



LUANA MONTEIRO DA SILVA

**IMPACTO DO MAQUINÁRIO DE COLHEITA
FLORESTAL EM SOLOS ARGILOSOS AVALIADO
POR MODELOS DE CAPACIDADE DE SUPORTE
DE CARGA**

**LAVRAS-MG
2020**

LUANA MONTEIRO DA SILVA

**IMPACTO DO MAQUINÁRIO DE COLHEITA FLORESTAL EM SOLOS
ARGILOSOS AVALIADO POR MODELOS DE CAPACIDADE DE SUPORTE DE
CARGA**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, para a obtenção do título de Bacharel.

Dr. Moacir de Souza Dias Junior

Orientador

Dr. Zélio Resende de Souza

Coorientador

LAVRAS-MG

2020

LUANA MONTEIRO DA SILVA

**IMPACTO DO MAQUINÁRIO DE COLHEITA FLORESTAL EM SOLOS
ARGILOSOS AVALIADO POR MODELOS DE CAPACIDADE DE SUPORTE DE
CARGA**

**IMPACT OF FOREST HARVESTING MACHINERY ON CLAYY SOILS
ASSESSED BY LOAD SUPPORT CAPACITY MODELS**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADA em 20 de agosto de 2020.

Dr. Bruno Montoani Silva - UFLA

Dr. Diego Tassinari - UFLA

Dr. Moacir de Souza Dias Junior

Orientador

Dr. Zélio Resende de Souza

Coorientador

LAVRAS-MG

2020

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por sempre estar presente em minha vida, por ter me dado força para que eu nunca desistisse e por todas as bênçãos concedidas.

Aos meus queridos pais, Fabio e Angelita, que em momento algum mediram esforços para que eu chegasse até aqui, depositando confiança e incentivos, por todo ensinamento, apoio, carinho e amor incondicional.

A minha irmã Livia, por todo incentivo, carinho, amor, por estar sempre ao meu lado e me ajudar, principalmente nessa etapa final.

Ao meu irmão Leonardo, por todo carinho e amor.

Ao meu namorado Caio, por sempre me dar apoio, por nunca me deixar desistir, me fazendo acreditar sempre que sou capaz, por toda atenção, amor e carinho.

A toda minha família, que acompanharam esta luta e sempre estiveram na torcida.

As minhas amigas que fizeram parte desta batalha, pelos momentos incríveis compartilhados, em especial a Barbara, Gabriela, Lisa, Luciana e Marilane.

À Universidade Federal de Lavras, por me abrir diversas portas.

Ao professor e orientador Doutor Moacir de Souza Dias Junior por todo ensinamento, orientação, disposição e apoio.

Ao coorientador Doutor Zélio Resende de Souza, por todo conhecimento transmitido, pelo apoio, orientação e amizade.

Ao Laboratório de Física do Solo, no qual conheci pessoas que me auxiliaram e me ensinaram com muita paciência, em especial a Dulce e Doroteo.

Aos professores pelo conhecimento transmitido.

A todos que de alguma forma contribuíram para minha formação, se cheguei até aqui foi porque sempre estiveram ao meu lado.

MUITO OBRIGADA!

RESUMO

Em virtude da crescente demanda no setor florestal, ocorreu a intensificação das operações de colheita florestal mecanizada, em substituição à colheita manual ou semimecanizada. Contudo, a mecanização empregada na colheita da madeira pode vir a comprometer a sustentabilidade do solo, uma vez que essas operações envolvem o tráfego intenso e pesado de máquinas sobre o solo, podendo causar a compactação do solo quando empregadas de forma inadequada. Desta forma, o objetivo do trabalho foi elaborar modelos de capacidade de suporte de carga (MCSC) para um solo argiloso cultivado com eucalipto e avaliar os impactos em diferentes talhões das operações de colheita florestal proporcionados pelos maquinários Skidder, Feller, Desganhadora e Garra Traçadora. As amostras de solo foram coletadas com estrutura preservada nas camadas superficial (0 a 3 cm) e profunda (30 a 33 cm). Para a elaboração dos MCSC as amostras foram coletadas antes das operações de colheita florestal, sendo coletadas 120 amostras e para avaliação dos impactos foram coletadas amostras após o tráfego dos maquinários, totalizando 320 amostras. Todos os equipamentos avaliados promoveram compactação adicional do solo nas camadas avaliadas nas condições do manejo empregado, sendo o equipamento que promoveu maior compactação foi o Feller Buncher e o que promoveu menor compactação foi a Desganhadora.

Palavras-chave: Compactação do solo. Eucalipto. Modelos de capacidade de suporte de carga. Operações mecanizadas da colheita florestal.

ABSTRACT

Due to the increasing demand in the forestry sector, mechanized forest harvesting operations intensified, replacing manual or semi-mechanized harvesting. However, the mechanization used in timber harvesting operations may come to compromise the sustainability of the soil, since these operations involve heavy and heavy machinery traffic on the soil, and can cause soil compaction when used improperly. Thus, the objective of the work was to develop of load bearing capacity models (LBCM) for a clayey soil cultivated with eucalyptus and to evaluate the impacts on different plots of forest harvesting operations provided by Skidder, Feller Buncher, Shredder and Grapple Saw, in the superficial (0 to 3 cm) and deep (30 to 33 cm) layers. The soil samples were collected with a preserved structure, that is, unformed. For the preparation of the LBCM the samples were collected before the forest harvesting operations, 120 samples were collected and for impact assessment samples were collected after the machinery traffic, totaling 320 samples. 5 LBCM were created to represent all plots and layers evaluated. All the evaluated equipment promoted additional soil compaction in the layers evaluated under the management conditions used, with the equipment that promoted greater compaction being the Feller Buncher and the one that promoted less compaction was the Shredder.

Keywords: Soil compaction. Eucalyptus. Load bearing capacity models. Mechanized forest harvesting operations.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DO ESTUDO	1
2.1 A cultura do eucalipto	1
2.2 A mecanização da colheita florestal	2
2.3 Descrição das máquinas analisadas	3
2.3.1 Desgalhadora	3
2.3.2 Feller Buncher	4
2.3.3 Garra Traçadora	5
2.3.4 Skidder	6
2.4 Compactação do solo na cultura do eucalipto	8
2.5 Pressão de pré-consolidação	9
3. MATERIAL E MÉTODOS	11
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	14
5. CONCLUSÕES	24
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	25

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desgalhadora.	4
Figura 2 - Feller Buncher.	5
Figura 3 - Garra Traçadora.	6
Figura 4 - Skidder.	7
Figura 5 - Esquema representando o solo em condições de compactação.	9
Figura 6 - Curva de compressão do solo.	10
Figura 7 - Modelo de capacidade de suporte de carga, segundo critérios adotado por Dias Junior.	13
Figura 8 - Modelos de Capacidade de Suporte de Carga (MCSC) nos diferentes talhões e camadas.	16
Figura 9 - Modelo de capacidade de suporte de carga do talhão 27 da camada de 0 a 3 cm, com os resultados das pressões de pré-consolidação e umidade obtidos nas amostras de impactos dos diferentes tipos de maquinários florestais.	17
Figura 10 - Modelo de capacidade de suporte de carga do talhão 27 da camada de 30 a 33 cm, com os resultados das pressões de pré-consolidação e umidade obtidos nas amostras de impactos dos diferentes tipos de maquinários florestais.	17
Figura 11 - Modelo de capacidade de suporte de carga do talhão 55 da camada de 0 a 3 cm, com os resultados das pressões de pré-consolidação e umidade obtidos nas amostras de impactos dos diferentes tipos de maquinários florestais.	18
Figura 12 - Modelo de capacidade de suporte de carga do talhão 55 da camada de 30 a 33 cm, com os resultados das pressões de pré-consolidação e umidade obtidos nas amostras de impactos dos diferentes tipos de maquinários florestais.	19
Figura 13 - Modelo de capacidade de suporte de carga do talhão 80 da camada de 0 a 3 cm, com os resultados das pressões de pré-consolidação e umidade obtidos nas amostras de impactos dos diferentes tipos de maquinários florestais.	20
Figura 14 - Modelo de capacidade de suporte de carga do talhão 80 da camada de 30 a 33 cm, com os resultados das pressões de pré-consolidação e umidade obtidos nas amostras de impactos dos diferentes tipos de maquinários florestais.	20
Figura 15 - Modelo de capacidade de suporte de carga do talhão 89 da camada de 0 a 3 cm, com os resultados das pressões de pré-consolidação e umidade obtidos nas amostras de impactos dos diferentes tipos de maquinários florestais.	21
Figura 16 - Modelo de capacidade de suporte de carga do talhão 55 da camada de 0 a 3 cm, com os resultados das pressões de pré-consolidação e umidade obtidos nas amostras de impactos dos diferentes tipos de maquinários florestais.	22

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Análise de densidade de partículas (Dp) e textura.	12
Tabela 2 - Comparação dos modelos de capacidade de suporte de carga entre as camadas de cada talhão, de acordo com o procedimento descrito em Snedecor e Cochran (1989).	14
Tabela 3 - Comparação dos modelos de capacidade de suporte de carga entre as camadas e os talhões, de acordo com o procedimento descrito em Snedecor e Cochran (1989).	15

1. INTRODUÇÃO

A necessidade do consumo de madeira como matéria prima em vários setores da cadeia produtiva tem apresentado um crescimento constante devido principalmente ao aumento populacional. Esse aumento está associado ao crescimento econômico e, o eucalipto vem sendo a principal fonte dessa matéria prima. Impactos negativos oriundos das plantações florestais no ambiente têm sido observados devido ao manejo incorreto do maquinário utilizado, principalmente na colheita florestal.

Para atender esta demanda, empresas florestais começaram a investir em inovação e tecnologia, otimizando sua cadeia produtiva, com máquinas cada vez mais eficientes e com maior rendimento operacional, porém são máquinas mais pesadas e com maior potencial de degradação da estrutura do solo. Este potencial de degradação está associado à alta carga aplicada na superfície do solo por estas máquinas, a qual pode ultrapassar a capacidade de suporte de carga do solo, ocasionando efeitos como a compactação do solo, degradação da sua estrutura física e redução da porosidade do mesmo, gerando consequências indesejáveis ao sistema radicular das plantas.

A compactação do solo é considerada como a diminuição do volume de macroporos do solo ocasionada por compressão de origem antrópica devido ao manejo inadequado do solo, acarretando num rearranjo mais denso das partículas do solo e consequente redução da porosidade. Também pode se dizer que a compactação do solo refere-se à compressão do solo não saturado durante a qual existe um aumento da densidade do solo em consequência da redução do seu volume de macroporos (DIAS JUNIOR; PIERCE, 1996; DIAS JUNIOR et. al., 2008; GUPTA et al., 1989; GUPTA; ALLMARAS, 1997).

Para minimizar os impactos na estrutura do solo é necessário conhecer seus atributos físicos como textura, densidade do solo, porosidade, e, a capacidade suporte de carga de cada solo em função da umidade, a fim de determinar qual a máxima carga poderá ser aplicada naquela determinada classe de solo sem causar compactação adicional.

Sendo assim, o presente trabalho teve como objetivo elaborar modelos de capacidade de suporte de carga (MCSC) para um solo cultivado com eucalipto e avaliar os impactos dos diferentes tipos de maquinários florestais utilizados na colheita florestal.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DO ESTUDO

2.1 A cultura do eucalipto

As plantações de eucalipto abrangeram em 2018 cerca de 5,7 milhões de hectares, representando 73% da área total do setor, e está localizada principalmente nos estados de

Minas Gerais (24%), São Paulo (17%) e Mato Grosso do Sul (16%) (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES, 2019).

O gênero *Eucalyptus* se originário da Austrália e da Oceania, embora algumas espécies sejam provenientes de ilhas como Nova Guiné e Timor, bem como das Ilhas Molucas (ANDRADE, 1918). As empresas do ramo florestal selecionam cada vez mais espécies florestais de rápido crescimento, como espécies exóticas. Isso se deve à diversificação do uso da madeira e à fácil adaptação a diferentes condições edafoclimáticas. Diversas espécies florestais são cultivadas para diferentes fins, com a finalidade de suprir a demanda por madeira como matéria prima, o que anteriormente eram originadas de florestas nativas (WOLFF II, 2012).

