Mohsenimanesh et al. (2007) demonstraram que o aumento da pressão de insuflagem concentra a tensão no meio do pneu, ocorrendo redução nas laterais e que o aumento do valor da carga levou a um aumento de tensão nas bordas (MION et al., 2016).

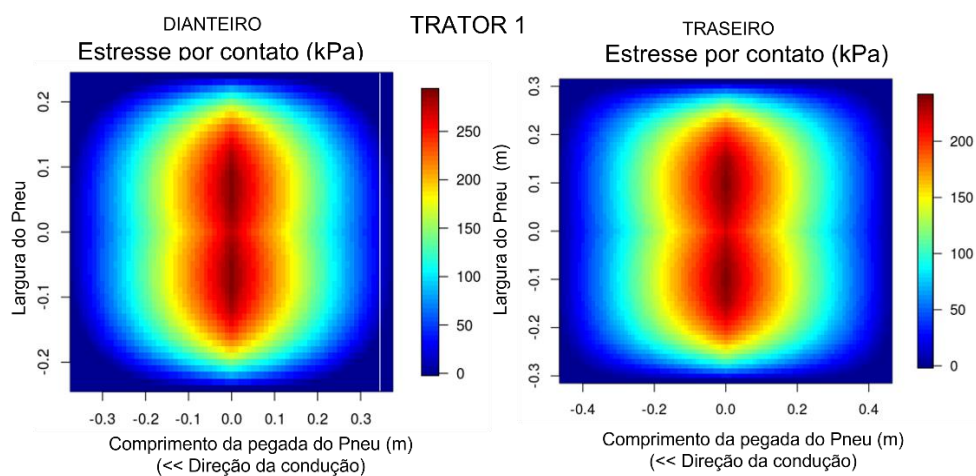


Figura 7: Trator 1 - Valtra BH 180

Em relação aos Tratores 1 e 2, observaram-se discrepâncias nos pneus, as quais podem ser atribuídas às diferenças nos parâmetros dos pneus utilizados. Considerando a distribuição de tensão em todos os pneus, a máxima tensão vertical foi verificada próxima ao centro da área de contato ao longo das distâncias relativas à largura da mesma. As tensões máximas encontradas nos tratores, através do software PredComp, variaram entre 168 a 298 kPa, já no transbordo a máxima tensão encontrada foi de 679 kPa.

As rodas traseiras dos tratores apresentam uma maior área de tensão por contato, com relação aos dianteiros, é explicado pela largura do pneu do Trator 1, de 62 centímetros e no Trator 2, 53 centímetros, fazendo com que área de contato seja maior nos traseiros e aumente a pressão por contato transmitida na interação solo-pneu. Conforme relatado por Lozano et al. (2013), a área de contato entre o pneu e o solo diminui quando a largura do pneu é aumentada, o que é consistente com os resultados encontrados neste estudo. Além disso, constatou-se que, à medida que a pressão de contato aumenta com a carga por roda do veículo, a transmissão da tensão vertical aumenta.

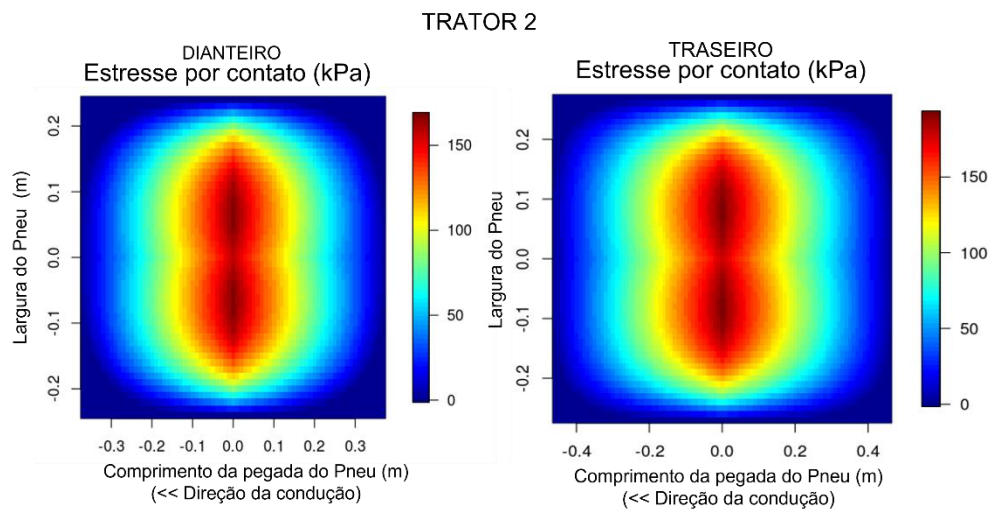


Figura 8: Trator 2 - New Holland T7 SWB

As rodas dianteiras dos tratores possuem os mesmos parâmetros, o que vem a diferenciar são as cargas aplicadas por eixo. Essa mudança é possível ser evidenciada pelas tensões máximas aplicadas ao solo, onde na roda dianteira do Trator 1 é encontrado uma tensão máxima de 292 kPa, enquanto na dianteira do Trator 2, uma tensão máxima de 168 kPa. Castioni et al. (2021), encontrou tensões verticais em seus tratores que variaram de 200 a 247 kPa, que corroboram com as informações encontradas neste estudo.

