

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE GOIÁS
CÂMPUS CENTRAL SEDE ANÁPOLIS - CET
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM ENGENHARIA AGRÍCOLA
RAFAEL GONÇALVES FAGUNDES PEREIRA

ÍNDICES FÍSICOS E RECALQUE SUPERFICIAL DE UM LATOSSOLO VERMELHO
SUBMETIDO A DIFERENTES CARGAS E TIPOS DE MANEJO.

ANÁPOLIS-GO

2023

RAFAEL GONÇALVES FAGUNDES PEREIRA

**ÍNDICES FÍSICOS E RECALQUE SUPERFICIAL DE UM LATOSSOLO
VERMELHO SUBMETIDO A DIFERENTES CARGAS E TIPOS DE MANEJO.**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Goiás - UEG, Câmpus Central Sede Anápolis – CET, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

Área de concentração: Recursos Hídricos e Resíduos Agroindustriais.

Orientadora: Profa. Dr. Paulo Márcio Fernandes Viana

Co-orientador: Prof. Dr. Emerson Trogello.

ANÁPOLIS-GO

2023



TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA PUBLICAÇÃO DE TESES E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL (BDTD)

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Estadual de Goiás a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UEG), regulamentada pela Resolução, **CsA n.1087/2019** sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

Dados do autor (a)

Nome Completo: Rafael Gonçalves Fagundes Pereira

E-mail: rafaelgerencivil@gmail.com

Dados do trabalho

Título: Índices Físicos e Recalque Superficial de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes cargas e tipos de manejo.

Data da Defesa 15/12/2022

Tipo

Tese Dissertação

Programa de Pós-Graduação *Stricto sensu* em Engenharia Agrícola

Concorda com a liberação documento

SIM

NÃO **Casos de impedimento:** Período de embargo por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo necessita de justificativa junto à coordenação do Programa.

Solicitação de registro de patente;

Submissão de artigo em revista científica;

Publicação como capítulo de livro;

Publicação da dissertação/tese em livro.

Anápolis, 14/02/2023
Local Data

Assinatura do autor (a)

Assinatura do orientador (a)

Documento assinado digitalmente



PAULO MARCIO FERNANDES VIANA
Data: 16/02/2023 10:46:37-0300
Verifique em <https://verificador.itl.br>

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UEG
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

P436a Pereira, Rafael
 AVALIAÇÃO DA ESTRUTURA DE SOLO SECO, SUBMETIDO A
 CARGA DINÂMICA EM DIFERENTES MANEJOS / Rafael Pereira;
 orientador Paulo Viana; co-orientador Emerson
 Trogello. -- Anápolis, 2022.
 63 p.

 Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação
 Mestrado Acadêmico em Engenharia Agrícola) -- Câmpus
 Central - Sede: Anápolis - CET, Universidade Estadual
 de Goiás, 2022.

 1. Carga Dinâmica. 2. Compressão Unixial. 3. Manejo
 . 4. ILPF. 5. Plantio direto. I. Viana, Paulo , orient.
 II. Trogello, Emerson, co-orient. III. Título.

ATA DE DEFESA DA DISSERTAÇÃO – M.Sc

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO PARA CONCESSÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

REALIZADA EM quinze de dezembro de dois mil e vinte e dois

PROGRAMA de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Agrícola

CANDIDATO **Rafael Gonçalves Fagundes Pereira**

BANCA EXAMINADORA:

1. Prof. Dr. **Paulo Márcio Fernandes Viana** (Orientador/UEG)
2. Prof. Dr. **Elton Fialho dos Reis** (UEG)
3. Prof. Dr. **Rone Evaldo Barbosa** (UEG)

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: “Índices Físicos e recalque superficial de um latossolo vermelho submetido a diferentes cargas e tipos de manejo”

LOCAL: Anfiteatro do CEPEC - Centro de Pesquisa e Educação Científica da Universidade Estadual de Goiás, Campus Central – Sede Anápolis de Ciências Exatas e Tecnológicas

HORÁRIO DE INÍCIO: 17:00 horas, em sessão pública, após exposição de cerca de 40 minutos, o candidato foi arguido oralmente, pelos membros da banca, tendo demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização no tema de sua Dissertação, sendo aprovado por unanimidade, com correções.

Na forma regulamentar foi lavrada a presente Ata que é assinada pelos membros da banca, e pelo candidato.

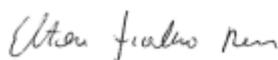
Anápolis, 15 de dezembro de 2022.

Orientador:

Prof. Dr. Paulo Márcio Fernandes Viana (Orientador/UEG)

Documento assinado digitalmente
PAULO MARCIO FERNANDES VIANA
Data: 24/01/2023 10:36:14-0300
Verifique em <https://verificador.jti.br>

Banca Examinadora:



Prof. Dr. Elton Fialho dos Reis (UEG)



Prof. Dr. Rone Evaldo Barbosa (UEG)



Candidato:

Rafael Gonçalves Fagundes Pereira

RAFAEL GONÇALVES FAGUNDES PEREIRA

**ÍNDICES FÍSICOS E RECALQUE SUPERFICIAL DE UM LATOSSOLO
VERMELHO SUBMETIDO A DIFERENTES CARGAS E TIPOS DE MANEJO.**

agrícola

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Goiás - UEG, Câmpus Central Sede Anápolis – CET, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.
Área de concentração: Tecnologia da produção

Orientadora: Profa. Dr. Paulo Márcio Fernandes Viana
Co-orientador: Prof. Dr. Emerson Trogello.

Aprovada: Anápolis, 15 de dezembro de 2022.

Banca examinadora

Prof. Dr. Paulo Márcio Fernandes Viana
Universidade Estadual de Goiás

Prof. Dr. Elton Fialho dos Reis
Universidade Estadual de Goiás.

Prof. Dr. Rone Evaldo Barbosa
Universidade Estadual de Goiás.

ANÁPOLIS-GO

2023

AGRADECIMENTOS

Primeiramente meus agradecimentos a Deus, a todos os anjos, a espiritualidade e a minha ancestralidade pela força, pelos ensinamentos e por toda essa vitória.

Agradeço a minha mãe, minha rainha, melhor amiga, minha vida pois sem ela nada aconteceria na minha vida, meu porto seguro, quem sempre está comigo em todos os momentos e sempre me dando apoio, eu te amo muito minha mãe.

Agradeço a meu pai, por sempre me dar forças, eu te amo muito meu pai.

Agradeço a minha irmã, meus sobrinhos e meu irmão, minha família que sempre me apoia e estão comigo, amo muito todos vocês.

A meu Orientador Prof. Dr. Paulo Márcio Fernandes Viana, por lutar comigo e fazer de tudo para que o trabalho fosse concluído com sucesso, foi uma construção mútua, gratidão por todo aprendizado.

A meu Co-orientador, Prof. Dr. Emerson Trogello, por sempre estar pronto a ajudar, coletando as amostras junto conosco e sempre se dispondo a ajudar e fez o melhor.

Ao Professor, Diretor da Universidade Estadual de Goiás, campus Dr. Elton Fialho dos Reis, porque sempre ajudar, lutar junto e fez tudo para finalizarmos a pesquisa.