As florestas trazem efeitos positivos não somente para o meio ambiente, mas esses efeitos podem também serem notados na economia do país, como evidenciado pelo comércio do Brasil com o mundo (ASSOCIAÇÃO BAIANA DAS EMPRESAS DA BASE FLORESTAL, 2016). O setor florestal representa 1,3% do PIB e 6,9% do PIB industrial, sendo as exportações de suma importância para impulsionar o crescimento do setor (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES, 2019).

A crescente demanda no setor florestal e sua mecanização acarretou diversas mudanças no contexto social, como: redução da força de mão de obra e de acidentes, aprimoramento das habilidades profissionais, aumento dos salários e redução dos custos de produção (FREITAS, 2008). Atualmente, cerca de 4 milhões de pessoas estão diretamente e indiretamente empregadas no país no setor florestal (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES, 2019).

2.2 A mecanização da colheita florestal

O crescimento da demanda por produtos florestais incentivou o planejamento dos processos produtivos das empresas, valorizando o grau de competitividade das mesmas. Dentro do setor florestal, uma das atividades considerada mais importante é a colheita florestal, visto ser a mais onerosa em termos de custo e produção (FREITAS, 2005).

A colheita florestal pode ser definida como um conjunto de operações efetuadas no maciço florestal, que visa preparar e extrair a madeira até o local de transporte, utilizando-se de técnicas e padrões estabelecidos a fim de transformá-la em produto final (MACHADO, 2002). A colheita é composta pelas etapas de corte (derrubada, desgalhamento e processamento ou traçamento), descascamento, quando executado no campo; e de extração e carregamento (SANTOS, 2000). É o trabalho executado desde o corte das árvores até o

transporte para o local de uso final. A operação de colheita, dependendo da situação, envolve também o planejamento da operação, a medição, o recebimento no pátio da indústria e a comercialização (FREITAS, 2005).

O processo realizado para a colheita florestal sofreu forte influência da mecanização nas últimas décadas. Muitas empresas guiadas pela necessidade de redução de custos operacionais, bem como redução da mão de obra de algumas regiões, adotaram a mecanização (YAMASHITA, 2002). A mecanização florestal está presente nas seguintes atividades: o preparo inicial do solo, o preparo periódico do solo, manutenções/tratamentos silviculturais e colheita, além do transporte (LIMA; LEITE, 2014).

Até a década de 1940 praticamente não havia emprego de maquinários nas operações de colheita florestal (MACHADO, 2008). De acordo com Valverde (1995), a modernização das máquinas florestais teve início na década de 70, com produção de máquinas leves e de porte médio, e a partir deste período, houve um aumento do fornecimento de máquinas e equipamentos para o setor florestal.

A partir da década de 1980 surgiram grandes alterações tecnológicas na colheita florestal, como a substituição das motosserras pelo Feller Buncher e Harvester (MALINOVSKI et al., 2008). Nessa década surgiram também os Skidders, os quais passaram a substituir os tratores agrícolas adaptados para o processo de extração florestal.

A colheita de florestal no Brasil teve sua tecnologia originada da colheita de florestas nativas, cuja tecnologia, inapropriada, foi gradativamente modificada e trocada por outras alternativas (HAKKILA et al., 1992). A colheita florestal mecanizada segundo Machado (2006), teve início no Brasil anos 80 com as empresas de médio e pequeno porte, onde surgiu a modernização dos equipamentos florestais.

Diante da grande quantidade de máquinas e equipamentos de corte e extração disponíveis no mercado, as empresas podem formar vários conjuntos de colheita que podem ser empregados, cabendo a cada empresa optar por aquele que seja mais adequado às suas peculiaridades (JACOVINE et al., 2005).

2.3 Descrição das máquinas analisadas

2.3.1 Desganhadora

A Desganhadora florestal foi desenvolvida pela equipe da gerência de Colheita da Aperam Bioenergia, este teve como objetivo aumentar a eficiência da operação de

desgalhamento, oferecendo elevada segurança e rendimento operacional (SOCIEDADE DE INVESTIGAÇÕES FLORESTAIS, 2014).

A Desgalhadora florestal é uma máquina que tem como finalidade desgalhar árvores, seu peso é aproximadamente 15 toneladas. Sendo composto por máquina base, com estrutura de carregadora, com rodados de pneus, equipado com um implemento acoplado ao braço hidráulico da máquina. Ainda possui um implemento com discos planos recortados que pode ser acoplado em Skidders ou em outros modelos de máquinas-base (INSTITUTO DE PESQUISA E ESTUDOS FLORESTAIS, 2012).

Seu funcionamento é relativamente simples, sendo que após o Feller Buncher deixar as árvores amontoadas em feixes no interior do talhão ou após o Skidder arrastar as árvores para a margem do talhão, a Desgalhadora florestal passa sobre as copas das árvores executando o desgalhamento das árvores até deixar o fuste isento de galhos (INSTITUTO DE PESQUISA E ESTUDOS FLORESTAIS, 2012).

Figura 1 - Desgalhadora.



Fonte: IPEF (2012)

2.3.2 Feller Buncher

O surgimento do Feller Buncher no Brasil é relatado no fim da década de 70, quando, com base em modelos de máquinas americanas, a empresa Olinkraft desenvolveu um equipamento de corte acionado por uma bomba hidráulica que, ligada ao motor de uma máquina base, acionava duas laminas em forma de tesoura, efetuando, desta maneira, o corte da árvore (SANT'ANNA, 2014).

O Feller Buncher ou trator florestal cortador e acumulador consiste em um trator com rodados de pneus ou de esteira equipado com um cabeçote que realiza o corte e empilhamento das árvores (MACHADO, 2002). Segundo Malinovski e Malinovski (1998), este trator florestal possui um implemento frontal, que realiza o corte, acumula árvores cortadas (formação de feixe) e em seguida a deposição sobre o terreno para facilitar a operação posterior (desgalhamento, traçamento ou arraste).

O cabeçote é uma peça de construção rígida, como em outros tratores, onde está localizado o órgão ativo de corte, composto por um disco dentado, ou uma tesoura de dupla ação, ou uma serra/sabre, e os braços acumuladores, todos acionados por um sistema hidráulico (LIMA; LEITE, 2014).

O corte das árvores efetuado pelo Feller Buncher se dá na fixação da árvore por duas garras à altura média do peito e, em seguida, no corte um pouco acima do nível do solo, com o disco de corte. Em seguida, o braço acumulador é acionado, onde a árvore é firmada no cabeçote, reabre as garras e demanda a máquina para a próxima operação, até que se atinja a capacidade de carga (MACHADO; LOPES, 2002).

No atual mercado existem várias marcas e modelos do Feller Buncher, onde sua potência varia entre 50 a 90 kW, e o seu peso aproximadamente é de 20 toneladas.

Figura 2 - Feller Buncher.



Fonte: TIGER (2020)

2.3.3 Garra Traçadora

A Garra Traçadora é uma máquina adaptada a uma retroescavadora, normalmente com mecanismo de movimentação de esteiras, que tem como função o traçamento dos fustes

num tamanho preestabelecido (LOPES, 2007; LIMA; LEITE, 2014). O maquinário geralmente fica nas margens das estradas/carreadores, onde pega os feixes de madeira e faz o traçamento, formando pilhas para futuro carregamento.

O volume de árvores traçadas pode estar relacionado ao tamanho do cabeçote utilizado, potência da máquina base e diâmetro médio das árvores (LOPES et al., 2008). A Garra Traçadora existe no mercado em vários modelos e marcas, onde sua potência varia entre 70 a 170 kW e seu peso entre 8,5 a 16,5 toneladas.

Figura 3 - Garra Traçadora.



Fonte: TMO (2017)

2.3.4 Skidder

O trator florestal Skidder surgiu por volta de 1960, ganhando visibilidade por ser um veículo versátil, forte, fácil de operar, com elevada eficiência e econômico. Os Skidders são tratores florestais arrastadores e articulados que realizam o arraste das árvores da área de corte até a margem da estrada/carreadores ou pátio intermediário (SOUZA et al., 2000). Este é articulado com tração 4x4 ou 6x6, e com os pneus nas mesmas dimensões. O maquinário é projetado para trabalhar nos sistemas de árvores inteiras e/ou toras compridas (LEITE; LIMA, 2014), onde sua potência varia entre 100 a 130 kW, e o seu peso pode variar de 10 a 16,3 toneladas.

A eficiência operacional do Skidder é afetada pela distância de arraste, ou seja, a medida em que se aumenta a distância de arraste para um mesmo volume de madeira, diminui-se sua eficiência (LEITE; LIMA, 2014).

Segundo Castro e Seixas (2014), a capacidade de carga do maquinário depende de uma série de variáveis que são influenciadas com as mudanças que ocorrem no teor de água do solo e sua textura. Sendo essas variáveis a resistência ao rolamento, coeficiente de tração e atrito onde a carga se apoia no solo durante a extração.

Os Skidders podem ser classificados quanto ao tipo de rodado (esteiras ou pneus) e quanto aos tipos de Skidder (com cabo - chocker Skidder, com garra - grapple Skidder e com pinças invertidas) (CASTRO; SEIXAS, 2014).

As esteiras podem ser consideradas como rígidas e flexíveis. Segundo Seixas (2008), as esteiras rígidas são indicadas quando se tem baixa velocidade para aplicações que exigem muita potência para empurrar ou puxar uma carga. Já as esteiras flexíveis são indicadas quando é desejada maior velocidade e a habilidade de empurrar ou puxar cargas mais pesadas for menos importante.

Cada tipo de Skidder é indicado para determinada situação. Segundo Seixas (2008), os Skidders com cabo (chocker Skidder) são indicados para extração de toras dispersas na área, geralmente em área de colheita de madeira seletiva, onde apenas algumas árvores são removidas do povoamento. Este também é ideal para operações em terrenos acidentados ou ainda em terrenos íngremes. Já o Skidder com garra (grapple Skidder) é indicado para o arraste de toras que foram previamente empilhadas, tornando-se indispensável quando o corte for realizado por um trator Feller Buncher (MACHADO, 1984). E o Skidder com pinças invertidas (clambunk Skidder), segundo Machado (1984), é indicado quando se deseja elevada capacidade de carga e extração de toras dispersas ou não na área de extração, sendo recomendado para operar em terrenos acidentados ou com baixa sustentação.

Figura 4 - Skidder.



Fonte: TIGER (2020)

2.4 Compactação do solo na cultura do eucalipto

A crescente monocultura de eucalipto gerou críticas e discussões a respeito de seus efeitos (positivos e negativos) sobre a água, o ar, o solo e a biodiversidade. Com o incremento da mecanização nas operações de colheita florestal empresas passaram a utilizar maquinários cada vez mais pesados nas operações, agravando, assim, os processos de degradação do solo (SEIXAS; JUNIOR, 2001).

Durante as operações de colheita da madeira, as máquinas trafegam várias vezes sobre o mesmo local dentro do povoamento florestal, podendo causar a compactação do solo e provocar alterações nas suas propriedades físicas, afetando o seu potencial produtivo (LOPES et al., 2006). Para Andrade (2014), o tráfego intenso de máquinas durante a colheita e baldeio florestal é considerado a principal atividade que promove a degradação da estrutura do solo em áreas florestais, principalmente a compactação.