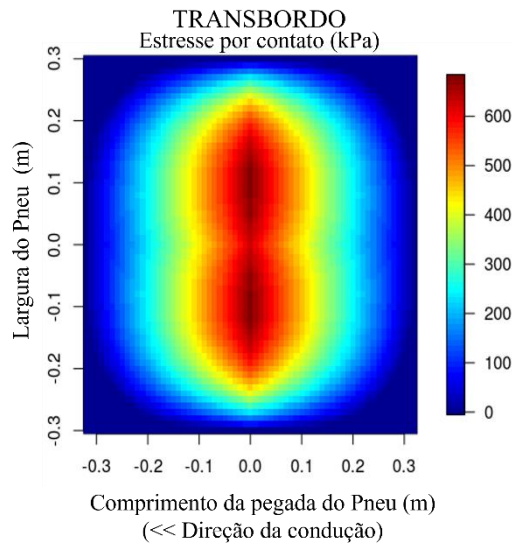


Figura 9: Transbordo TMA VTX 2410

A área de contato do Transbordo utilizada é de aproximadamente 0,34 m², enquanto, a área de contato dos pneus traseiros dos Tratores é de 0,32 m². Apesar da pequena diferença na área de contato, há uma grande diferença nas tensões aplicadas, variando de 511 kPa para o pneu traseiro do Trator 1 e 387 kPa para o pneu traseiro do Trator 2. Além disso, há diferenças nos pneus utilizados nos tratores, explicadas por diferenças nos parâmetros.

Considerando a distribuição de tensão em todos os pneus, a tensão vertical máxima calculada ocorreu próximo ao centro da área de contato ao longo das distâncias relativas à largura da área de contato. De acordo com Lozano et al. (2013), foram exercidas pressões verticais máximas de 571 kPa nas rodas traseiras do caminhão por eles estudados sob rodas tandem duplas menores, mas com pressão de insuflagem altas, assim como as rodas tandem do transbordo neste estudo.

Tabela 6: Tensão máxima gerada na distribuição da área de contato ($\sigma_{\text{máx}}$) resultados da simulação, de acordo com as especificações de cada pneu, dos veículos avaliados.

Veículo		Tensão máxima (kPa)
Trator 1	D	292
	T	240
Trator 2	D	168
	T	192

Transbordo	668
------------	-----

De acordo com a Tabela 6, no Trator 1 é possível encontrar uma tensão máxima no pneu dianteiro de 292 kPa, já o traseiro de 240 kPa. No Trator 2, a tensão máxima encontrada é 168 kPa na dianteira e 192 kPa na traseira. Já o Transbordo, apresenta uma tensão de 668 kPa. Todas as tensões máximas encontradas nos Tratores 1 e 2 se encontram acima dos valores da pressão de insuflagem (Tabela 6). Os resultados aqui encontrados estão de acordo com os estudos realizados sobre transmissão de tensões no solo (Lozano, 2011; Schjønning & Lamandé, 2010; Schjønning et al., 2008; Keller, 2005) que demonstram que as máximas tensões superficiais encontradas superam os valores de pressão de insuflagem.

Em relação a tensão vertical dianteiro (Figura 10) é possível observar que não há uma relação linear entre os pontos, o que indica variação das tensões em diferentes profundidades, pela carga aplicada.