Ao professor, Dr. Rone Evaldo Barbosa, que está presente em todos os meus momentos de vitórias e sempre me ajudando.

Aos Professores do Programa de Mestrado, pelo companheirismo, disponibilidade e paciência sempre em auxiliar, Prof. Dr André Campos, Prof^a. Dr^a. Suely Freitas, Prof. Dr^a Roberta Passini.

Agradecimento especial a meu amigo Douglas, sem ele não conseguíamos coletar as amostras, é um amigo muito querido.

Agradecimento especial a Mãe Isabel Cristine, por todas as orações, pela condução na minha caminhada espiritual e sempre nos orientar e ensinar.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram de alguma forma para esta pesquisa.

RESUMO

A avaliação estrutural de um solo agrícola é de extrema importância para o desempenho e qualidade da produção. Quando submetido ao tráfego de máquinas agrícolas os solos sofrem um recalque superficial e alteram suas características físicas de acordo com o manejo em que se acha submetido. Logo este trabalho objetivou avaliar os índices físicos e o recalque superficial de um latossolo vermelho submetido a diferentes cargas e tipos de manejo, assim isso foram coletadas amostras de solo indeformada, em três áreas com diferentes sistemas de manejo ,plantio direto, Sistema de Integração Lavoura Pecuária Floresta e área de pastagem; em seguida foram submetidas simulador de tráfego com aplicação carga dinâmica 0 passada, 1 passada e 2 passadas (0, 108 e 216 kpa), avaliados os índices físicos do solo peso específico natural (γ_n), peso específico aparente seco (γ_d), índice de vazios (n) e porosidade (e). Logo após, as amostras foram submetidas ao ensaio de compressão uniaxiais para verificação do recalque superficial, com 5 carregamentos (108, 216, 432, 864 e 1500 Kpa). O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, com esquema fatorial 3x3x5 em parcelas subdivididas. Assim, verificou se que o plantio direto devido as características do manejo, possui um solo mais poroso, com menor resistência e melhor para o plantio; ILPF caracterizou-se por se um manejo que permitiu o solo a ser mais resistente a aplicação de cargas, portanto menos poroso, e pastagem possui um comportamento intermediário.

Palavras-chave: manejos agrícolas, solo seco, ILPF, carga dinâmica.

ABSTRACT

The structural evaluation of an agricultural soil is extremely important for the performance and quality of production. When submitted to the traffic of agricultural machines, the soils suffer a surface repression and change their physical characteristics according to the management in which they are submitted. Therefore, this work aimed to evaluate the physical indices and the surface settlement of a red oxisol subjected to different loads and types of management, so samples of undisturbed soil were collected in three areas with different management systems, no-till, Crop Integration System Livestock Forest and pasture area; then, a traffic simulator with dynamic load application 0 past, 1 past and 2 past (0, 108 and 216 kpa) was submitted, evaluating the physical indices of the soil specific weight (γ_n), specific apparent dry weight (γ_d), index of voids (n) and porosity (e). Soon after, the samples were submitted to the uniaxial compression test to verify the surface settlement, with 5 loads (108, 216, 432, 864 and 1500 Kpa). The experiment was carried out in a completely randomized design, with a 3x3x5 factorial scheme in sub-subdivided plots. Thus, it was found that direct planting, due to the management characteristics, has a more porous soil, with less resistance and better for planting; ILPF was characterized by a management that allowed the soil to be more resistant to the application of loads, therefore less porous, and pasture has an intermediate behavior. Keywords: agricultural management, soil quality, ILPF, dynamic load.

Keywords: agricultural management, dry soil, ILPF, dynamic load.

LISTA DE TABELAS

TABELA 1– Ensaio de caracterização dos solos do PD, ILPF e PAST.**Erro! Indicador não definido.**

TABELA 2– Resumo da análise de variância (valor de p) dos valores médios de deslocamento vertical em mm**Erro! Indicador não definido.** para variáveis do manejo sob aplicação da carga dinâmica e carga de compressão uniaxial.

TABELA 3 – Valores médios de deslocamento vertical (recalque) em função da Carga Dinâmica (CD) aplicada.

TABELA 4– Valores médios de deslocamento vertical (recalque) em função da Carga de Consolidação (CC) aplicada.**Erro! Indicador não definido.**

TABELA 5– Valores médios obtidos por meio do teste de tukey, da interação entre manejos e cargas dinâmicas (CD) aplicadas.

TABELA 6- Resumo da análise de variância (valor de p) dos valores médios de índices físicos, Peso Específico Natural, Peso Específico Aparente, Índice de Vazios, Porosidade.

TABELA 7- Valores em escala logarítmica para a variação da tensão de consolidação ($\Delta\sigma$), a variação de recalque (ΔL), e o valor do módulo de elasticidade (E), para cada Manejo e Passada.
Dados não transformados **Erro! Indicador não definido.**

TABELA 8- Resumo das Médias dos valores de Peso Específico Natural (ρ_n), Peso Específico Aparente Seco (ρ_d), Índice de Vazios (e), Porosidade (η), por manejo e carga dinâmica aplicada.**Erro! Indicador não definido.**

TABELA 9- Valores médios dos recalques em mm, para cada manejo, em relação as cargas dinâmicas e de consolidação. Valores não transformados.**Erro! Indicador não definido.**

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas e Técnicas
CC	Carga de Consolidação
CD	Carga Dinâmica
Cm	Centímetros
Cm ³	Centímetros Cúbicos.
E, E ₀	Módulo de Rigidez
e	Índice de vazios
g	gramas
KPa	Quilo Pascal
Kgf	Quilograma força
Kg	Quilogramas
L	Deslocamento vertical
η	Porosidade
ILPF	Integração Lavoura Pecuária Floresta
PAST	Pastagem
PD	Plantio Direto
Pm	Pressão média
ρ _n	Peso Específico Natural
ρ _d	Peso Específico Aparente seco.
S	Área da Superfície de contato
SQ	Soma de Quadrados.
σ	Tensão aplicada
V _t	Volume Total
W	Carga suportada pelo rodado

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
2. OBJETIVOS.....	16
2.1-Objetivo Geral.....	16
2.2 Objetivos Específicos.....	16
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	16
3.1 Sistemas de Manejos dos solos agrícolas.....	16
3.1.1 Plantio Direto.....	19
3.1.2 Integração Lavoura Pecuária Floresta (ILPF).....	20
3.2 Efeitos da Mecanização.....	22
3.2.1 Tensões dinâmicas aplicadas a solos.....	22
3.2.2 Indicadores Físicos de qualidade de solos.....	24
3.2.3 Módulo de Rigidez de Solos.....	25
3.2.4 Índice de compressão (CC).....	26
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	27
4.1 Informações Gerais.....	27
4.2 Delineamento e tratamentos experimentais.....	28
4.3 Coleta das Amostras.....	31
4.4 Caracterização das áreas de manejo.....	32
4.5 Caracterização dos Solos.....	34
4.6 Ensaio de Aplicação de Carga Dinâmica- Simulador de Tráfego.....	35
3.6 Determinação dos Índices Físicos e Módulo de Rigidez.....	37

3.8 Ensaio de Compressão Oedométrica- Cargas de Consolidação.	40
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
4.1 Carga Dinâmica (CD)	43
4.2 Carga de Consolidação (CC)	45
4.3 Interação Manejo x CD.....	46
4.4 Índices Físicos.	49
4.5 Estudo do Comportamento Reológico do Solo.	50
6. CONCLUSÕES	58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

1. INTRODUÇÃO

O solo é um recurso natural tridimensional formado por um sistema tripartido: parte sólida, composta por minerais: areia, silte e argila; parte líquida: além de matéria orgânica, água, organismos vivos; e parte gasosa: ar. Dentre as várias aplicações desse recurso natural não renovável, é o suporte para produção agrícola, devendo estar em equilíbrio para o processo produtivo e para a sustentabilidade agrícola (BOCALETI, *et.al.*,2021).