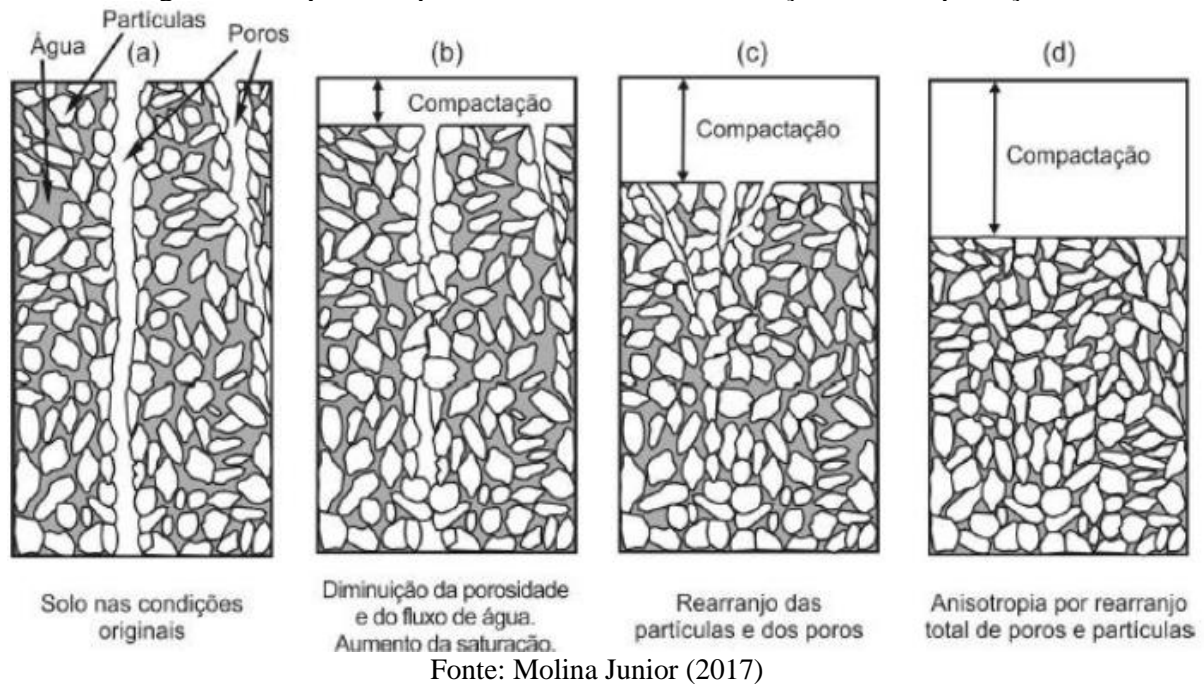
Em consequência, a estrutura do solo é modificada, havendo aproximação das partículas, com redução no volume por elas ocupado, o que traz incremento na densidade do solo e resistência mecânica à penetração de raízes, redução do volume e continuidade dos poros (REICHERT et al., 2010).

A umidade afeta diretamente a capacidade de suporte de carga do solo ao tráfego (DIAS JUNIOR et al., 2004). Sendo a compactação máxima quando a umidade do solo é elevada até uma condição crítica para esse processo. E, a umidade crítica de compactação está contida na faixa de umidade onde o tráfego de máquinas é realizado (FIGUEIREDO et al., 2000; REICHERT et al., 2007, 2009, 2010). Sugere-se que o tráfego de máquinas não seja realizado quando a umidade do solo for aproximadamente igual ao limite de plasticidade (FIGUEIREDO et al., 2000). Segundo Dias Junior et al. (2007), quando o solo apresenta maior conteúdo de água, maior é a probabilidade de degradação da sua estrutura por apresentar maior suscetibilidade, no entanto, menor umidade do solo, implica em maior capacidade de suportar cargas.

O tráfego em áreas cultivadas com eucalipto é muito preocupante devido à possibilidade de compactação (DIAS JUNIOR et al., 2005, 2007; SILVA et al., 2007), principalmente quando esse tráfego é realizado em condições inadequadas de umidade do solo e por vários ciclos da exploração florestal (RAPER, 2005; HANZA; ANDERSON, 2005; SILVA et al., 2007, 2009).

Segundo Lima (2004), o termo compactação do solo está relacionado à redução do volume de poros não saturados quando certa pressão externa é aplicada, como demonstrado na figura 5.

Figura 5 - Esquema representando o solo em condições de compactação.



A compactação da camada superficial do solo está relacionada à área de contato pneu solo e à pressão interna dos pneus agrícolas, e a compactação em profundidade está diretamente relacionada à carga radial (BOTTA et al., 2008), que é definida como a carga atuando no sentido da dimensão principal. Reichert et al. (2007) cita que em áreas agrícolas, a compactação ocorre até os 0,20 m de profundidade e em áreas florestais atinge maiores profundidades, podendo ocorrer até 0,50 m de profundidade.

A compactação resulta em problemas ambientais, agronômicos e econômicos como inundação, erosão, lixiviação de agroquímicos, emissão de gases de efeito estufa e perda de rendimento das culturas agrícolas (KELLER; LAMANDÉ, 2010). Também pode reduzir a infiltração e a redistribuição de água, além de dificultar a penetração das raízes no perfil do solo, podendo limitar a absorção de nutrientes pelas plantas (SUZUKI et al., 2008).

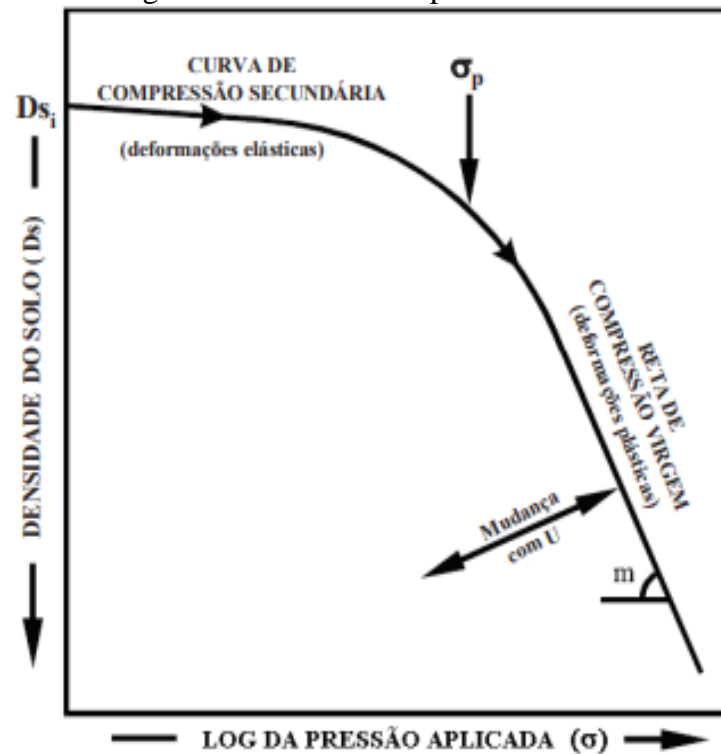
2.5 Pressão de pré-consolidação

A pressão de pré-consolidação do solo é um indicador da máxima carga à qual o solo foi submetido no passado (DIAS JUNIOR, 2000; SILVA et al., 2010), sendo esta considerada como um indicador da qualidade estrutural do solo (SEVERIANO et al., 2010) e uma ferramenta capaz de identificar a real degradação nos solos (IORI et al., 2012).

A pressão de pré-consolidação pode ser obtida a partir da curva de compressão do solo, onde está representada graficamente a relação entre o logaritmo da pressão aplicada e a

densidade do solo ou índice de vazios (CASAGRANDE, 1936; DIAS JUNIOR; PIERCE, 1996; HORTZ; KOVACS, 1981; KONDO, 1998).

Figura 6 - Curva de compressão do solo.



Fonte: Adaptado de Dias Junior (1994)

A fim de avaliar a capacidade de suporte de carga de solos parcialmente saturados, o ensaio de compressão uniaxial tem sido utilizado para obter a pressão de pré-consolidação, considerando a curva de compressão (DIAS JUNIOR; MARTINS, 2017).

A curva de compressão do solo é constituída de duas regiões, sendo uma região de deformações elásticas e recuperáveis, chamada de curva de compressão, e uma região de deformações plásticas e irrecuperáveis, chamada de curva de compressão virgem (LARSON et al., 1980; DIAS JUNIOR; PIERCE, 1995; GREGORY et al., 2006; LEBERT et al., 2007, SEVERIANO et al., 2010; SOUZA et al., 2012). O ponto que separa essas duas regiões na curva de compressão do solo é a pressão de pré-consolidação (σ_p).

A capacidade de suporte de carga do solo relaciona a pressão de pré-consolidação à umidade do solo, já que esta reduz a resistência interna do solo, o que o torna mais suscetível ao processo compressivo (IMHOFF et al., 2004; SUZUKI et al., 2008). A capacidade de suporte de carga é definida como a máxima capacidade da estrutura do solo em resistir a tensões induzidas pelo tráfego de máquinas ou pisoteio animal, sem promover compactação adicional do solo, preservando suas características estruturais.

Analisando a relação da pressão de pré-consolidação e umidade, constata-se que quanto mais seco e compactado estiver o solo, maior será a capacidade de suporte de carga (SECCO, 2003). Também, diante de baixa umidade um solo apresentará maior pressão de pré-consolidação e conseqüentemente, maior capacidade suporte de carga e menor possibilidade de ocorrência da compactação do solo.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo se deu em áreas de plantio de eucalipto comercial da empresa EUCATEX AGRO-FLORESTAL LTDA, na Fazenda Vitória, em Capão Bonito, São Paulo. O município está situado na mesorregião de Itapetininga localizado nas coordenadas 24°00'S latitude 48°22'W longitude com uma altitude média de 702 m. Segundo a classificação internacional de Koppen o clima é classificado como Cfa, subtropical com verão quente e estação seca moderada no inverno, com temperatura média anual de 19,1°C (Setzer, 1966).

As amostras foram coletadas em quatro talhões de um solo argiloso, identificados como talhão 27, talhão 55, talhão 80 e talhão 89, sendo estas amostras de solo coletadas com estrutura preservada, ou seja, indeformadas. Em cada ponto amostral foram coletadas amostras em duas camadas, que foram determinadas no exame de campo, o qual consistiu na abertura de perfis de solo, determinando-se quais camadas apresentaram maior restrição. As camadas escolhidas foram as camadas de 0 a 3 cm, sendo considerada como superficial e 30 a 33 cm, sendo considerada como profunda. Em diagnóstico de campo, foi identificada uma camada subsuperficial de maior resistência à penetração, sendo esta, a camada destinada à coleta de amostras e à avaliação de impacto do manejo do maquinário de colheita florestal.

Para a elaboração dos modelos de capacidade de suporte de carga do solo (MCSC) as amostras foram coletadas antes das operações de colheita florestal, sendo coletadas em cada talhão e camada, totalizando 120 amostras (4 talhões x 2 camadas x 15 repetições). Para avaliação dos impactos foram coletadas amostras após o tráfego dos maquinários (Skidder, Feller, Desgalhadora e Garra Traçadora), nos talhões e nas duas camadas, totalizando 320 amostras (4 máquinas x 4 talhões x 2 camadas x 10 repetições).

Para coletar as amostras indeformadas foi utilizado o amostrador do tipo Uhland com auxílio de cilindros metálicos, os quais mediram aproximadamente 2,5 cm de altura x 6,5 cm de diâmetro. Após a coleta, as amostras foram envoltas em filme plástico, parafinadas e conduzidas ao laboratório para análises.

No laboratório, as amostras foram preparadas, retirando o excesso de solo, de maneira que o volume do solo a ser avaliado corresponda ao volume do cilindro. As amostras para a

elaboração dos MCSC foram então pesadas, saturadas, e secas naturalmente ao ar até atingir umidades desejadas entre 0,05 a 0,5 m³, controlando-as em função da massa da amostra. Na sequência, as amostras foram submetidas ao ensaio de compressão uniaxial de acordo com a metodologia de Dias Junior e Martins (2017) usando consolidômetros com ar comprimido (modelo S-450, Durham GeoSlope).

Com o excesso de solo retirado dos cilindros contendo as amostras, foram feitas análises de textura pelo método da pipeta e análises de densidade de partículas pelo método do picnômetro (DONAGEMMA et al., 2017), cujos resultados encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1 - Análise de densidade de partículas (Dp) e textura.