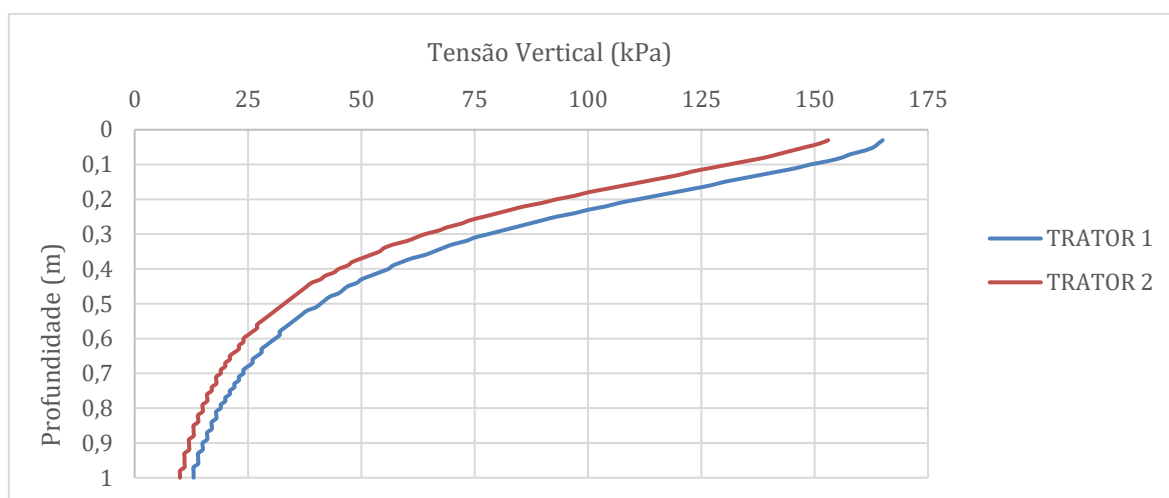


Figura 10: Tensão máxima vertical aplicada aos solos, através do pneu dianteiro dos tratores

Entre as tensões aplicadas no pneu traseiro (Figura 11) e dianteiro (Figura 10) existe uma variação significativa em questão, há um decréscimo de 17,8% de tensão vertical do pneu dianteiro para o traseiro, no trator 1. Já no trator dois, a um acréscimo da tensão vertical aplicada entre o pneu dianteiro para o traseiro foi de 14,3%. As curvas apresentam um comportamento semelhante em ambos os casos, o que pode indicar que a tensão aplicada ao solo apresente a mesma deformação gráfica independente da carga aplicada ao solo.

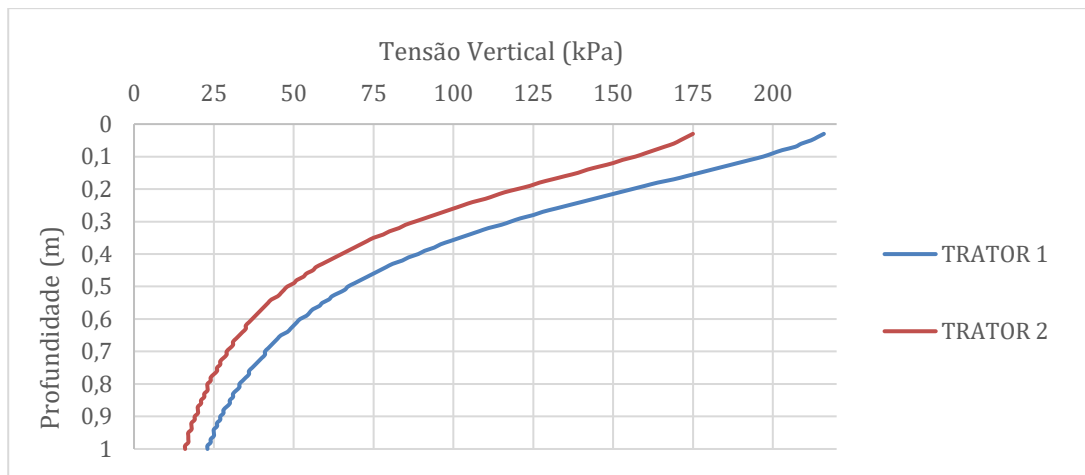


Figura 11: Tensão máxima vertical aplicada aos solos, através do pneu traseiro dos tratores

A análise da Figura 12, é possível acompanhar o comportamento da tensão vertical gerado pela interação solo-pneu. Observe-se que os pneus dos tratores apresentam um comportamento dentro do mesmo intervalo, enquanto o Transbordo se afasta do intervalo devido à sua pressão de insuflagem significativamente superior em relação aos Tratores 1 e 2, gerando em uma tensão máxima de 668 kPa. Esse resultado é consistente com as descobertas de Lozano (2011), que identificou uma tensão máxima de 571 kPa em um caminhão com tandem dupla, com pressão de 517 kPa na traseira, o que vem a corroborar com os dados encontrados neste estudo.