Segundo os mesmos autores, estima-se que um terço do solo da Terra apresenta condições severas de degradação, ocasionadas principalmente pelo uso intenso do solo de forma irregular para a agricultura, a poluição do solo, a erosão do solo, má gestão de recursos e desertificação. Ainda se estima que em média 40% do solo usado para a produção agrícola mundial está severamente degradado devido a gestão inadequada. Cerca de 12 milhões de hectares correspondentes a terras agrícolas são perdidos devido ao aumento na degradação do solo, o que reduz consideravelmente a capacidade de produção.

Para Sznitowski *et al.* (2019) baseando-se na sustentabilidade ambiental e agrícola, bem como na crescente demanda mundial por alimento, é imprescindível a recuperação de áreas degradadas para produção agrícola considerando-se técnicas de manejo adequados, como por exemplo, o uso de sistemas de integração agrícolas e manejos conservacionistas. O objetivo da recuperação das áreas degradadas é preservar o meio ambiente, reduzir a emissão de CO₂, melhorar a qualidade do solo, da água, preservar a biodiversidade e evitar degradação de áreas.

O uso de sistemas de manejo do solo voltados para sustentabilidade agrícola tem gerado muitas pesquisas, principalmente relacionadas a estrutura, operacionalidade e produtividade, desenvolvimento e custos energéticos. Segundo Dias *et al.* (2021) os sistemas de Integração Lavoura Pecuária Floresta (ILPF) é uma das principais estratégias sustentáveis e que busca, melhoria das condições físicas, químicas e biológicas do solo, principalmente pelo fato de visar a produção sustentável de modo a integrar atividades agrícolas, pecuárias e florestais em uma mesma área. A implantação do sistema ILPF é baseada na rotação de culturas e no consórcio entre culturas de grãos, forrageiras e/ou espécies arbóreas, para produzir, na mesma área, grãos, carne ou leite e produtos madeireiros e não madeireiros.

Segundo o mesmo autor, o uso de sistemas de integração, possibilita a reestruturação de solos que se encontram degradados, principalmente porque o conceito permiti a reconstrução de um ambiente próximo ao natural do solo, não há revolvimento e nem aração, logo os solos são melhores estruturados e ao longo do tempo, equilibram-se naturalmente.

Além de sistemas de integração, manejos conservacionistas, como o Plantio Direto – PD também são muito utilizados, em torno de 40 milhões de hectares plantados, pelo fato de reduzir o uso de revolvimento dos solos, manter a cobertura vegetal e manter a estrutura do solo, em relação ao ILPF aproximadamente 5000 mil hectares plantados no processo de recuperação e conversão de solos. O plantio direto está presente em 85% da área plantada de soja e 80% da de milho no Brasil, além de ser utilizado também nas culturas de safrinha. O Brasil possui a segunda maior área de Plantio Direto do mundo que está estimada em 32 milhões de hectares (VIEIRA *et.al.*,2022).

O Sistema de Plantio Direto é um sistema de manejo conservacionista, que envolve técnicas para a conservação física, química e biológica dos solos, fundamentadas na ausência de revolvimento e cobertura permanente do solo por meio da rotação de culturas e uso de palhadas, conforme Fagundes *et al.* (2019).O uso da rotação de culturas corrobora com a estabilização de agregados no solo devido à ação da matéria orgânica, promovendo uma melhor capacidade de trocas catiônicas (CTC) produzida pelo maciço vegetal proveniente da cultura anterior, e assim quando comparadora ao sistema de plantio convencional, reduz a perda de agregados do solo em até cinco vezes mais, quando ocorre eficiência no manejo do SPD, e melhora a estabilização dos mesmos (SALOMÃO *et al.*, 2019).

A estrutura do solo ideal para agricultura é aquela que possibilita melhor e maior contato raiz-solo, porosidade suficiente para abastecimento hídrico e nutricional, bem como aeração, sendo o solo com resistência a penetração baixa. Assim devido as suas propriedades físicas, textura e estrutura principalmente, os solos do cerrado são favoráveis a cultivos, mas observa-se que o tráfego agrícola influencia negativamente nessas propriedades devido ao processo de adensamento e recalque superficial, observadas em épocas com baixas umidades, logo é de extrema importância estudos que possibilitem o conhecimento das características físicas do solo para avaliar o impacto dessa carga dinâmica (FAGUNDES *et.al.*, 2019).

Neste cenário, o manejo do solo, mediante práticas adequadas, pode contribuir significativamente para alcançar altas produtividades e preservar o solo. A relação entre o manejo e a qualidade do solo é avaliada pelas nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, bem como a qualidade da produção. O desenvolvimento de pesquisas científicas objetivando avaliar os manejos em relação as propriedades físicas e ao uso de máquinas agrícolas são extremamente necessárias para promover um aumento no desempenho produtivo (SANTOS *et.al.*,2018).

Um dos principais fatores para redução da qualidade do solo é o carregamento dinâmico, quando aplicado ao solo de modo inapropriado pode reduzir a permeabilidade, aumentar a

resistência a penetração das raízes, reduzir os vazios e a aeração, ocasionando no solo uma variabilidade espacial na estruturação devido o carregamento dinâmico. Neste cenário estudos e análises devem ser realizadas para verificar a influência do tráfego dinâmico em solos agrícolas, de forma a avaliar por meio de ensaios tais como compressão axial, compressão triaxial, ensaios oedométricos, uso de simuladores de tráfego, análises de campo entre outras; de forma a conhecer a estruturação do solo e a capacidade de recalques dos mesmos (CANDINE *et al.*, 2022).

2. OBJETIVOS

2.1-Objetivo Geral

Avaliar o comportamento estrutural de um latossolo vermelho distrófico, através do estudo do recalque superficial e índices físicos, mediante ensaios compressão uniaxial e carregamentos dinâmicos em diferentes sistemas agrícolas.

2.2 Objetivos Específicos

I. Estudar o recalque superficial, obtido por meio de ensaios de compressão uniaxial, utilizando um consolidômetro tipo Masquetto com interação homem máquina;

II. Avaliar à estrutura do solo, para cada manejo, após os carregamentos aplicados pelo simulador de

Tráfego, por meio de ensaios de índices físicos;

III. Verificar qual solo possui a melhor condição para plantio quando submetido a cargas de compressão.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Sistemas de Manejos dos solos agrícolas

O agronegócio tem sofrido transformações intensas ao longo dos anos, ocasionadas pelo aumento nos custos de produção, crescimento da competitividade e aplicação de tecnologias, exigências de maior diversificação de atividades, aumento da produtividade e da qualidade do produto. Ainda se observa a intensa preocupação em reduzir impacto ambiental, promovendo estudos de técnicas que permitam melhorar a sustentabilidade e que visem aumentar o desempenho do solo e preservar os recursos naturais (Silva *et al.*, 2020).