Talhões	Camadas (cm)	Dp (g cm ⁻³)	Argila (g kg ⁻¹)	Silte (g kg ⁻¹)	Areia (g kg ⁻¹)	Classe Textural
27	0 – 3	2,65	470	107	423	Argiloso
	30 – 33	2,65	490	115	395	Argiloso
55	0 – 3	2,65	560	123	347	Argiloso
	30 – 33	2,65	504	163	333	Argiloso
80	0 – 3	2,65	573	130	297	Argiloso
	30 – 33	2,65	543	157	300	Argiloso
89	0 – 3	2,65	537	193	270	Argiloso
	30 – 33	2,65	590	177	233	Argiloso

Fonte: Elaborado pela autora (2020)

As amostras coletadas para a avaliação dos impactos do manejo foram submetidas ao mesmo procedimento de preparo, exceto pelo processo de saturação e controle de umidade, sendo estas amostras submetidas ao ensaio de compressão uniaxial com a umidade natural de campo. Durante o ensaio de compressão uniaxial, foram aplicadas pressões de 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1600 kPa até a amostra apresentar 90% da sua deformação máxima (TAYLOR, 1948). Todas as amostras após o ensaio de compressão uniaxial foram secas em estufa a 105-110°C por 48 horas a fim de determinar a massa de solo seco e a umidade do solo, e conseqüentemente a densidade do solo. Com os resultados obtidos no ensaio de compressão uniaxial foram elaboradas as curvas de compressão do solo e a pressão de pré-

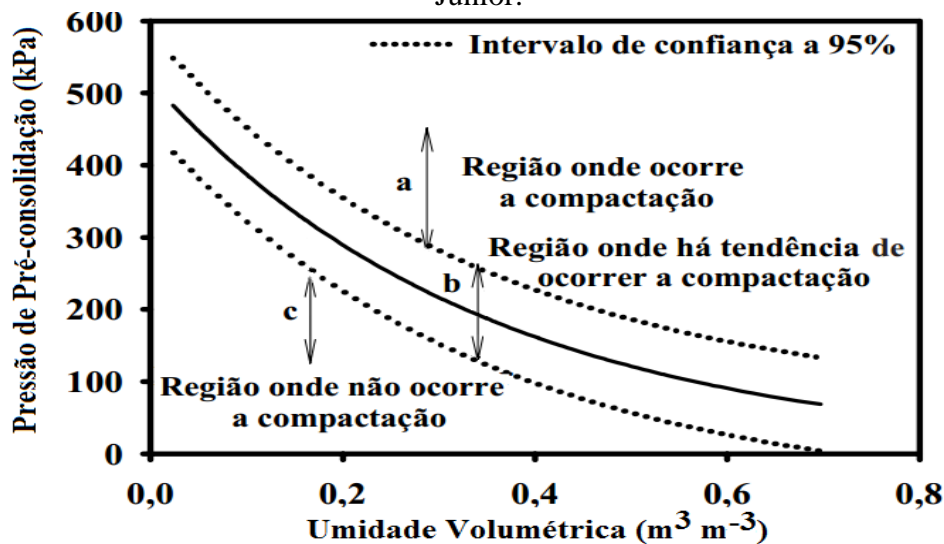
consolidação (σ_p) foi determinada de acordo com a metodologia de Dias Junior e Pierce (1994).

Os MCSC foram obtidos através da representação dos valores de pressão de pré-consolidação (σ_p) em função da umidade volumétrica (Θ) e ajustados ao modelo $\sigma_p = 10^{(a+b\Theta)}$, descrito por Dias Junior (2007) e comparados entre si, usando o procedimento descrito em Snedecor e Cochran (1989). Para cada talhão e suas respectivas camadas, foi elaborado um modelo de capacidade de suporte de carga, totalizando 8 MCSC. Em cada modelo representou os intervalos de confiança superiores e inferiores a 95% de confiança obtendo-se três regiões distintas, denominadas regiões a, b e c, como no representado na Figura 7.

Segundo critérios adotados por Dias Junior (2005), as três regiões do gráfico, podem ser interpretadas da seguinte maneira:

- a = é a região em que os valores de pressão de pré-consolidação determinados após o tráfego são superiores ao limite do intervalo de confiança superior, sendo considerada a região onde a compactação adicional do solo já ocorreu;
- b = é a região em que os valores de pressão de pré-consolidação determinados após o tráfego encontram-se entre os limites de confiança superior e inferior, sendo considerada uma área sem compactação, mas com tendência, caso as pressões aplicadas forem maiores que o limite superior do intervalo de confiança;
- c = região onde não ocorre compactação do solo, sendo os valores da pressão de pré-consolidação determinada após o tráfego menores que as do limite inferior do intervalo de confiança.

Figura 7 - Modelo de capacidade de suporte de carga, segundo critérios adotado por Dias Junior.



Fonte: Dias Junior (2005).

Após elaborar todos os modelos de capacidade de suporte de carga, os resultados das σ_p e Θ obtidos nas amostras para avaliação de impactos foram representados nos MCSC, a fim de avaliar os impactos dos diferentes tipos de maquinários florestais utilizados na colheita de eucalipto.

Após a representação gráfica dos resultados das amostras de impactos, foi verificada a quantidade de amostras em cada região do gráfico e expressas em porcentagem, sendo o total de amostras avaliadas equivalente a 100% de amostras, distribuídos nas três regiões do gráfico.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente foi elaborado os modelos de capacidade de suporte de carga para cada talhão e suas respectivas camadas e comparou-se os modelos de capacidade de suporte de carga entre as camadas de 0-3 cm e de 30-33 cm de cada talhão (tabela2). No talhão 27 não houve diferenças significativas nem no intercepto e nem no coeficiente angular. Desta forma, os dados das duas camadas foram agrupados e ajustados em um único modelo, enquanto os demais talhões apresentaram diferenças significativas entre as duas camadas avaliadas.

Tabela 2 - Comparação dos modelos de capacidade de suporte de carga entre as camadas de cada talhão, de acordo com o procedimento descrito em Snedecor e Cochran (1989).

Talhão	Comparação das Camadas		Homogeneidade	Coeficiente Angular (b)	Intercepto (a)
27	0 a 3 cm	_x 30 a 33 cm	H	NS	NS
55	0 a 3 cm	_x 30 a 33 cm	NH	NS	NS
80	0 a 3 cm	_x 30 a 33 cm	H	**	NS
89	0 a 3 cm	_x 30 a 33 cm	H	**	*

Legenda: H: homogêneo; NH: não homogêneo; NS: não significativo; **: significativo a 1%; *: significativo a 5%.

Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Posteriormente comparou-se o talhão 27 com as duas camadas agrupadas com os demais talhões nas camadas de 0 a 3 cm e 30 a 33 cm (tabela 3). O talhão 27 quando comparado com o talhão 89 na camada de 0 a 3 cm não foram diferentes estatisticamente, os quais foram agrupados e ajustados em um único modelo. O mesmo aconteceu com o talhão 55 na camada de 0 a 3 cm e o talhão 80 na camada de 0 a 3 cm, os quais não foram diferentes estatisticamente, sendo agrupados e ajustados em um único modelo. As demais comparações, apresentaram alguma diferença, sendo elaborado um modelo para cada condição.

Tabela 3 - Comparação dos modelos de capacidade de suporte de carga entre as camadas e os talhões, de acordo com o procedimento descrito em Snedecor e Cochran (1989).

Comparação dos Talhões e Camadas			Homogeneidade	Coefficiente Angular (b)	Intercepto (a)
27	x	55 (0 a 3 cm)	H	*	**
27	x	55 (30 a 33 cm)	H	NS	*
27	x	80 (0 a 3 cm)	H	*	NS
27	x	80 (30 a 33 cm)	H	*	NS
27	x	89 (0 a 3 cm)	H	NS	NS
27	x	89 (30 a 33 cm)	H	**	**
55 (0 a 3 cm)	x	80 (0 a 3 cm)	H	NS	NS
55 (30 a 33 cm)	x	80 (30 a 33 cm)	H	*	NS
55 (0 a 3 cm)	x	89 (0 a 3 cm)	H	NS	**
55 (30 a 33 cm)	x	89 (30 a 33 cm)	H	**	**
80 (0 a 3 cm)	x	89 (0 a 3 cm)	H	NS	**
80 (30 a 33 cm)	x	89 (30 a 33 cm)	H	NS	**

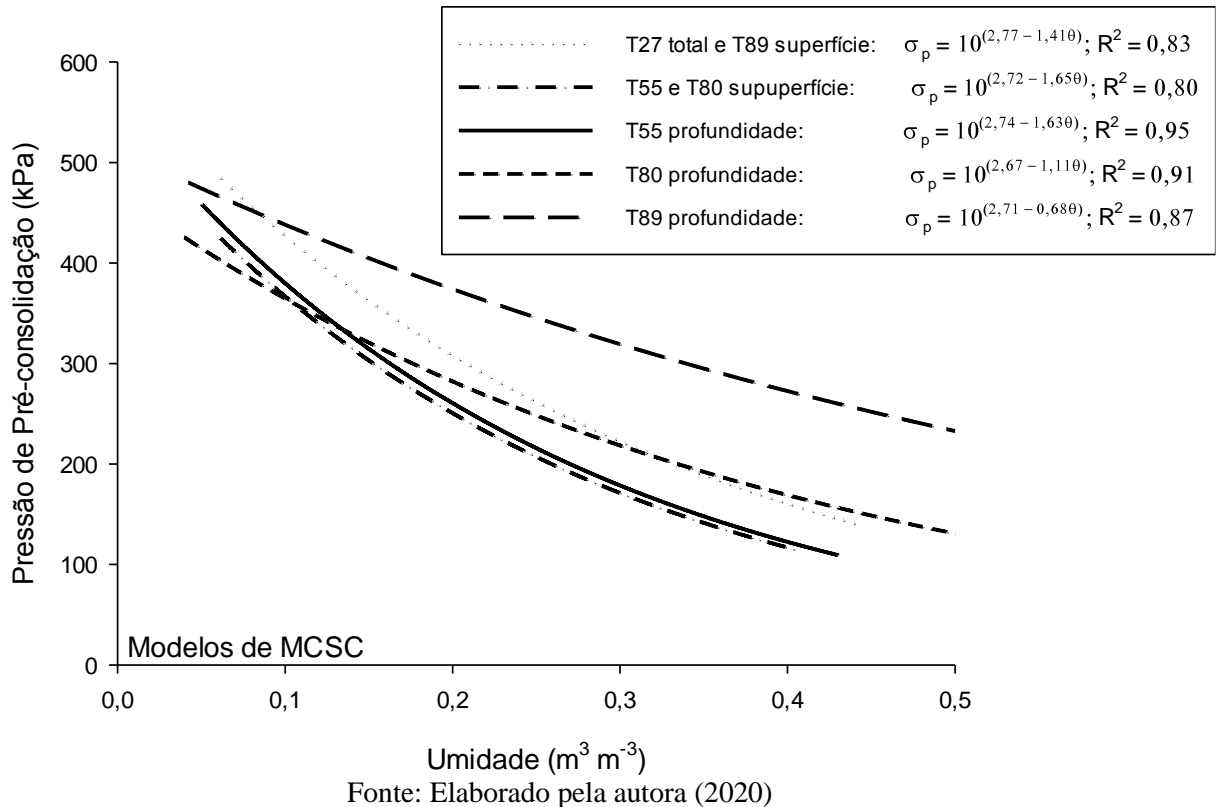
H: homogêneo; NH: não homogêneo; NS: não significativo; **: significativo a 1%; *: significativo a 5%.

Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Sendo assim, foram elaborados 5 modelos de capacidade de suporte de carga, sendo: um modelo para o talhão 27 e o talhão 89 na camada 0 a 3 cm, um modelo para a camada de 0 a 3 cm do talhão 55 e talhão 80, um modelo para o talão 55 na camada de 30 a 33 cm, um modelo para o talhão 80 na camada de 30 a 33 cm e um modelo para o talhão 89 na camada de 30 a 33 cm (Figura 8). Os valores dos parâmetros estimados do modelo de capacidade de suporte de carga [$\sigma_p = 10^{(a+b\theta)}$], variam de 2,67 a 2,77 para “a” e de -0,11 a -1,65 para “b”. Os coeficientes de determinação (R^2) variam de 0,80 a 0,95, sendo todos significativos.

Diante dos MCSC apresentados, é possível observar que o solo do T89 profundidade apresentou maior capacidade de suporte de carga do que os demais, sendo este mais resistente à compactação e mais restritivo ao desenvolvimento do sistema radicular (Figura 8). Também, podemos observar que a camada superficial do T55 e do T80 foi o mais suscetível à compactação e menos restritivo ao desenvolvimento do sistema radicular, e os demais modelos apresentaram comportamento intermediário. Os diversos resultados obtidos relacionados à suscetibilidade de compactação dos diferentes talhões e suas camadas, podem estar correlacionados à história de tensão induzida pelo manejo que esses solos foram submetidos no passado (DIAS JUNIOR, 1994; DIAS JUNIOR; PIERCE, 1996).