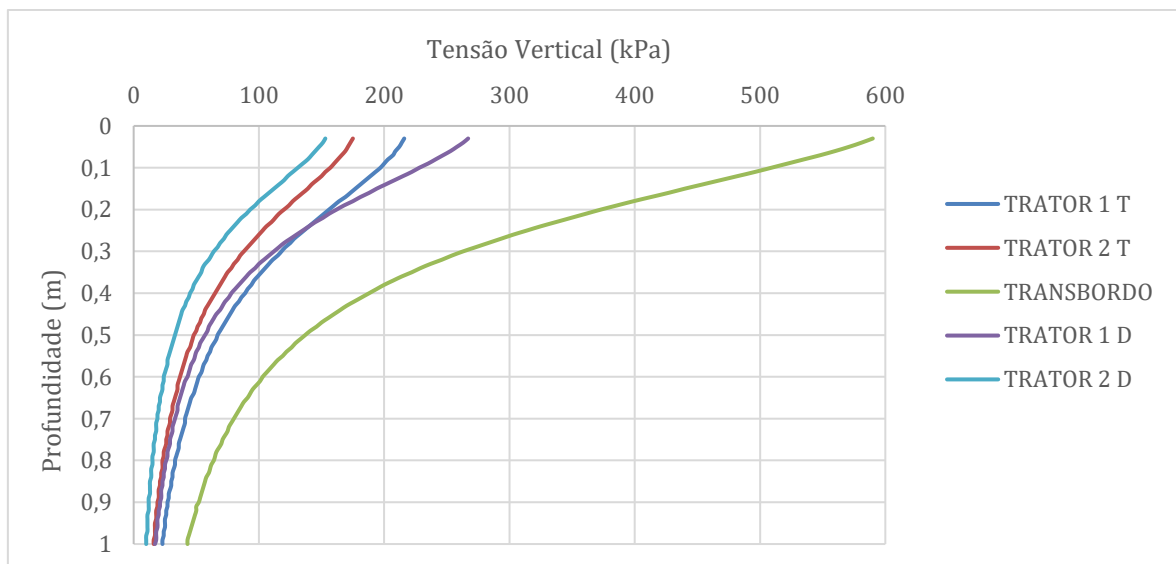


Figura 12: Tensão máxima vertical aplicada aos solos, através do pneu dos tratores e do transbordo

Na Figura 13 é observado que o padrão das curvas de tensão exibe similaridade entre as duas situações retratadas. No Trator 1, onde as linhas (Figura14) de tensão se cruzam, há indícios de que existe uma relação intrínseca entre os pneus do veículo, em que qualquer alteração de carga pode influenciar o comportamento das rodas dianteiras e traseiras. Por outro lado, no Trator 2 em que as linhas da figura de tensão não se cruzam, porém mantêm uma curvatura semelhante, pode-se inferir que existe uma conexão entre as tensões que atuam nas rodas, mesmo sem haver uma influência direta entre elas.

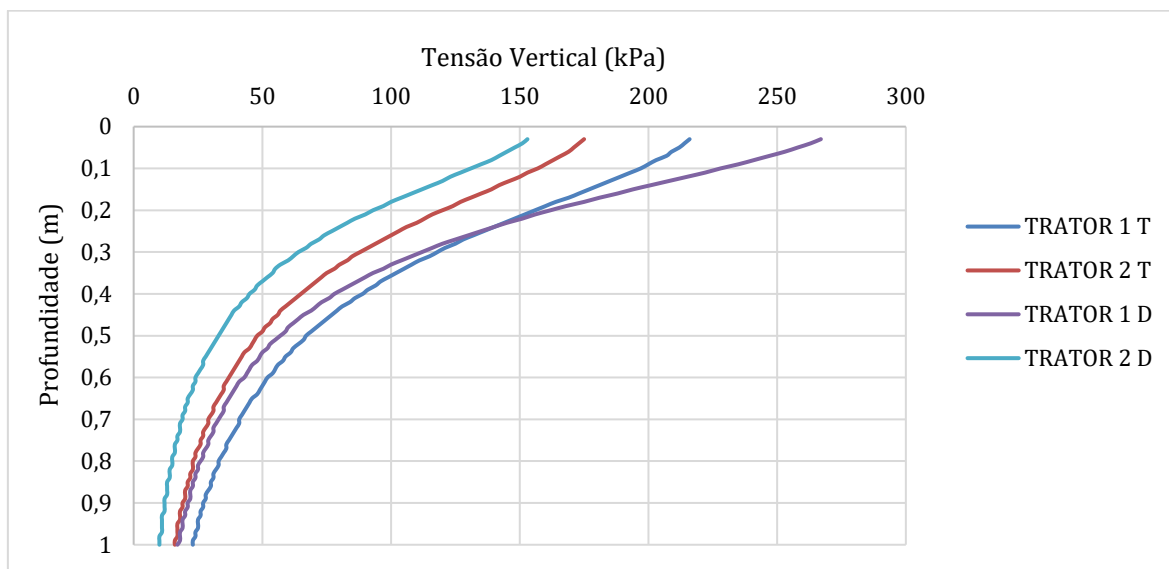


Figura 13: Tensão máxima vertical aplicada aos solos, através do pneu dos tratores

A largura do pneu traseiro do Trator 2 é maior do que a do dianteiro, conforme indicado na Tabela 6. Entretanto, a pressão de insuflagem do pneu traseiro foi aumentada para atender a carga adicional de 60% do peso do veículo, bem como tração dos implementos. Como resultado, a tensão vertical no pneu traseiro passou para 192 kPa na interface do pneu com o solo, o que pode ser atribuído à necessidade de uma pressão de insuflagem mais alta, recomendada pelos fabricantes. Como foi encontrado por Silva et al. (2022), o que vem a corroborar com o estudo.