No Brasil tem-se observado um crescimento no uso de sistemas agrícolas baseados em conceitos sustentáveis. Esses modelos utilizam estratégias de produção sustentável integrando atividades agrícolas, pecuárias e florestais numa mesma área da propriedade rural, em plantio consorciado, objetivando o sinergismo entre seus componentes para obter os benefícios, tais como: o uso inteligente do solo e melhoria dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo, o aumento do bem-estar animal, melhoria das condições climáticas e ainda da umidade do ar, além de aumento da produtividade agrícola, do desempenho econômico e das condições dos recursos naturais e humanos (TOMAZ e WANDER, 2017).

Conforme os mesmos autores, têm-se destacado dois tipos de manejo. O Plantio Direto – PD que consiste na técnica de semeadura na qual a semente é colocada no solo não revolvido (sem prévia aração ou gradagem leve niveladora) usando semeadeiras especiais e a Integração Lavoura-Pecuária-Floresta – ILPF que consiste em uma estratégia de produção que integra diferentes sistemas produtivos, agrícolas, pecuários e florestais dentro de uma mesma área. Pode ser feita em cultivo consorciado, em sucessão ou em rotação, de forma que haja benefício mútuo para todas as atividades.

Em 2011 a adoção do SPD era de aproximadamente 2 milhões de hectares, atualmente abrange aproximadamente cerca de 11,5 milhões de hectares no território nacional. Com isso existem diversas políticas públicas de fomento, envolvendo setores públicos e privados, para intensificar o uso desses sistemas e promover melhorias nas condições do solo e do meio ambiente (CORDEIRO e BALBINO, 2019).

Tanto o PD quanto o ILPF possuem a sua base de sustentação o sistema tripartido do solo. O solo é a camada superficial da terra composta por parte sólida, líquida e gasosa (vazios), onde está presente a matéria orgânica, é o elemento fundamental para o desenvolvimento das culturas agrícolas de forma que o bom desempenho da produção está diretamente relacionado a estrutura do solo, referindo-se as qualidades físicas, químicas e biológicas desse material (SILVA, 2014).

A qualidade de um solo é avaliada baseando-se em sua funcionalidade múltipla de forma a não haver comprometimento futuro no seu desempenho, assim são considerados como indicadores da qualidade do solo, os aspectos físicos como densidade do solo, porosidade, índice de vazios, resistência mecânica e estabilidade de agregados (NETO *et.al.*, 2018). Conforme explicam Savioli *et al.* (2020), o desafio de intensificar os cultivos, com aumento da produtividade das culturas têm levado os gestores de sistemas agrícolas a utilizarem tecnologias, mecanizações com maiores dimensões e mais pesadas, com tráfego excessivo e sem o devido controle. Assim os números de operações de tráfego pesado impõem ao solo, uma

carga mecânica excessiva podendo ocasionar compactação do mesmo (Lembrando que quanto mais estruturado o solo estiver pior é para a cultura e pior para a economia pois irá precisar de mais energia para desestruturá-lo.

Segundo avaliam Silveira *et al.* (2022) o tráfego agrícola, também é um indicativo importante da qualidade de solos agrícolas, principalmente em áreas de cultivo, ainda se analisa a utilização de máquinas inapropriadas provocando modificações importantes no solo, conseqüentemente situações adversas como aumento da resistência à penetração das raízes, alteração na disponibilidade de fluxo e na capacidade de retenção da água e nutrientes, bem como redução da aeração do solo. Estes fatores quando combinados podem reduzir a qualidade do solo.

A qualidade do solo é a capacidade do solo em desempenhar suas funções, tais como cita-se: meio de crescimento das plantas, regulador do abastecimento de água, reciclador de matérias-primas, agente modificador da atmosfera, habitat para microrganismos e meio para obras de engenharia. Logo avalia-se que deve haver o equilíbrio de suas características físicas, químicas e biológicas para que sua qualidade seja garantida (FERNANDES *et al.*, 2018).

Neste cenário, conforme explicam Silva *et al.* (2020), os empregos de manejos adequados ao solo, em parceria com o desenvolvimento tecnológico, permitem ao agronegócio maximizar a produção visando excelência no desempenho, a preservação da estrutura do solo e dos recursos naturais. Logo entende-se a necessidade de utilizar métodos que melhorem a sustentabilidade do solo, tais como o manejo direto, o sistema de integração entre culturas e a produção agropecuária, entre outros, e que permitam elevar a qualidade do produto final, por meio da conservação natural do estado do solo e a recuperação de áreas degradadas.

Neste contexto, há um destaque para o desenvolvimento tecnológico, ou seja, utilização de novos equipamentos de diagnóstico da estrutura do solo tais como: simuladores de tráfego agrícola, aparelhos que avaliam a consolidação de solos, etc. Bem como, procedimentos de otimização de práticas e técnicas, melhoria no monitoramento da qualidade pós-colheita, logística, rastreabilidade e estocagem, com uso da compreensão de fenômenos e tecnologias (KLERKX *et al.*, 2019).

Para Candine *et al.* (2021) o comportamento estrutural do solo agrícola pode sofrer alterações devido a compactação ocasionada pelo tráfego de máquinas agrícolas, assim o uso de tecnologias, equipamentos como simuladores de tráfego, ensaios de cisalhamento, ensaios de consolidação são importantes para conhecer níveis de pressão que podem ser aplicados para melhoria do desempenho do solo e da produtividade.

Diante disso, os avanços tecnológicos intensificaram-se o emprego de tráfego de máquinas agrícolas mais robustas e velozes, de modo que os processos de colheita e semeadura, tornaram-se mais dinâmicos, ocasionando um maior impacto na estrutura e na qualidade do solo (NUNES *et al.*, 2016). Assim, entender o equilíbrio entre o aumento da produtividade e as modificações estruturais do solo é desafiador. Deste modo, qualquer contribuição científica neste cenário será de extrema importância.

Sanches *et al.* (2018) relataram que a busca por maiores produtividades, manejos adequados e a infraestrutura produtiva, tem direcionado as pesquisas de modo a obter melhores safras e melhores condições estruturais para o solo. Neste contexto, dentre as práticas de manejo do solo, o plantio direto têm sido o processo de melhor desempenho em termos de produtividade e preservação ambiental (SILVA, 2014). Esse sistema é definido como sistema de manejo conservacionista com técnicas que objetivam a conservação física e química dos solos, por meio da rotação de culturas e ausência de revolvimento e cobertura permanente do solo (FAGUNDES *et al.*, 2019).