Figura 8 - Modelos de Capacidade de Suporte de Carga (MCSC) nos diferentes talhões e camadas.



Com relação ao impacto dos maquinários, nas figuras 9 e 10 estão apresentadas as análises do talhão 27, no qual a porcentagem de amostras compactadas na camada de 0 a 3 cm variou de 20% a 40%, sendo o Feller Buncher o maquinário que apresentou maior porcentagem de amostras compactadas, com 40%, seguido pela Desganhadora e Garra Traçadora com 30%, e Skidder com 20%. Na camada de 30 a 33 cm a porcentagem de amostras compactadas variou de 30% a 40%, sendo o Feller Buncher o maquinário que apresentou maior porcentagem de amostras compactadas, com 40%, seguido pela Garra Traçadora, Skidder e Desganhadora com 30% respectivamente. Dentre os maquinários analisados o Feller Buncher apresentou maior porcentagem de amostras compactadas em ambas as camadas avaliadas.

Figura 9 - Modelo de capacidade de suporte de carga do talhão 27 da camada de 0 a 3 cm, com os resultados das pressões de pré-consolidação e umidade obtidos nas amostras de impactos dos diferentes tipos de maquinários florestais.

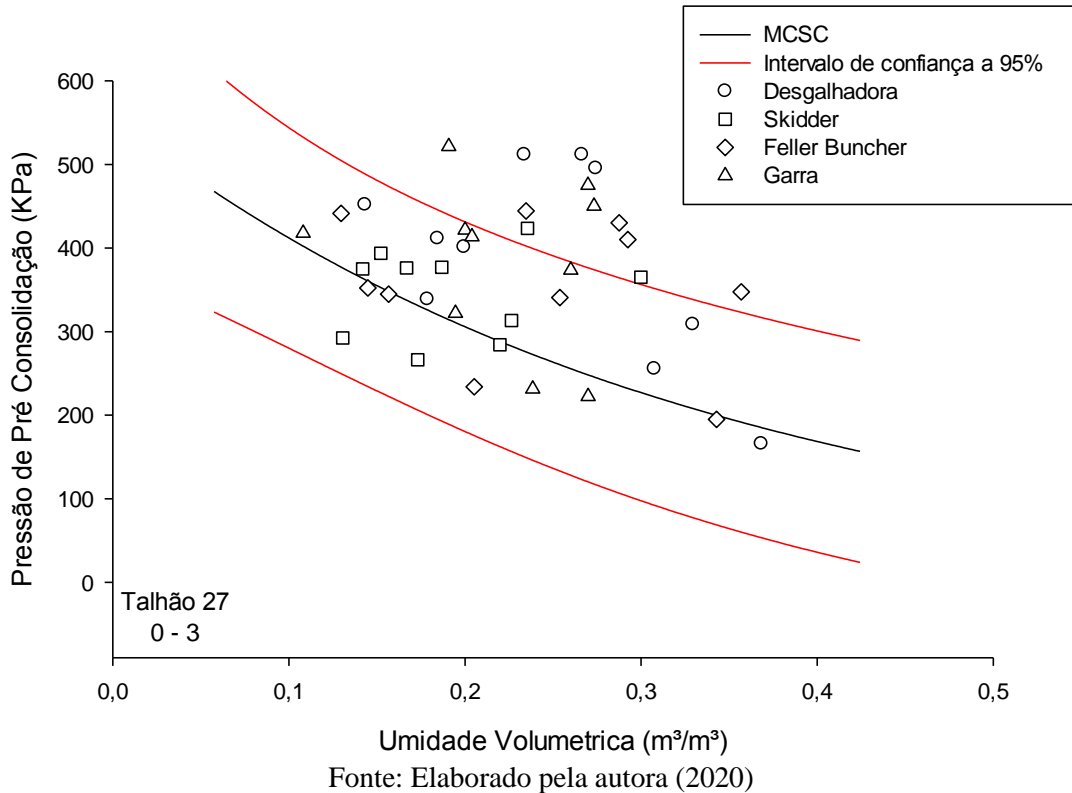
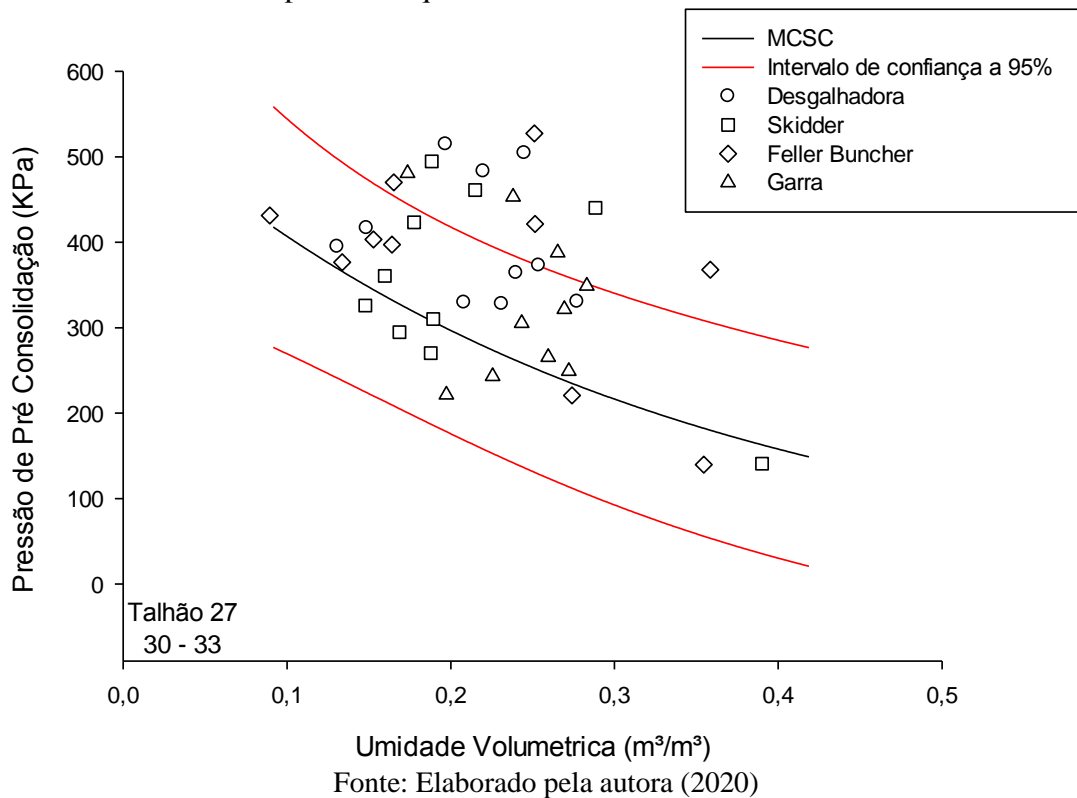


Figura 10 - Modelo de capacidade de suporte de carga do talhão 27 da camada de 30 a 33 cm, com os resultados das pressões de pré-consolidação e umidade obtidos nas amostras de impactos dos diferentes tipos de maquinários florestais.



As figuras 11 e 12 apresentam as análises do talhão 55, no qual a porcentagem de amostras compactadas na camada de 0 a 3 cm variou de 40% a 70%. Este talhão foi o que apresentou maior porcentagem de amostras compactadas na camada superficial, verificando que o resultado do seu modelo de capacidade de suporte de carga está coerente, pois este indicou que possui uma maior susceptibilidade a compactação.

O Feller Buncher é o maquinário que apresentou maior porcentagem de amostras compactadas, com 70%, seguido pela Garra Traçadora com 60%, Skidder com 50% e Desgalhadora com 40%. Na camada de 30 a 33 cm a porcentagem de amostras compactadas variou de 50% a 70%, sendo o Feller Buncher o maquinário que apresentou maior porcentagem de amostras compactadas, com 70%, seguido pela Garra Traçadora, Skidder com 60% e Desgalhadora com 50% respectivamente. Dentre os maquinários analisados o Feller Buncher apresentou maior porcentagem de amostras compactadas em ambas as camadas avaliadas.

Figura 11 - Modelo de capacidade de suporte de carga do talhão 55 da camada de 0 a 3 cm, com os resultados das pressões de pré-consolidação e umidade obtidos nas amostras de impactos dos diferentes tipos de maquinários florestais.

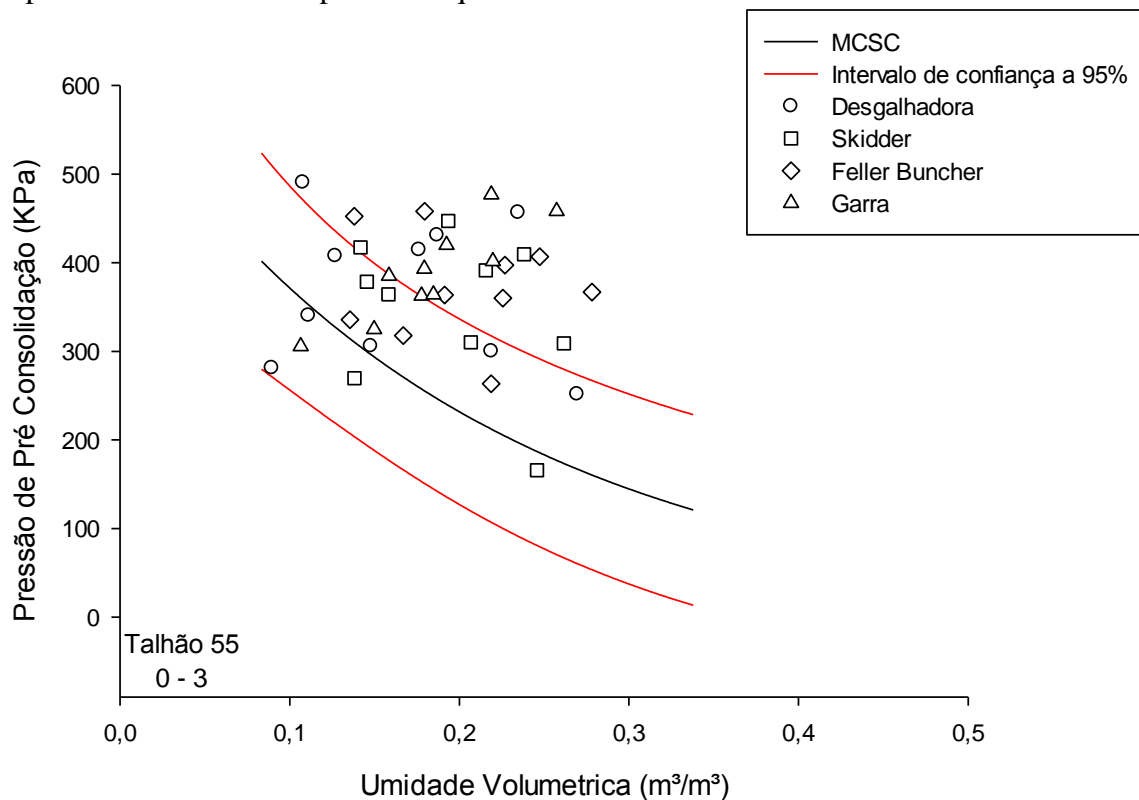
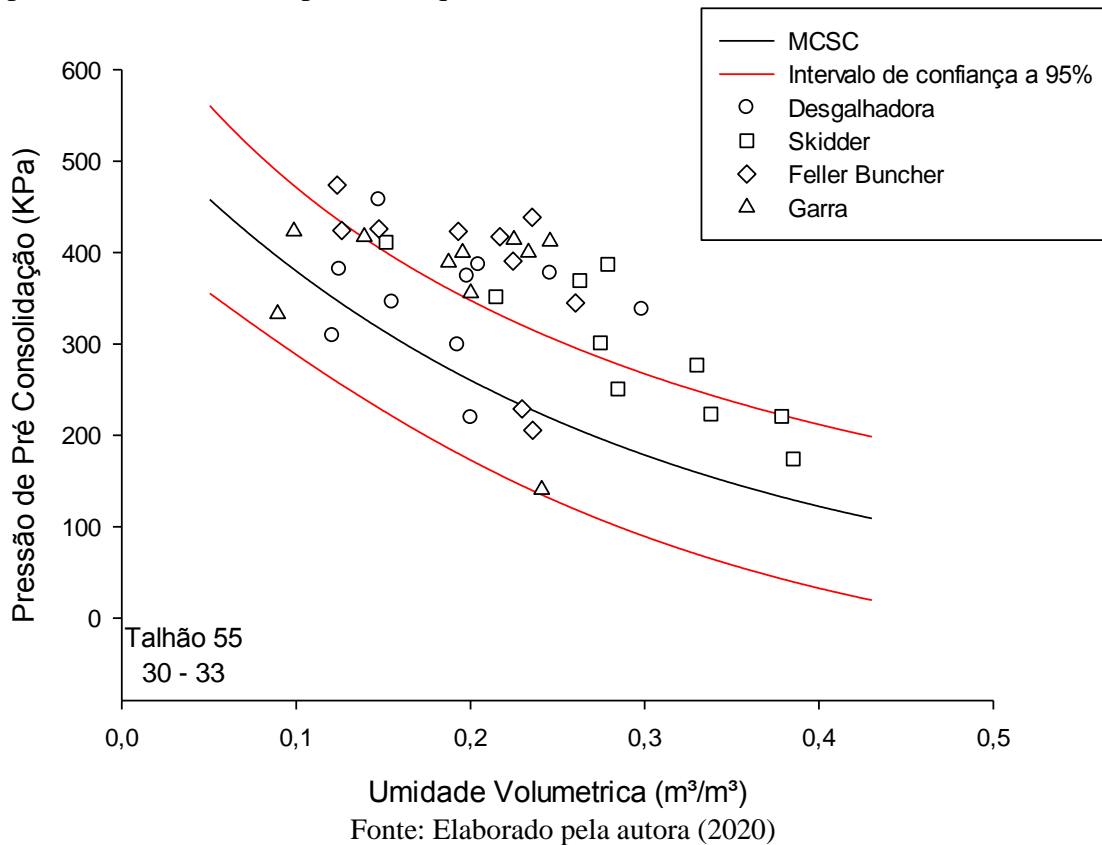