6 CONCLUSÕES

As cargas aplicadas tornam-se um fator crítico na geração de tensões verticais no solo, principalmente quando os pneus possuem características semelhantes. Este estudo forneceu evidências das diferenças na transmissão da tensão solo-pneu causada pelas diferentes configurações de rodas, atribuídos aos veículos que foram analisados. As tensões encontradas com o transbordo chegaram a ser três vezes maiores que as tensões encontradas

com os tratores, tendo em vista as cargas que foram aplicadas em cada veículo, verificando assim que os transbordos exercem maiores tensões aos solos, tornando-os mais suscetíveis a compactação. Portanto eles devem ter o seu tráfego controlado para não haver prejuízos as lavouras.

7. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7182: solo – ensaio de compactação. Rio de Janeiro, RJ, 1986, 10 p
- ALBERT, R. P; PINTO, M. A. B.; LIMA, C. L. R.; SANTOS, F. J.; SCHEUNEMANN, T.; MIGUEL, P. Physico-mechanical attributes of a Typic Hapludox in areas with different sugarcane cultivation times. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v.13, p.1-8, 2018.
- ALVES FILHO, A. Elementos Finitos a base da Tecnologia CAE. Saraiva Educação SA, 2018.
- ARAÚJO, E. A.; KER, J. C.; MENDONÇA, E. S.; SILVA, I. R.; OLIVEIRA, E. K. Impacto da conversão floresta-pastagem nos estoques e na dinâmica do carbono e substâncias húmicas do solo no bioma Amazônico. *Acta Amazonica*, v. 41, p. 103-114, 2011.
- ARCOVERDE, S. N. S.; SOUZA, C. M. A.; SUAREZ, A. H. T.; COLMAN, B. A.; NAGAHAMA, H. J. Atributos físicos do solo cultivado com cana-de-açúcar em função do preparo e época de amostragem. *Revista de Agricultura Neotropical*, v. 6, p.41-47.
- ARVIDSSON, J.; WESTLIN, H.; KELLER, T.; GILBERTSSON, M. R. Track systems for conventional tractors–Effects on soil compaction and traction. *Soil and Tillage Research*, v.117, p.103-109, 2011.
- BAQUERO, J. E.; RALISCH, R., CONTI, M., TAVARES FILHO, C., GUIMARÃES, M. F. Soilphysical properties and sugarcane root growth in a red Oxisol. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.36, p.63-70, 2012.
- BRASIL. Congresso. Câmara dos Deputados. Decreto nº 76593, de 14 de novembro de 1975. Brasil,
- CAMILOTTI, F., ANDRIOLI, I., DIAS, F. L. F., CASAGRANDE, A. A., SILVA, A. R., MUTTON, M., CENTURION, J. F. Efeito prolongado de sistemas de preparo do solo com e sem cultivo de soqueira de cana crua em algumas propriedades físicas do solo. *Engenharia Agrícola*, 25, 189-98. 2005.
- CARNEIRO, M. A. C.; SOUZA, E. D. D.; REIS, E. F. D.; PEREIRA, H. S.; AZEVEDO, W. R. D. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 33, p. 147-157, 2009.

- CARVALHO, A. J. A.; SOUZA, E. H.; MARQUES, C. T. S.; GAMA, E. V. S.; NACIF, P. G. S.; Caracterização física dos solos dos quintais agroflorestais e cultivos monotípicos na região de Amargosa, Bahia. *Revista Brasileira de Agroecologia*, Porto Alegre, v.2, p. 941-944. 2007
- CARVALHO FILHO, A.; CENTURION, J. F; SILVA, R. P.; FURLANI, C.E.A; CARVALHO, L. C. C. Métodos de preparo do solo: alterações na rugosidade do solo. *Engenharia Agrícola*. v. 27 p.229–237. 2007
- CASTIONI, G. A. F.; LIMA, R. P. de; CHERUBIN, M. R.; BORDONAL, R. O.; ROLIM, M. M.; CARVALHO, J. L. N. Machinery traffic in sugarcane straw removal operation: Stress transmitted and soil compaction. *Soil And Tillage Research*, v. 213, p. 105-122. 2021.
- CASTRO FILHO, C. D., MUZILLI, O., PODANOSCHI, A. L. (1998). Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo Roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. v.32. p.527-538. 2022.
- CAVALCANTI, R. Q., Atributos físicos e mecânicos do solo sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar em tabuleiro costeiro. 2018. 59 f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Agrícola, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife-PE, 2018.
- CHERUBIN, M. R., FRANCO, A. L. C., GUIMARAES, R. M. L., TORMENA, C.A., PERRI, C. E. P., KARLEN, D. L., CERRI, C. C. Assessing soil structural quality under Brazilian sugarcane expansion areas using Visual Evaluation of Soil Structure (VESS). *Soil and Tillage Research*, v. 173, 64-74. 2017.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar 2017/2018. Terceiro levantamento – v. 4 – Brasília: Conab, 2017
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar. – v. 1 – Brasília: Conab, 2018 - v
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar 2018/2019. Terceiro levantamento – v. 5 – Brasília: Conab, 2018
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. 1º Levantamento - Safra 2022/23. 2022.
- COMPANHIA NACIONAL DO ÁLCOOL (CNA). Etanol se consolida com vantagens econômicas e ao meio ambiente no Brasil. 2020.