3.1.1 Plantio Direto.

Sanches *et al.* (2018) relataram que a busca por maiores produtividades, manejos adequados e a infraestrutura produtiva, tem direcionado as pesquisas de modo a obter melhores safras e melhores condições estruturais para o solo. Desta forma, dentre as práticas de manejo do solo, o plantio direto têm sido o processo de melhor desempenho em termos de produtividade e preservação ambiental (SILVA, 2014). Esse sistema é definido como sistema de manejo conservacionista com técnicas que objetivam a conservação física e química dos solos, por meio da rotação de culturas e ausência de revolvimento e cobertura permanente do solo (FAGUNDES *et al.*, 2019).

No plantio direto, não são utilizados aração e gradagem, logo não há cortes no solo, nem alteração significativa da estrutura do solo na camada superior; utilizando continuamente o solo e mantendo o maior tempo possível de vegetação na ocupação da área (SILVA, 2014).

Conforme explicam Tomaz e Wander (2017) dentre vários fatores positivos, o plantio direto, quando manejado de forma inadequada, ocasiona prejuízo no solo, tais como a compactação (estruturação), conseqüentemente o aumento da densidade e redução da porosidade do solo, diminuindo assim a eficiência da infiltração de água e dificultando o desenvolvimento da cultura para a produtividade esperada, pode ser observar um sistema de Plantio direto na Figura 1, no Instituto Federal Goiano Campus de Morrinhos. O sistema de

plantio direto quando aplicado adequadamente permite uma estabilidade de da porosidade, melhor desenvolvimento dos microrganismos do solo, crescimento radicular, melhoria da drenagem e armazenamento de água; quando ocorre a sucessão de culturas e sem revolvimento do solo, que vem sendo muito utilizado na atualidade, favorece a compactação, pelo tráfego de máquinas em maiores condições de umidade, afetando as propriedades físicas do solo (SILVEIRA, *et.al.*, 2022).

Figura 1 –Sistema de plantio direto no IF Goiano



Fonte: Autor (2022)

3.1.2 Integração Lavoura Pecuária Floresta (ILPF).

Segundo Pacheco *et al.* (2016) houve um aumento no desenvolvimento de pesquisas voltadas para sistemas de produção que integram a atividade agrícola, pecuária e florestal, ocasionando a intensificação do sistema de produção, melhoria do desempenho dos solos e dos recursos naturais disponíveis. Manejos que permitam a sustentabilidade de sistemas de produção agrícola e melhoria da estrutura do solo, de modo a reduzir a perda de nutrientes do solo, os processos erosivos e a resistência ao cisalhamento devido a compactação do solo, são de extrema importância e devem ser estudados (REICHERT *et al.*, 2016).

A implantação de um sistema de integração baseia-se em conceitos como a rotação de culturas e consórcio entre grãos, forrageiras, espécies arbóreas, com a presença de gado; de forma a produzir, na mesma área, grãos, carne ou leite e produtos madeireiros e não madeireiros ao longo do ano. Os sistemas de ILPF permitem benefícios ao produtor e ao meio ambiente, tais como: melhoria dos aspectos físicos, químicas e biológicas do solo; aumento da

disponibilidade e a eficiência dos nutrientes, cria um ambiente propício para aumento da matéria orgânica no solo, e ainda melhor as condições ambientais do local utilizado, evitando também a degradação do solo (DIAS *et al.*,2021).

Segundo os mesmos autores, a integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) pode ser definida como uma estratégia de produção sustentável, integrando atividades agrícolas, pecuárias e florestais, realizadas na mesma área, para criação de um ambiente sustentável para agricultura e com condições ambientais de conforto térmico para criação de gado.

Conforme avaliam Assis *et al.* (2015) o sistema tem como vantagens também a redução de custos de produção, a diversificação e estabilização da renda na propriedade rural e viabilização da recuperação de áreas com pastagens degradadas. A elevação dos teores de matéria orgânica e a melhoria da qualidade física do solo, com níveis adequados de fertilidade evidenciam o potencial deste sistema, na redução do impacto ambiental, no aumento das atividades produtivas e nas questões ambientais como as emissões de gases de efeito estufa, melhorando o aproveitamento da água e dos nutrientes do solo. Tem-se observado que nas áreas com sistemas integrados de cultivo a qualidade do solo é superior em relação às áreas com monoculturas, na Figura 2 é observado um sistema ILPF no Instituto Federal Goiano campus de Morrinhos.

Figura 2 –Integração Lavoura Pecuária Floresta no IF Goiano



Fonte: Autor (2022)

3.2 Efeitos da Mecanização

Para De Marins *et al.* (2018) a estrutura do solo pode sofrer alteração em relação ao tráfego agrícola, podendo ocasionar recalques na superfície e aumento do grau de compactação, dificultando o crescimento radicular, o desenvolvimento da plântula e crescimento da cultura. As técnicas de manejo afetam a qualidade do solo, impactam a produtividade e qualidade dos produtos. É de extrema importância o desenvolvimento de estudos que visem avaliar as técnicas de manejos e seus impactos no solo, de forma a melhorar a qualidade e a produtividade do mesmo.

O estudo correto do manejo e da qualidade física dos solos é fator determinante para melhoria da produtividade agrícola, assim o conhecimento da sua resistência mecânica, densidade, porosidade, umidade entre outros fatores, são indicadores do grau de consolidação do solo. Logo na determinação da qualidade, o estudo da densidade do solo é eficaz e de mensuração fácil, avaliando o estado poroso do solo e as alterações volumétricas do mesmo (FERNANDES *et al.*, 2018).

A compactação do solo ocorre por meio de uma redução do volume de vazios ocasionada por aplicação de cargas de tráfego de máquinas, altera assim o seu estado estrutural natural podendo atingir a compressibilidade máxima que influencia de modo desfavorável seu desempenho para fins agrícolas (MION *et al.*, 2016). Sendo a compactação um parâmetro importante no entendimento da estrutura física do solo, conforme explica Candine *et al.* (2021), solos com maior grau de compactação possuem maior resistência ao cisalhamento, menor porosidade total e, conseqüentemente, maior densidade.

Conforme explica Silveira *et al.* (2022) entende-se como compactação do solo a compressão de solo não saturado, ocasionando um aumento da densidade, uma redução de volume pela expulsão do ar. A intensidade de compactação do solo depende de vários fatores, que incluem a pressão exercida pelo maquinário utilizado, em virtude do tamanho e tipo dos rodados, peso, frequência do tráfego na área de cultivo textura, agregação e umidade do solo, sendo este último um dos fatores mais importantes no manejo do solo .

3.2.1 Tensões dinâmicas aplicadas a solos.

O comportamento resistente de um solo, está diretamente relacionado com seus índices físicos, além da relação plasticidade x elasticidade do material. Assim são fatores de extrema

importância na determinação das relações de forças e tensões atuantes e conseqüentemente nas deformações e rupturas que possam acontecer, sabendo-se que a ruptura de um solo pode ocorrer de forma brusca ou por deformações excessivas (MOLINA JUNIOR, 2017).

Em solos agrícolas, cujo tráfego de máquinas pesadas é intenso, a estrutura é submetida às variações das tensões conforme aplicação de carga dinâmicas imposta pelo rodado, ocasionando tensões no mesmo e conseqüentemente uma deformação elástica conforme o seu percentual de umidade (CANDINE *et al.*, 2021).