Figura 12 - Modelo de capacidade de suporte de carga do talhão 55 da camada de 30 a 33 cm, com os resultados das pressões de pré-consolidação e umidade obtidos nas amostras de impactos dos diferentes tipos de maquinários florestais.



As figuras 13 e 14 apresentam as análises do talhão 80, no qual a porcentagem de amostras compactadas na camada de 0 a 3 cm variou de 40% a 60%. Sendo este o segundo talhão com maior porcentagem de amostras compactadas na camada superficial, verificando que o resultado do seu modelo de capacidade de suporte de carga também está coerente. O Feller Buncher é o maquinário que apresentou maior porcentagem de amostras compactadas, com 60%, seguido pela Garra Traçadora e Skidder com 50%, e Desgalhadora com 40%. Na camada de 30 a 33 cm a porcentagem de amostras compactadas variou de 50% a 70%, sendo o Feller Buncher o maquinário que apresentou maior porcentagem de amostras compactadas, com 70%, seguido pelo Skidder com 60%, Garra Traçadora e Desgalhadora com 50% respectivamente. Dentre os maquinários analisados o Feller Buncher obteve maior porcentagem de amostras compactadas em ambas as camadas avaliadas.

Figura 13 - Modelo de capacidade de suporte de carga do talhão 80 da camada de 0 a 3 cm, com os resultados das pressões de pré-consolidação e umidade obtidos nas amostras de impactos dos diferentes tipos de maquinários florestais.

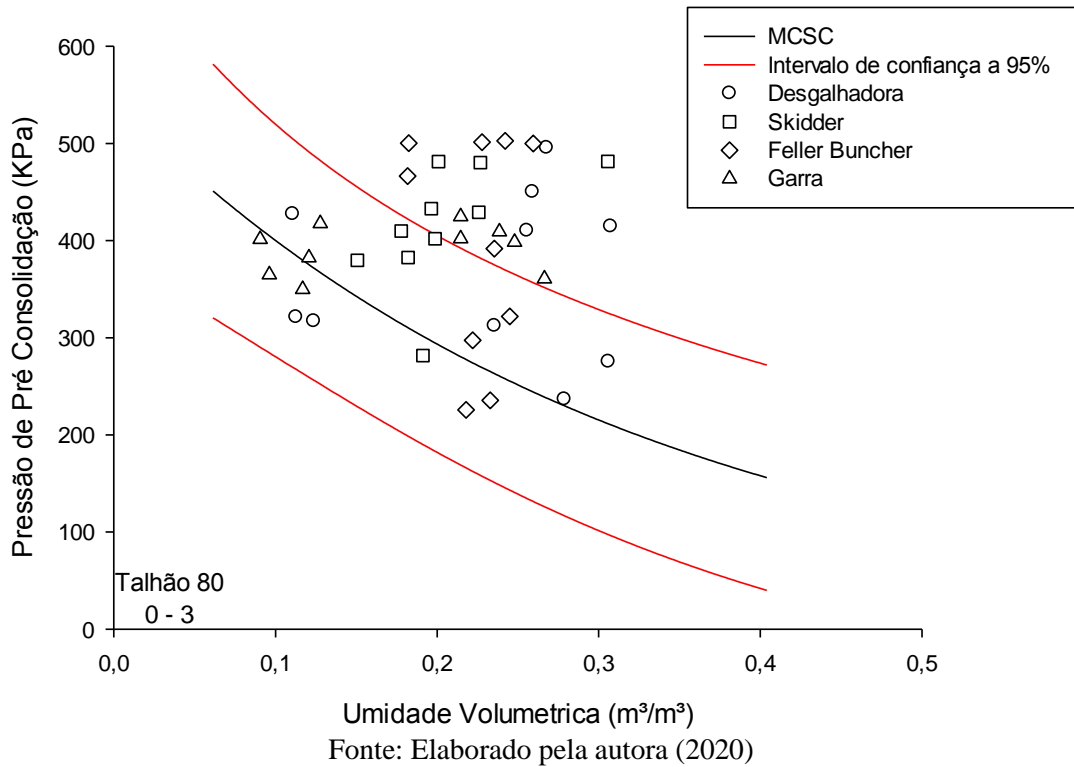
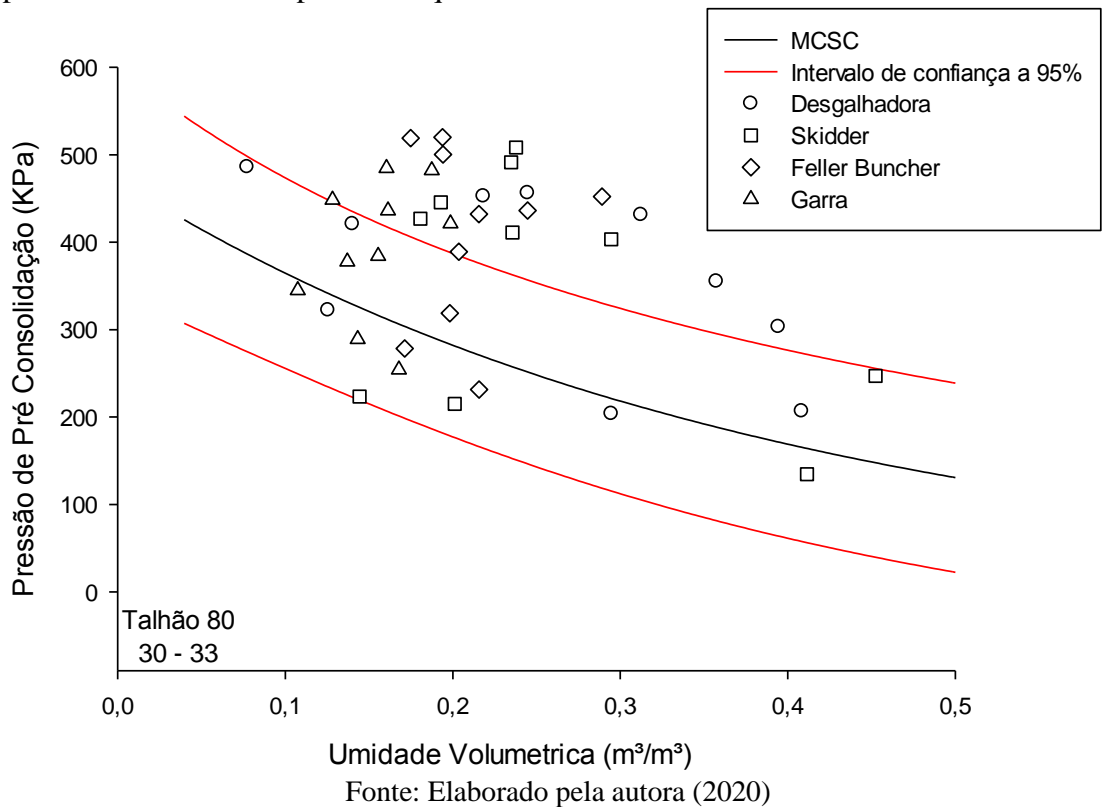


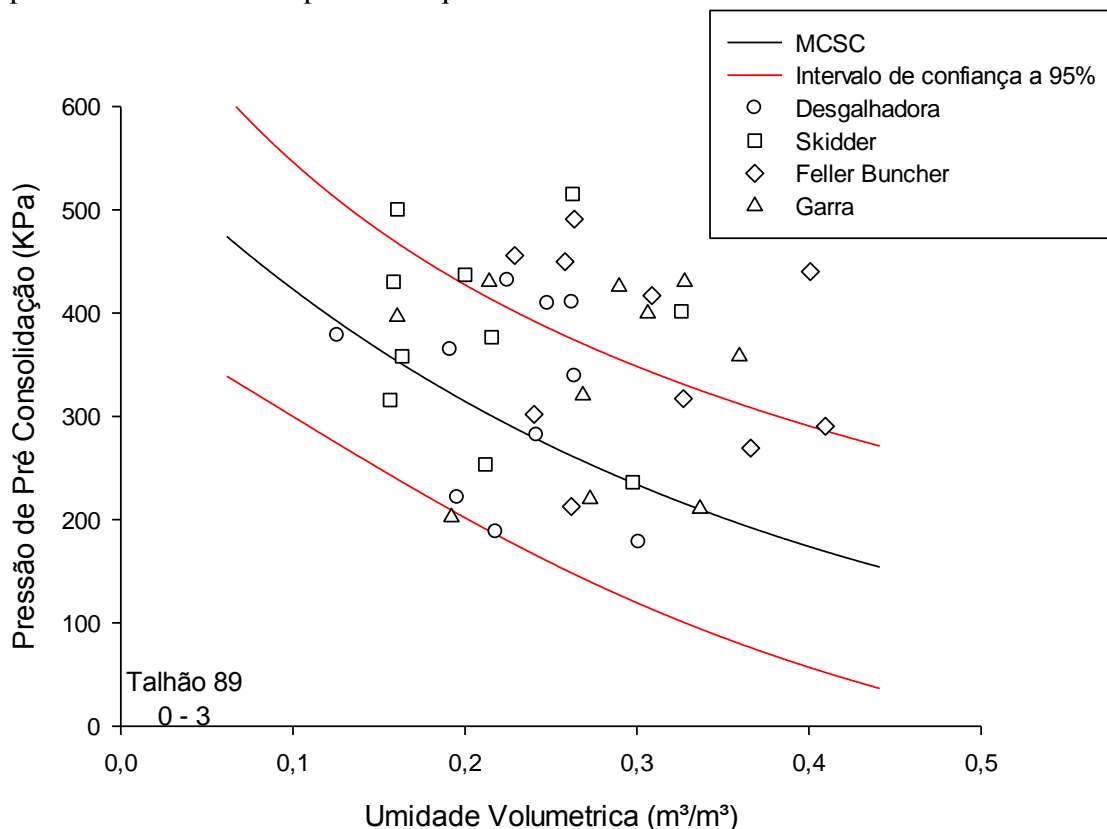
Figura 14 - Modelo de capacidade de suporte de carga do talhão 80 da camada de 30 a 33 cm, com os resultados das pressões de pré-consolidação e umidade obtidos nas amostras de impactos dos diferentes tipos de maquinários florestais.