- CRISPIM, F. A. Compactação de solos: influência de métodos e de parâmetros de compactação na estrutura dos solos. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa 2007. p. 98
- CUNHA, E. Q., STONE, L. F., FERREIRA, E. P. B., DIDONET, A. D., MOREIRA, J. A. A., LEANDRO, W. M. Sistemas de preparo do solo e culturas de cobertura na produção orgânica de feijão e milho: II - atributos biológicos do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.35. p.10. 2011.
- DNER – Departamento Nacional de Estradas De Rodagem. DNER – ME 129/94: Solos – compactação utilizando amostras não trabalhadas. Rio de Janeiro, RJ, 1994, 7p.
- DEFOSSEZ, P., RICHARD, G., Models o soil compaction due to traffic and their evalution. *Soil and Tillage Reserach*, v.67. 2002. p. 41-64.
- DERPSCH, R.; ROTH, C. H.; SIDIRAS, N.; KOPKE, U. Controle da erosão no Paraná, Brasil: sistemas de cobertura do solo, plantio direto e preparo no conservacionismo do solo. Eschborn: GTZ, 1991. 272 p.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Manual de métodos de análises de solo. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa, p. 212. 2011.
- ENTIN, J. K.; ROBOCK, A.; VINNIKOV, K. Y.; HOLLINGER, S. E.; LIU, S.; NAMKHAI, A. Temporal and spatial scales of observed soil moisture variations in the extratropics. *Journal of Geophysical Research*, v. 105, p. 11865-11877, 2000.
- FAGUNDES, E. A. A., SILVA, T. J. A., SILVA, E. M. B. Desenvolvimento inicial de variedades de cana-de-açúcar em Latossolo submetidas a níveis de compactação do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.18, p.188-193. 2014.
- GEE, G. W.; OR, D. Particle Size Analysis. In: Dane, J.H. and Topp, G.C., Eds., *Methods of Soil Analysis, Part 4, Physical Methods*, Soils Science Society of America. v.5 p.255-293. 2002
- GUARIZ, H.R, PICOLI, M. H. S, CAMPANHARO, W. A., CECÍLIO, R. A. Variação da umidade e da densidade do solo sob diferentes coberturas vegetais. *Revista Brasileira de Agroecologia*. v.4. p. 4.2009.
- JIMÉNEZ, K. J. Análise da compactação do solo sob tráfego de máquinas na colheita da cana-de-açúcar através do método dos elementos finitos. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Federal Rural de Pernambuco. p. 82 2019.
- JIMENEZ, K. J.; ROLIM, M. M.; GOMES, I. F.; LIMA, R. P. de; BERRÍO, L. L. A.; ORTIZ, P. F. Numerical analysis applied to the study of soil stress and compaction due to mechanised sugarcane harvest. *Soil and Tillage Research*, v. 206, p. 104847. 2021.

- JÚNNYOR, W. S. G.; DISERENS, E.; MARIA, I. C.; ARAUJO-JUNIOR, C. F.; FARHATE, C. V. V.; SOUZA, Z. M. Prediction of soil stresses and compaction due to agricultural machines in sugarcane cultivation systems with and without crop rotation. *Science of the Total Environment*, v. 681, p. 424-434. 2019.
- KELLER, T., DEFOSSEZ, P., WEISSKIPF, P., ARVIDSSON, J., RICHARD, G. 2007. SoilFlex: a model for prediction of soil stresses and soil compaction due to agricultural field traffic including a synthesis of analytical approaches. *Soil and Tillage Research*. v.93, p.391-411.
- KOOLE, A. J. J., KUIPERS, H., 1983. *Agricultural Soil Mechanics*. Advanced Series in Agricultural Sciences, V.13. p.241.
- LIMA, C. L. R. Compressibilidade de solos versus intensidade de tráfego em um pomar de laranja e pisoteio animal em pastagem irrigada. Tese (Doutorado em Agronomia) – Departamento de Solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. 2004. 70p
- LIMA, R. P.; SILVA, A. R.; SILVA, A. P.; Soilphysics: An R package for simulation of soil compaction induced by agricultural field traffic, *Soil and Tillage Research*, v.206, p.104824, 2021.
- LOZANO, N. B.; 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, p.61-68, 2013.
- MAGRO, T.; CAVICHIOLI, F. A. Uso de implementos agrícolas. SIMTEC - Simpósio de Tecnologia da Fatec Taquaritinga, v. 4. p.13.2018.
- MARASCA, I., LEMOS, S. V., SILVA, R. B., GUERRA, S. P. S., LANÇAS, K. P. Soil Compaction Curve of an Oxisol under Sugarcane Planted after In-Row Deep Tillage. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.39, p.1490-1497. 2015.
- MEA - Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystem and human well-being: Synthesis*. Washington: Island Press, 137p 2005.
- MION, R. L.; HOLANDA, A. S.; A BARROSO, S. H.; SILVA, S. A. T. Tensões aplicadas no solo pelas diferentes pressões do pneu de um trator agrícola. *Engenharia Agrícola*, v. 36, p.63-77. 2016.
- MOHSENIMANESH, A.; WARD, S. M. On the move monitoring of soil-tire interaction on soft soil using wireless data acquisition. *Transactions of the ASABE*. v.50, p. 1919-1925, 2007.