A força de tração do trator é reduzida pelo solo, que oferece resistência ao avanço da roda, estando relacionado com duas condições: tipo de solo (textura e teor de água) e tipo de rodado (carga aplicada e área de contato pneu/solo). Logo essa resistência do solo, tanto horizontal devido ao atrito e rolamento, quanto vertical devido as tensões normais e cisalhantes; permite que o solo apresente uma capacidade de suporte de carga, sendo a capacidade da estrutura do solo em resistir a tensões induzidas pelo tráfego de máquinas ou pisoteio animal, sem mudanças no arranjo tridimensional das partículas constituintes do solo, em uma determinada umidade (COUTO, *et al.*, 2013).

Segundo o mesmo autor, um dos parâmetros para avaliar a capacidade de suporte do solo, é a obtenção da pressão de pré-consolidação obtida por métodos como: ensaio de compressão odométrica, ensaio de adensamento ou ensaio de compressão uniaxial. O ensaio de compressão axial, pode ser realizado por meio de um consolidômetro, e simula o comportamento do solo sob diversas pressões. As tensões, ocasionadas devido a ação da carga dinâmica sobre o solo, são aplicadas em todas as faces do elemento de contato, e são provenientes da decomposição da tensão resultante segundo as direções dos três eixos de coordenadas (ANTUNES JUNIOR, *et al.*, 2016).

Conforme explica o mesmo autor, quando o solo já sofreu pressões prévias, o mesmo adquire certo grau de compactação, sofrendo deformações apenas quando submetidos a pressões superiores às anteriormente aplicadas. O comportamento da curva de compressão do solo nessas condições é descrito em duas regiões características: uma de deformações elásticas e recuperáveis, denominada de curva de compressão secundária (portanto, não degradando a estrutura do solo) e uma região de deformações plásticas e não recuperáveis, denominada de curva de compressão virgem.

As ações de tensões aplicadas no solo geram nas camadas inferiores do mesmo, conforme aumenta a profundidade, um acréscimo de tensões atuantes criando-se uma região chamada de bulbo de tensões, como pode ser ilustrada na Figura 3. Em solos agrícolas, o bulbo de tensões criado pela carga dinâmica do tráfego, acarreta em aumento da densidade do solo

em profundidades acima de 20 cm da superfície, promovendo maior consolidação nessas profundidades. (PINTO, 2006).

Figura 3 –Representação Esquemática gráfica do bulbo de tensões



Fonte: Adaptado, Candine et.al., (2021)

Os solos agrícolas, sofrem tensões ao longo do tempo, ocasionadas por exemplo por carregamento dinâmico, e para determinação dessas tensões é necessário entender o conceito de tensão de pré adensamento ou pré consolidação, sendo considerada a tensão máxima que o solo já esteve submetido na natureza. Assim, para a determinação dessa tensão é necessários ensaios que definem essa grandeza, são realizados em amostras indeformadas que conservam não somente a umidade e a massa específica aparente, mas também sua estrutura e procuram determinar tensões a qual tal meio esteve submetido em ocasiões anteriores, ou seja a máxima pressão a que o solo esteve submetido na natureza (MOLINA JUNIOR, 2017).

Segundo o mesmo autor, na agricultura o estudo adequado do pré adensamento é importante para a verificação do comportamento do solo de forma a verificar os efeitos do preparo, do manejo e o tráfego sobre o mesmo, para determinação das deformações e condições do mesmo.

3.2.2 Indicadores Físicos de qualidade de solos.

O comportamento de um solo depende da quantidade relativa de cada uma das suas três fases: sólida, água e ar, conforme representada pela Figura 4. Assim as quantidades de água e ar podem variar, se houver evaporação ou compressão, reduzindo o volume de vazios (volume de água e ar). Em relação as partículas sólidas não há alteração, porém quando reduz seu volume

de vazios, sua resistência aumenta, logo para a agricultura tem-se um déficit na qualidade do mesmo (PINTO, 2006).

Ainda segundo o mesmo autor pode-se definir como:

Umidade do solo – Relação entre o peso da água e o peso dos sólidos, variando conforme o tipo de solos.

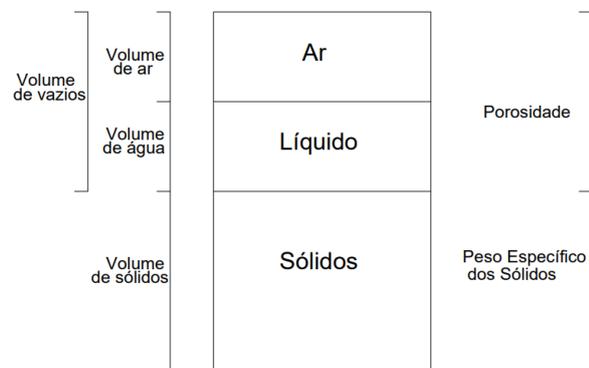
Índice de Vazios- Relação entre o volume de vazios e volume de partículas sólidas. Geralmente varia entre 0,5 e 1,5; porém argilas mais orgânicas podem ser superiores a 3.

Porosidade – Relação entre volume de vazios e volume total. Pode ser dividida entre macroporos e microporos.

Peso Específico dos grãos (ou dos sólidos) - É uma característica dos sólidos. Relação entre o peso das partículas sólidas e seu volume. Varia pouco de solo para solo. Não permite identificar o solo, mas é necessário para determinar outros índices físicos.

Peso Específico Aparente Seco – Relação entre o peso dos sólidos e o volume total. Calculado a partir do Peso Específico Natural do solo e Umidade.

Figura 4: Representação das partes integrantes do solo.



Fonte: Adaptado, Pinto (2006)

3.2.3 Módulo de Rigidez de Solos.

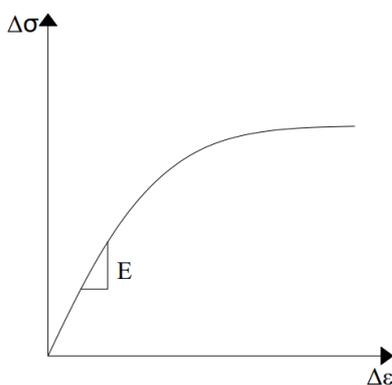
O comportamento mecânico dos solos em resposta às solicitações dinâmicas, os parâmetros elásticos, especialmente o módulo de rigidez, são de extrema importância na avaliação do deslocamento vertical do mesmo. Existe um aumento significativo na demanda de ensaios e avaliações que possibilitem melhor conhecimento e interpretação desse parâmetro para a análise do solo. A rigidez do solo é não-linear e afetada por vários fatores, dentre eles: o

intervalo de deformações, o estado de tensões, a estrutura, o histórico de tensões, entre outros. Assim, o comportamento elástico do solo ocorre em pequenos níveis de deformação, nos ensaios não-destrutivos, para níveis de deformações acima deste limiar, a rigidez do solo diminui com o aumento das deformações (ROCHA e GIACHETI, 2017).

Solos com deformações pequenas e submetidos a acréscimo de tensões, são susceptíveis a sofrerem deformações elásticas em referências ao carregamento da superfície. Em ensaios de compressão axial, a tensão vertical aplicada permite que o corpo de prova sofra uma deformação axial, assim admite-se um comportamento elástico- linear, definindo um módulo de rigidez, obtido da relação tensão x deslocamento vertical do solo, principalmente quando existe o acréscimo de tensões (PINTO, 2006).