As figuras 15 e 16 apresentam as análises do talhão 89, no qual a porcentagem de amostras compactadas na camada de 0 a 3 cm variou de 30% a 60%, sendo o Feller Buncher o maquinário que apresentou maior porcentagem de amostras compactadas, com 60%, seguido pela Garra Traçadora com 50%, Skidder com 40% e Desgalhadora com 30%. Na camada de 30 a 33 cm a porcentagem de amostras compactadas variou de 40% a 60%, sendo que o modelo de capacidade de suporte de carga do talhão 89 profundidade apresentou maior capacidade de suporte de carga do que os demais, sendo este mais resistente à compactação, tal fato foi comprovado, pois este foi o segundo talhão com menor porcentagem de amostras compactadas. Diante disso, é possível inferir que os vários anos de manejo do solo neste talhão alterou sua estrutura física.

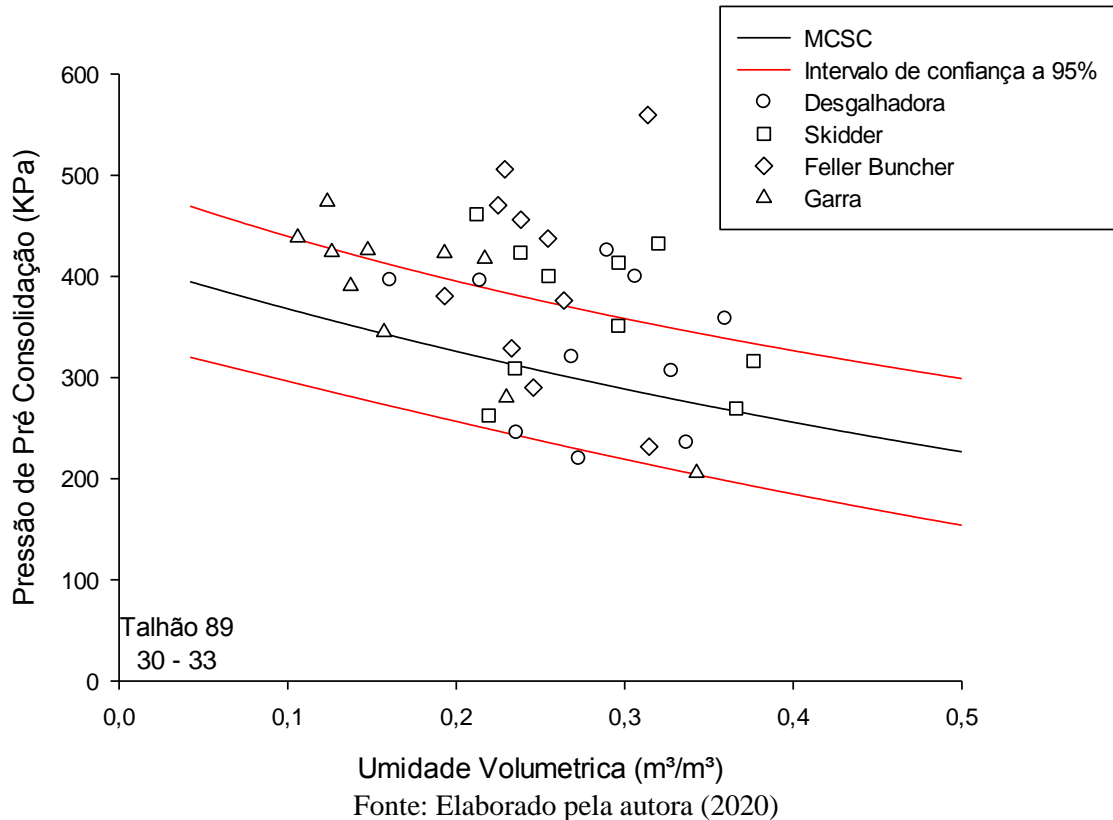
O Feller Buncher foi o maquinário que apresentou maior porcentagem de amostras compactadas, com 60%, seguido pelo Skidder e Garra Traçadora com 50%, e Desgalhadora com 40%. Dentre os maquinários analisados, o Feller Buncher apresentou maior porcentagem de amostras compactadas em ambas as camadas avaliadas.

Figura 15 - Modelo de capacidade de suporte de carga do talhão 89 da camada de 0 a 3 cm, com os resultados das pressões de pré-consolidação e umidade obtidos nas amostras de impactos dos diferentes tipos de maquinários florestais.



Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Figura 16 - Modelo de capacidade de suporte de carga do talhão 55 da camada de 0 a 3 cm, com os resultados das pressões de pré-consolidação e umidade obtidos nas amostras de impactos dos diferentes tipos de maquinários florestais.



Dentre os maquinários florestais avaliados (Skidder, Feller, Desgalhadora e Garra Traçadora) e as camadas avaliadas (0-3 e 30-33 cm), apresentados nas figuras de 8 a 15, constata-se que a Garra Traçadora apresentou mesmo percentual de amostras compactadas em todos os talhões para as duas camadas avaliadas e a Desgalhadora apresentou o mesmo comportamento no talhão 27. Já para os demais talhões avaliados a camada de 30 a 33 cm apresentou maior percentual de amostras compactadas do que a camada de 0 a 3 cm em pontos percentuais, corroborando com Sampietro et al., (2015), que verificou que o tráfego de tratores florestais causou alterações negativas em parâmetros físicos do solo, havendo efeito sobre todo o perfil até as camadas mais profundas, atingindo até 0,80 m de profundidade.

Em todos os talhões o equipamento Feller Buncher, foi o que apresentou maior degradação da estrutura do solo, com uma média de amostras compactadas de 57,5% na camada de 0 a 3 cm e de 60% na camada de 30 a 33 cm. Corroborando com os resultados obtidos por Andrade (2014), Martins et al., (2013) e Souza (2015), que verificaram que o maquinário Feller Buncher em determinadas classes de solo e profundidades, causou maior degradação da estrutura do solo, tendo maior porcentagem de amostras compactadas em

relação a outros maquinários avaliados. A elevada degradação da estrutura do solo ocasionada pelo Feller Buncher, pode ser atribuída às suas vibrações que este provocou no solo durante o corte das árvores; tais vibrações são fatores favoráveis à compactação e permitem que a degradação da estrutura do solo vá além do que se é esperado, atingindo camadas mais inferiores no perfil do solo, resultando numa compactação em profundidade.

A Garra Traçadora teve uma média de amostras compactadas de 47,5% nas duas camadas e o Skidder uma média de amostras compactadas de 40% na camada de 0 a 3 cm e de 50% na camada de 30 a 33 cm. Sendo assim, a Desgalhadora é o maquinário que apresentou menor impacto na estrutura do solo, com uma média de 35% de amostras compactadas na camada de 0 a 3 cm e 42,5% de amostras compactadas na camada de 30 a 33 cm.

De modo geral a porcentagem de amostras compactadas variou de 20% a 70%, constatando que o manejo adotado durante o processo da colheita do eucalipto vem degradando a estrutura do solo. Resultados semelhantes foram relatados por Dias Junior et al., (2005), Dias Junior et al., (2007), Martins et al., (2013), Sampietro; Lopes (2016) e Souza (2015), onde o manejo empregado na colheita florestal também degradou a estrutura do solo em camada subsuperficial no perfil do solo.

Conforme os dados apresentados, a aplicação de pressões superiores à capacidade de suporte de carga na superfície do solo e as múltiplas passadas dos maquinários, vem promovendo a degradação da estrutura do solo, e conseqüentemente, a compactação do mesmo. É preciso atentar para a capacidade de suporte de carga do solo em função da umidade, para manejar corretamente este solo e permitir que este tenha condições físicas ideais de produção nas plantações posteriores.

A recuperação do solo florestal afetados pela compactação é um processo lento e difícil, por isso medidas para minimizar a compactação devem ser implementadas, sendo algumas delas: o uso de tratores florestais com pneus duplos, pneus com dimensões maiores em sua largura, sendo estes com baixa pressão interna de inflagem e alta flutuação, aumento da área de contato entre o pneu e solo, gerenciamento do tráfego de acordo com a umidade do solo, reduzir a carga dos maquinários de maneira que aplica menor pressão sobre a superfície do solo, dentre outras.

5. CONCLUSÕES

O T89 profundidade apresentou maior capacidade de suporte de carga do que os demais, enquanto a camada superficial do T55 e do T80 foi o mais suscetível à compactação.

As operações de colheita e baldeio da madeira estão promovendo a degradação da estrutura do solo.

O manejo empregado com estes maquinários estão promovendo compactação adicional no perfil do solo na camada de 30 a 33 cm.

Todos os equipamentos avaliados estão promovendo compactação adicional do solo nas camadas avaliadas nas condições do manejo empregado.

O equipamento que promoveu maior compactação foi o Feller Buncher e o que promoveu menor compactação foi a Desgalhadora.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, E. N. DE; VECCHI, O. **Os Eucalyptos: Sua Cultura e Exploração. São Paulo: Typographia Brazil de Rothschild, Comp, 1918. 228p.**

ANDRADE, M. L. de C. Efeito do maquinário de colheita florestal na compactação do solo. 2014. 84 p. **Dissertação** (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais, 2014.

ANDRADE, M. L. C.; TASSINARI, D.; DIAS JUNIOR, M. S.; MARTINS, R. P.; ROCHA, W. W.; SOUZA, Z. R. Soil compaction caused by harvest and logging operations in eucalyptus forests in coarse-textured soils from northeastern Brazil. **Ciência e Agrotecnologia**, 41(2), 191–200, 2017. doi: 10.1590/1413-70542017412036216.

BOTTA, G.F.; RIVERO, D.; TOURN, M.; MELCON, F.B.; POZZOLO, O.; NARDON, G.; BALBUENA, R.; BECERRA, A.T.; ROSATTO, H.; STADLER, S. Soil compaction produced by tractor with radial and cross-ply tyres in two tillage regimes. **Soil and Tillage Research**, v.101, p.44-51, 2008. DOI: 10.1016/j.still.2008.06.001.

COGO, F. D.; ARAUJO JUNIOR, C. F.; ZINN, Y. L.; DIAS JUNIOR, M. S.; ALCÂNTARA, E. N.; GUIMARÃES, P. T. G. Estoques de carbono orgânico do solo em cafezais sob diferentes sistemas de controle de plantas invasoras. (In Portuguese, with English abstract). **Semina: Ciências Agrárias**, v.34, p.1089 - 1098, 2013.

DIAS JUNIOR, M. de S. Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic. 1994. 114 f. Thesis (Ph.D. in Crop and Soil Science) - Michigan State University, East Lansing, 1994.

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. Revisão de literatura: o processo de compactação do solo e sua modelagem. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 20, n. 1, p. 175-182, jan./mar. 1996.

DIAS JUNIOR, M.S. Compactação do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., H.V. & CHAEFER, C.E.G.R. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1. p.55-94.

DIAS JUNIOR, M. S.; SILVA, A. R.; FONSECA, S.; LEITE, F. P. Método alternativo de avaliação da pressão de pré-consolidação por meio de um penetrômetro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 805-810, 2004.

DIAS JUNIOR, M. S.; LEITE, F. P.; LASMAR JÚNIOR, E.; ARAÚJO JUNIOR, C. F. Traffic effects on the soil preconsolidation pressure due to eucalyptus harvest operations. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 62, n. 3, p. 248-255, 2005.

DIAS JUNIOR, M. S.; FONSECA, S. da; ARAUJO JUNIOR, C.; F.; SILVA, A. R. Soil Compaction Due To Forest Harvest Operations. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 2, p. 257-264, fev. 2007.

DIAS JUNIOR, M. S.; MARTINS, P. C. C. Ensaio de compressão uniaxial e modelos de capacidade de suporte de carga do solo. In: **Manual de métodos de análise de solo** (ed. Teixeira, P. C. et al.). Rio de Janeiro, RJ: Embrapa Solos. p.152 - 171, 2017.