- MOTA, J. C. A.; FREIRE, A. G.; ASSIS JÚNIOR, R. N. Qualidade física de um Cambissolo sob sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 37, p. 1196-1206, 2013
- MOTA, J. A.; ALENCAR, T. L.; ASSIS JÚNIOR, R. N. Alterações físicas de um cambissolo cultivado com bananeira irrigada na chapada do Apodi, Ceará. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 39, p. 1015-1024, 2015.
- NOVAES, D. S.; BRUN, E. J.; BRUN, F. G. K. Compactação do solo em uma área livre com árvores urbanas em solos argilosos. *Cadernos de Ciência & Tecnologia*, v. 38, p. 26873. 2021.
- O'SULLIVAN, M. F; HENSHALL, J. K; DICKSON, J. W; A simplified method for estimating soil compaction, *Soil and Tillage Research*, v.49. p.325-335. 1999
- PAYERO, J. O.; QIAO, X.; KHALILIAN, A.; MIRZAKHANI-NAFCHI, A.; DAVIS, R. Evaluating the Effect of Soil Texture on the Response of Three Types of Sensors Used to Monitor. Soil Water Status. *Journal of Water Resource and Protection*, v. 9, p. 566-577, 2017.
- PIRES, L. F.; ROSA, J. A.; TIMM, L. C. Comparação de métodos de medida da densidade do solo. *Revista Acta Scientiarum Agronomy*, v. 33, p. 161-170, 2011.
- POTT, C. A.; ZERBIELLI, L. C.; MARTINS, P. J; GARDIN, E.; GARCIA, M. L. Qualidade física do solo em sistemas florestais, pecuários e integrados de produção. *Brazilian Journal of Applied Technology for Agricultural Science*. p. 53-60. 2017.
- PIZETTA, S. C.; RODRIGUES, R. R.; PEREIRA, G. M.; PACHECO, F. E. D.; VIOLA, M. R.; LIMA, L. A. Calibração de um sensor capacitivo para estimativa da umidade em três classes de solos. *Irriga*, v. 22, p. 458-468, 2017.
- RAFFAELLA R. Planejamento da colheita. Consultora autônoma Embrapa. Disponível em:<https://www.embrapa.br/agenciadeinformacaotecnologica/cultivos/cana/producao/planejamento-da-colheita>. 2022.
- RIBON, A. A.; TAVARES FILHO, J. Estimativa da resistência mecânica à penetração de um Latossolo Vermelho sob cultura perene no norte do estado do Paraná. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.32. p. 1817-1825. 2008.
- RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; RODRIGUES BRITO, O.; FUENTES LLANILLO, R.; FERREIRA, R. Compactação do solo: causas e efeitos Semiárido: *Ciências Agrárias*, v.26. 2005, p. 321-343
- RIPOLI, T. C. C. Ensaio & certificação de máquinas para colheita de cana-de-açúcar. In: MIALHE, L. G. Máquinas agrícolas: ensaios & certificação. Fundação de Estudo