O solo pode possuir um comportamento não linear em relação a aplicação de tensões e deformações obtidas, assim o módulo de rigidez, ou elasticidade do solo, vai depender do patamar em que se encontra na curva de degradação (curva do gráfico de tensão x deformação), podendo definir assim vários módulos de rigidez, sendo um dos mais comuns o módulo de elasticidade ou rigidez de Young, ou também conhecido como módulo secante máximo, assim a Figura 5 exemplifica o módulo de rigidez, conforme a relação de tensão e deformação (CORREIA, 2004).

Figura 5 –Representação Esquemática gráfica do Módulo de Rigidez.



Fonte: Autor (2022)

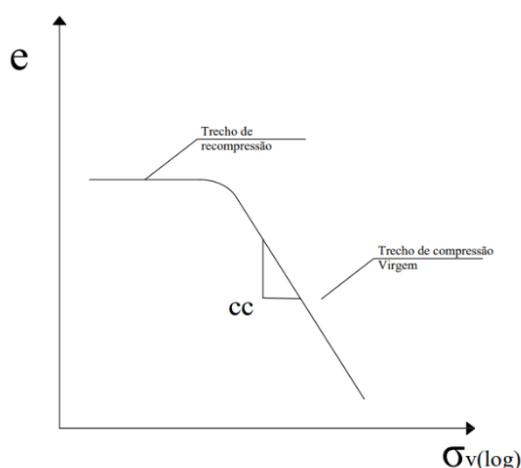
3.2.4 Índice de compressão (CC)

A redução da porosidade do solo decorrente de pressões externas exercidas sobre ele por máquinas agrícolas tem sido simulada por meio do teste de compressão uniaxial, obtendo-se a curva de compressão do solo, a qual representa graficamente a relação entre algum parâmetro relacionado com a estrutura do solo, como índice de vazios, porosidade ou densidade do solo

em função da pressão vertical aplicada. Através da curva de compressão se determina a pressão de pré compactação do solo, que indica a capacidade de suporte de carga do solo, correspondendo à pressão máxima que o solo pode suportar sem sofrer compactação. (MACEDO, SILVA E CABEDA, 2010)

Segundo os mesmos autores, um dos parâmetros importantes para avaliar a situação de solos agrícolas submetidos a tráfego de máquinas, é o índice de compressão do solo (CC), esse índice equivale à inclinação da reta de compressão virgem, ou seja, estado de deformação natural do solo antes de atingir o pré adensamento, é usado como indicador da compressibilidade, sendo que quanto maior o CC de um solo, mais compressível ele é. Podendo ser obtido por meio da análise das tensões e deformações e ainda em relação ao índice de vazios do solo.

Figura 6 –Representação Esquemática gráfica do Índice de Compressão.



Fonte: Autor (2022)

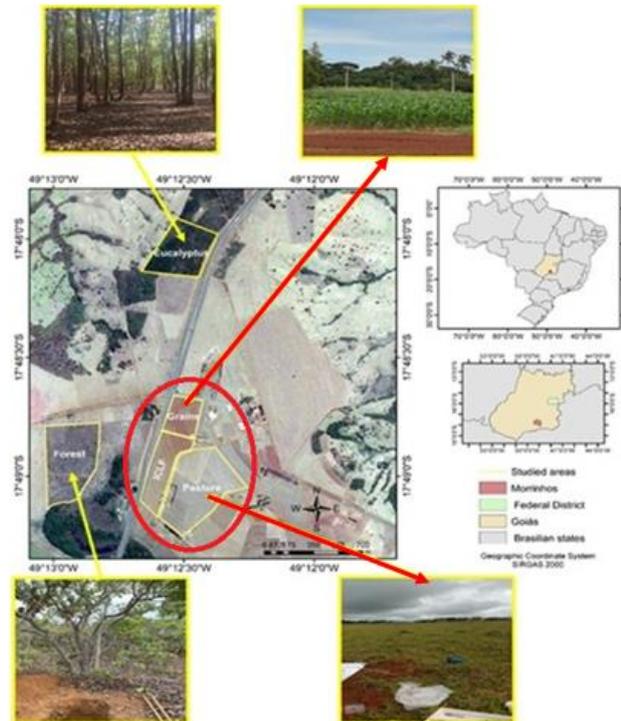
4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Informações Gerais.

A área experimental localiza-se no Instituto Federal Goiano – Campus Morrinhos, situado no município de Morrinhos, Estado de Goiás, nas coordenadas de 17°49' latitude sul e 49°12' longitude oeste, com altitude média de 900 metros, conforme Figura 7. O clima da região é classificado como Aw (tropical úmido, com verão chuvoso e inverno seco), segundo Köppen-

Geiger, com precipitação média anual de 1.346 mm (ALVARES *et al.*, 2013). O solo, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos é caracterizado como um Latossolo Vermelho Distrófico (EMBRAPA, 2017).

Figura 7 –Mapa demonstrativo para localizar as áreas de PD, ILPF e PAST.



Fonte: IF Goiano (2021)

4.2 Delineamento e tratamentos experimentais

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado (DIC), com esquema fatorial 3x4x5, em parcelas sub subdivididas, sendo as parcelas três áreas com diferentes manejos:

ILPF – Integração Lavoura Pecuária Floresta

PD- Plantio Direto;

PAST- Pastagem;

As subparcelas são os carregamentos dinâmicos, dados pela passagem do rodado do simulador de tráfego:

0 Kpa- 0 passada

108 Kpa- 1 passada

216 Kpa- 2 passadas.

As sub subparcelas, são os carregamentos de consolidação, dados pela aplicação da carga no consolidômetro automático.

Carga 108 Kpa

Carga 216 Kpa

Carga 432 Kpa

Carga 864 Kpa

Carga 1500 Kpa

A casualização foi considerada na escolha dos pontos para retirada das amostras, conforme pode ser observada a Figura 8, um croqui experimental ilustrando a área delimitada e a retirada de amostras, e observa-se um fluxograma indicativo na Figura 9 exemplificando as etapas de execução do experimento.