DONAGEMMA, G. K.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. H. M. Densidade de Partículas. In: **Manual de métodos de análise de solo** (ed. Teixeira, P. C. et al.). Rio de Janeiro, RJ: Embrapa Solos. p.76 - 81, 2017.

FIEDLER, N.C.; ROCHA, E.B.; LOPES, E.S. Análise da produtividade de um sistema de colheita de árvores inteiras no norte do estado de Goiás. **Floresta**, Curitiba, v.38, n.4, p. 577-586, 2008.

FIGUEIREDO, L.H.A.; DIAS JUNIOR, M.S. & FERREIRA, M.M. Umidade crítica de compactação máxima em resposta a sistemas de manejo num Latossolo Roxo. **R. Bras. Ci. Solo**, 24:487-493, 2000.

FONTANA, A.; CAMPOS, D. V. B. Carbono orgânico. In: **Manual de métodos de análise de solo** (ed. Teixeira, P. C. et al.). Rio de Janeiro, RJ: Embrapa Solos. p.360 – 367, 2017.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. **FAOSTAT: Production**. Rome: FAO Statistics Division, 2019a. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>>. Acesso em: 15 de mar. 2020.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. **FAOSTAT: Crops and livestock products**. Rome: FAO Statistics Division, 2019b. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat/en/#data/TP>>. Acesso em: 15 de mar. 2020.

FREITAS, K. E. **Análise técnica e econômica da colheita florestal mecanizada**. 27p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Produção), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2005.

HAKKILA, P.; MALINOVSKI, J.R.; SIREN, M. Tendências atuais e perspectivas futuras dos subsistemas de extração florestal. In: SEMINÁRIO DE ATUALIZAÇÃO SOBRE SISTEMAS DE EXPLORAÇÃO, 7, 1992, Curitiba. **Anais...** Curitiba: FUPEF, 1992. p.172-193.

HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems a review of the nature, causes and possible solutions. **Soil & Tillage Research**, v.82, n.2, p.121-145, 2005. HOLTHUSENA, D.; BRANDTB, A. A.; REICHERT, J. M.; HORN, R. Soil porosity, permeability and static and dynamic strength parameters under native forest-grassland compared to no-tillage cropping. **Soil and Tillage Research**. 177: 113 – 124, 2018 DOI: 10.1016/j.still.2017.12.003

IMHOFF, S.; SILVA, A.P. & FALLOW, D. Susceptibility to compaction, load support capacity, and soil compressibility of Hapludox. **Soil Science Society of America Journal**, 68:17-24, 2004.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). **Anuário Estatístico da Indústria Brasileira de Árvores: ano base 2014**. Brasília, DF: IBÁ, 2019. Disponível em:<<https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/iba-relatorioanual2019.pdf>>. Acesso em: 10 de abr. de 2020.

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTUDOS FLORESTAIS. IPEF Notícias. nº215 Maio/Junho de 2012.

IORI, P.; SILVA, R. B. da; DIAS JUNIOR, M. de S.; LIMA, J. M. de. Pressão de pré-consolidação como ferramenta de análise da sustentabilidade estrutural de classes de solos com diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.36, p.1448-1456, 2012.

IORI, P.; DIAS JUNIOR, M. S.; AJAYI, A. E.; GUIMARÃES, P. T. G.; PAIS, P. S. M. & ANDRADE, M. L. C. Comparison of field and laboratory models of the load bearing capacity in coffee plantations. **Ciência e Agrotecnologia**, 37:130-137, 2013.

IORI, P, DIAS JUNIOR, M. S.; AJAYI, A. E.; GUIMARÃES, P. T. G.; SOUZA, Z. R.; FIGUEIREDO, V. C. Seasonal change of soil precompression stress in coffee plantation under sub-humid tropical condition. **Coffee Science**, v.9, p. 145 - 154, 2014a.

IORI, P.; DIAS JUNIOR, M. S.; AJAYI, A. E.; GUIMARÃES, P. T. G.; ABREU JÚNIOR, A. A. Influence of field slope and coffee plantation age on the physical properties of a Red-Yellow Latosol. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 38(1):107-117, 2014b.

JACOVINE, L. A. G. et al. Avaliação da qualidade operacional em cinco subsistemas de colheita florestal. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 29, n. 3, p. 391-400, 2005.

KELLER, T.; LAMANDÉ, M. Challenges in the development of analytical soil compaction models. **Soil and Tillage Research**, v.111, p.54-64, 2010.

LIMA, J.S.S.; LEITE, A.M.P. Mecanização. In. MACHADO, C.C. (Ed). **Colheita florestal**. 2 ed. Viçosa. UFV, 2014. Cap.2, p.46-73.

LOPES, S. E. ET AL. Compactação de um solo de uso florestal submetido ao tráfego de arraste de madeira. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v.30, n.3, p. 369-376,2006.1.

LOPES, S.E. **Análise técnica e econômica de um sistema de colheita florestal**. 2007, 144p. Tese (Programa em Engenharia Agrícola)- Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.

MACHADO, C.C. **Planejamento e controle de custos na exploração florestal**. Viçosa-MG, UFV, Imprensa Universitária, 1984, 138 p

MACHADO, C. C. O Setor Florestal Brasileiro. In: MACHADO, C.C. (Org.). **Colheita Florestal**. Livro. Viçosa-MG, UFV, 2002. p.15-32.

MACHADO, C. C.; Colheita Florestal. Viçosa: UFV, Imp. Univ., 2006.

MACHADO, C. C.; SILVA, E. N.; PEREIRA, R.S. O setor florestal brasileiro e a colheita florestal. **In**: MACHADO, C.C. (Ed.). Colheita florestal. 2. Ed. Viçosa, MG: UFV, 2008. p.15.42.

MALINOVSKI, J. R.; MALINOVSKI, R. A. **Evolução dos sistemas de colheita de Pinus na Região Sul do Brasil**. Curitiba-PR, FUPEF, 1998. 138 p.

MALINOVSKI, J.R. et al. Sistemas. In. MACHADO, C.C (Ed). **Colheita Florestal 2** ed. Viçosa. UFV, 2008, Cap. 6 p.161-184.

MARTÍN, M. A.; MARTÍNEZ, F. S. J.; PERFECT, E.; LADO, M.; PACHEPSKY, Y. Soil structure and function in a changing world: Characterization and scaling. **Geoderma**, v. 287, n.1 February, p. 1-3, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.08.015>.

MARTINS, P. C. C. et al. Levels of induced and compactation as caused by forest harvest operations. **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 1, jan./mar. 2013.

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**, 42, 58 - 68, 2018. doi:10.1590/1413-70542018421005217.

MESQUITA, C. M.; REZENDE, J. E.; CARVALHO, J. S.; FABRI JUNIOR, M. A.; MORAES, N. C.; DIAS, P. T.; CARVALHO, R. M.; ARAUJO, W. G. **Manual do café: manejo de cafezais em produção**. Belo Horizonte: EMATER-MG, 72 p. il., 2016.

MOLINA JUNIOR, W. F. **Comportamento mecânico do solo em operações agrícolas**. 1. ed. Piracicaba: Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2017. v. 1. 223p.

PAIS, P. S. M.; DIAS JUNIOR, M. S.; DIAS, A. C.; IORI, P.; GUIMARÃES, P. T. G.; SANTOS, G. A. Load-bearing capacity of a Red-Yellow Latosol cultivated with coffee plants subjected to different weed managements. **Ci. Agrotec**. v. 37, p.145-151, 2013.

RABOT, E.; WIESMEIER, M.; SCHLUTER, S.; VOGEL, H. -J. Soil structure as an indicator of soil functions: A review. **Geoderma**. 314: 122-137, 2018. DOI: 10.1016/j.geoderma.2017.11.009.

RAPER, R. L. Agricultural traffic impacts on soil. **Journal of Terramechanics**, v.42, n.3/4, p.259-280, 2005.

REICHERT, J. M. et al. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERRETA, C. A.; SILVA, L. S. da; REICHERT, J. M. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. v.5. p.49-134.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; SUZUKI, L. E. A. S.; HORN, R. Mecânica do Solo. In: JONG VAN LIER, Q. **Física do Solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 29-102, 2010.

SAMPIETRO, J. A.; LOPES, E. S. Compactação causada pelo tráfego de feller buncher e skidder em um neossolo regolítico sob distintas umidades. **Ciência Florestal**, v. 25, n. 1, p. 239-248, 2015.

SAMPIETRO, J.A.; LOPES, E.S. Compactação de um cambissolo causada por máquinas de colheita florestal espacializada com geoestatística. **Floresta**, 2016, 46, 307-314.

SANT'ANNA, C.M.Corte. In. MACHADO, C.C. **Colheita Florestal**. Viçosa, MG. Universidade Federal de Viçosa, Imprensa Universitária, 2014. p.74-105.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. 2013. **Sistema Brasileiro de Classificação de solos**. 3ª ed. rev. ampl. Brasília, DF. 353p. Embrapa, 2013.

SANTOS, L. S. dos. Mecanização florestal no Brasil. **Revista Madeira**, Curitiba, n. 51. p. 43-44, ago., 2000.

SECCO, D. Estados de compactação e suas implicações no comportamento mecânico e na produtividade de culturas em dois Latossolos sob plantio direto. 2003. 105f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

SEIXAS, F.; OLIVEIRA JUNIOR, E.D. Compactação do solo devido ao tráfego de máquinas de colheita de madeira. **ScientiaForestalis**n.60, p. 73-87. 2001

SEIXAS, F. Extração. In: MACHADO, C.C. **Colheita Florestal**. Viçosa: UFV, 2008.

SETZER, J. Atlas climático e ecológico do Estado de São Paulo. São Paulo: Ed. Comissão Interestadual da Bacia Paraná-Uruguai, 1996. 61p..

SEVERIANO, E. C.; OLIVEIRA, G. C.; DIAS JÚNIOR, M. S.; CASTRO, M. B.; OLIVEIRA, L. F. C.; COSTA, K. A. de P. Compactação de solos cultivados com canade-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. R.; DIAS JUNIOR, M. S.; LEITE, F.P. Camadas de resíduos florestais e pressão de pré-consolidação de dois latossolos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, V. 42, n.1, p.89-93, 2007.

SILVA, R. B. et al. Estimation and evaluation of dynamic properties as indicators of changes on soil structure in sugarcane fields of São Paulo state Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.103, n.2, p.265-270, 2009.

SNEDECOR, G. W.; COCHRAN, W. G. **Statistical methods**. 8th. ed. Iowa: University Press Ames, 1989.

SOCIEDADE DE INVESTIGAÇÕES FLORESTAIS. Aperam Bioenergia inclui Desgalhadora florestal em suas atividades. Minas Gerais, 2014. Disponível em: Acesso em: 18 de abr. 2020.

SOUZA, A. et al. Perspectivas na Área de Colheita e Transporte Florestal. **Revista Madeira**. Curitiba, n. 51, p. 52-62, 2000.

SOUZA A.; CASTRO, G.P. Sistemas. In. MACHADO, C.C (Ed). **Colheita Florestal 3** ed. Viçosa. UFV, 2014, Cap. 6 p.178-205.

SOUZA, Z. R. de. Impactos das operações de colheita florestal na estrutura de diferentes classes de solo. 2015. 120 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2015.

STEFANOSKI, D. C.; SANTOS, G. S.; 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**. Campina Grande-PB, v.17, n.12, p. 1301 - 309, 2013.

SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; LIMA, C. L. R. de. Estimativa da susceptibilidade à compactação e do suporte de carga do solo com base em propriedades físicas de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 963-973, 2008.

TAYLOR, D. W. **Fundamentals of soil mechanics**. New York: John Wiley and Sons, 1948.

VALVERDE S. R. Análise técnica e econômica do sistema de colheita de árvores inteiras em povoamentos de eucalipto. Viçosa, MG: UFV, 1995. 123 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, 1995.

WOLFF II, N. I. **Modelagem do crescimento e da produção de Pinus taeda**L. 2012. Dissertação (Mestrado). Departamento Ciências Florestais. Universidade Estadual Do Centro-Oeste, Irati, 62f. 2012.

YAMASHITA, R. Y. **Avaliação das condições de trabalho e da exposição à vibração do operador de máquinas na colheita florestal** [dissertação]. Piracicaba: Escola Superior de Agronomia Luis de Queiroz; 2002.