- “Luiz de Queiroz”, (PDF) *colheita mecânica e manual da cana-de-açúcar: histórico e análise*.cap.13, p.635-73. 1996.
- ROSSATO, L.; ALVALÁ, R. C. S.; TOMASELLA, J. Variação espaço-temporal da umidade do solo no Brasil: análise das condições médias para o período de 1971-1990. *Revista Brasileira de Meteorologia*. v. 19, p. 113-122, 2004.
- ROUSSEAU, L.; FONTE, S. J.; TÉLLEZ, O.; HOEK, R. VAN DER.; LAVELLE, P. Soil macrofauna as indicators of soil quality and land use impacts in smallholder agroecosystems of western Nicaragua. *Ecological Indicators*, v. 27, p. 71-82, 2013.
- SALOMÃO, P. E. A.; KRIEBE, W.; SANTOS, A. A.; MARTINS, A. C. E. A importância do sistema de plantio direto na palha para reestruturação do solo e restauração da matéria orgânica. *Research, Society and Development*. v.9 p.21. 2020.
- SANDU, C., TAHERI, G. D. Hybrid soft soil tire model (HSSTM). Part I: Tire material and structure modeling. *Journal of Terramechanics*, v.86. p.1-13. 2019.
- SANTOS, H. V. R.; SANTOS, D. S.; BORGES, G. V. Determinação do índice de suporte califórnia e da curva de compactação do solo. *Revista Mirante: Daqui se vê do alto!*, v. 2, p. 108-123.2020.
- SCHJØNNING, P.; LAMANDÉ, M. Models for prediction of soil precompression stress from readily available soil properties. *Geoderma*, v. 320, p. 115-125,
- SCHOENHOLTZ, S. H.; VAN MIEGROET, H.; BURGER, J. A. A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. *Forest Ecology and Management*, v.138, p.335-356, 2000.
- SENA, C. C. R.; ALVES JUNIOR, J.; DOMINGOS, M. V. H.; ANTUNES JUNIOR, E. J.; BATTISTI, R.; EVANGELISTA, A. W. P.; CASAROLI, D. Calibração do sensor capacitivo de umidade do solo EC-5 em resposta a granulometria do solo. *Brazilian Journal of Development*. v. 6, p. 17228-17240, 2020.
- SILVA, R.P., ROLIM, M. M., GOMES, I. F., PEDROSA, E. M. R., TAVARES, U. E., SANTOS, A, N. (2018). Numerical modeling of soil compaction in a sugarcane crop using the infinite element method. *Soil and Tillage Research*, v. 181, p. 1-10.
- SILVA, P. L. F. Compactação e seus efeitos sobre o funcionamento do solo e a absorção de nutrientes pelas plantas: Uma revisão bibliográfica. *Meio Ambiente (Brasil)*, v.3, p.24-33. 2021.
- SILVA, M. O.; VELOSO, C. L.; NASCIMENTO, D. L.; OLIVEIRA, J.; PEREIRA, D. F.; COSTA, K. D. S. Indicadores químicos e físicos de qualidade do solo. *Brazilian Journal of Development*. p. 47838-47855. 2020.

- SILVA, R. P. Modelagem da compactação por tráfego agrícola após o preparo do solo em tabuleiro costeiro. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Federal Rural de Pernambuco. p.83. 2021
- SILVA, A. A., CASTRO, S. S. Indicadores macro e micromorfológicos da qualidade física de um Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar. Mercator, v.4. p.169-185. 2015.
- STEFANOSKI, D. C.; SANTOS, G. G.; MARCHÃO, R. L.; PETTER, F. A.; PACHECO, L. P. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental., v.17. p.1301–1309. 2013
- TEIXEIRA, P. C., DONAGEMMA, G. K., FONTANA, A., TEIXEIRA, W. G. Manual de Métodos de Análise de Solo. Embrapa, Brasília, p. 573. 2017.
- THORPE, Davi de Farias. RIGIDEZ DO SOLO NA ESTIMATIVA DA ÁREA DE CONTATO PNEU-SOLO DE UM TRATOR AGRÍCOLA. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Federal Rural de Pernambuco. 2022. p.46
- TOGNON, A. A. Propriedades físico-hídricas do Latossolo Roxo da região de Guairá-SP sob diferentes sistemas de cultivo.1991. 85f. Dissertação (Mestrado) Escola Superior de Agricultura de Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1991.
- UNGUREANU, N.; VOICU, G.; VLĂDUȚ, V.; BIRIȘ, S.; Ș. MATAACHE, M. Inflation pressure and static load effects on contact characteristics at solid soil – tire interface. UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering. v.78, p.253-264. 2016.
- VAN DEN AKKER, J. J. H. SOCOMO: a soil compaction model to calculate soil stresses and the subsoil carrying capacity, Soil and Tillage Research, v.79, p. 113-127. 2004.
- VIAN, C. E. F. *et al.* Origens, evolução e tendências da indústria de máquinas agrícolas. 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/resr/a/Yg34vGfdryDNVrRj9K3Vwhx/?format=pdf&lang=p>.
- VISCHI FILHO, O. J., SOUZA, Z. M., SILVA, R. A., LIMA, C. C., PEREIRA, D. M. G., LIMA, M. E., SOUSA, A. C. M., SOUZA, G. S. Capacidade de suporte de carga de Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar e efeitos da mecanização no solo. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.50, p.322-332. 2015