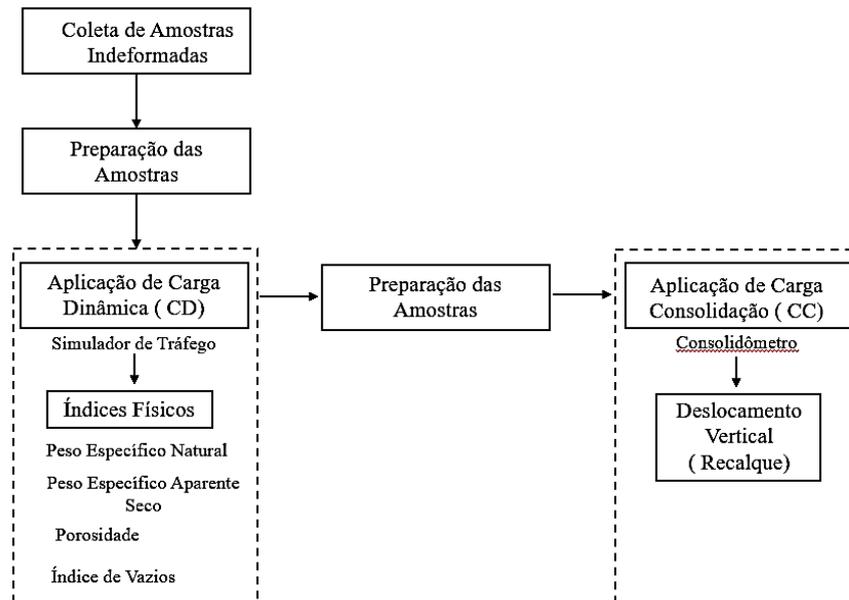
Em relação aos índices físicos do solo, para a análise estatística foi utilizado um delineamento inteiramente casualizado, com parcela subdivididas em esquema fatorial, sendo as parcelas consideradas os manejos (ILPF, plantio direto e pastagem) e as subparcelas os carregamentos dinâmicos (0, 1 e 2 passadas), com 3 repetições. Assim avaliou-se antes de submeter ao efeito da carga de consolidação, os índices físicos do solo: Peso Específico Natural, Peso Específico Aparente Seco, Índice de Vazios, Porosidade, para assim saber as características iniciais sob o efeito do tráfego agrícola.

Os dados foram submetidos à análise de variância, pelo teste F, e quando significativas, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de significância, e regressão polinomial com a curva que melhor se enquadra. Como premissas, foram verificadas a homogeneidade das variâncias e a normalidade dos resíduos. Foi utilizado o programa computacional SISVAR 5.6 para as análises estatísticas (FERREIRA, 2014) e R-COMMANDER.



Fonte: Autor (2022)

Figura 9 – Fluxograma das etapas execução do experimento.



Fonte: Autor (2022)

4.3 Coleta das Amostras

As foram coletadas conforme a Norma Regulamentadora Brasileira NBR 9604 (ABNT, 1996b) – que consiste na abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas.

As amostras indeformadas foram obtidas a uma profundidade de 0,05 a 0,40 m da superfície do solo, com dimensões 0,20 x 0,20 x 0,40 m, com uso de uma forma de madeira colocado sobre o solo (Figura 10a) para garantir que o mesmo fosse retirado de forma padronizada, assim a escavação foi realizada conforme as recomendações da norma citada (Figura 10b), e o solo retirado da trincheira enrolado com papel filme para manter suas características físicas (Figura 10c), e etiquetados para correta identificação das amostras (Figura 10d). As amostras foram devidamente transportadas e acondicionadas na Câmara úmida do Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Goiás no Câmpus Central-Anápolis CET, para manterem a umidade natural do solo.

Figura 10 a- Fôrma de moldagem para coleta de amostras indeformadas; b- Escavação da amostra indeformada; c- retirada e proteção da amostra para garantir a integridade e a umidade; d- identificação das amostras coletadas.



Fonte: Autor (2022)



Fonte: Autor (2022)

As amostras foram coletadas nas diferentes áreas agrícolas com sistemas de plantio direto(PD), integração lavoura pecuária floresta (ILPF) e pastagem(PAST). Os sistemas de manejos referentes ao estudo (ILPF, PD, PAST) possuem área total de 3.0, 9.6 e 18.0 hectares, respectivamente. Assim foi delimitado uma área de 1 hectare por sistema de plantio para a coleta das amostras indeformadas de solo, sendo realizadas em pontos aleatórios dentro da área de estudo, foram coletados 12 blocos de solo por manejo, totalizando 36 pontos amostrais. A casualização será obtida por meio do sorteio das subparcelas.

4.4 Caracterização das áreas de manejo.

A área de ILPF possui 3 anos de utilização, com início em janeiro de 2018 com coveamento e adubação de cova composta de 150 g do formulado 11-52-00 e 50 g do formulado 00-00-60, e posterior o transplântio. O manejo da área ocorreu com desrama das plantas de eucaliptos até a altura de 0,5 m ,com o objetivo de retirar os ramos “ladrões” e também para facilitar a aplicação do dessecante na área, em seguida realizou-se a dessecação total, com exceção dos renques de eucalipto, da área com o herbicida Glifosato (3 L p.c ha-1), essa dessecação foi realizada para o plantio do milho correspondente ao elemento de lavoura, a semente utilizada foi a cultivar 30F35VYHR da empresa PIONEER tratamento industrial com inseticida, em espaçamento de 0,5 m entre linhas, com densidade de plantio de 76000

sementes/ha. Consorciado ao milho foi plantado a lanço o *Panicum maximum* cv. BRS Zuri utilizando 9,37 kg/ha. A colheita do milho com o *Panicum maximum*, para silagem foi realizado nos dias 14 e 15 de março com uma automotriz com plataforma de 6 metros. Foram considerados uma área total plantada de 5,6 ha, com uma produtividade de 41,42 Toneladas/ha.

Foi realizada uma nova desrama nos eucaliptos, com elevação da altura até 1,80 m, em seguida no período de 01 e 02 de abril de 2019 com adubação de cobertura da parte arbórea, utilizando ácido bórico, foram aplicados 20 g por árvore. Ocorreu plantio do Girassol (50.000 plantas/ha) consorciado com o capim BRS Piatã (8 kg/ha) com posterior colheita para silagem no dia 01/07/2019, com permanência do componente forrageiro. O gado foi colocado no local em fevereiro de 2020 com posterior roçagem em março deste mesmo ano, essa decisão com acréscimo da componente pecuária estava prevista para fim de 2019, porém devido a questões logísticas precisou ser adiada para a data de fevereiro de 2020 para possibilitar uniformizar a mesma e propiciar rebrote adequado e a entrada dos animais em sequência. Atualmente área se encontra com as plantas de eucaliptos em desenvolvimento (média de 15 metros de altura) e o componente forrageiro (piatã) em pleno rebrote para posterior entrada dos animais, como pode ser observada a Figura 11a.

A área correspondente ao plantio direto (Figura 11b), possui 5 anos no modelo tradicional de cultivo da região, sendo realizado plantio de soja safra (outubro e novembro) e milho segunda safra (fevereiro e março). A área de pastagem não possui histórico de cultivo agrícola (Figura 11c).

Figura 11a –Imagem da área de ILPF; b- Imagem da área de Plantio Direto; c – Imagem da área de Pastagem.





Fonte: Autor (2022)

4.5 Caracterização dos Solos

O ensaio de caracterização foi realizado pelo LTEC- Laboratório Técnico e Engenharia com amostras deformadas coletadas para cada sistema agrícola, assim obtendo parâmetros como: umidade do solo no momento da coleta, densidade do solo, porosidade, densidade de partículas (Índices Físicos); limites de plasticidades, liquidez e contração (Limites de Consistência), como podem ser observados na Tabela 01 as especificações.

TABELA 1–Ensaio de caracterização dos solos do PD, ILPF e PAST.

PLANTIO DIRETO		
Umidade (%)	Natural	Higroscópica
	6,18	1,92
Peso Específico dos Grãos (g/cm ³)	2,859	
Distribuição Granulométrica		
Pedregulho (kg/kg)	0	
Areia (kg/kg)	69	
Silte (kg/kg)	20,5	
Argila (kg/kg)	10,5	
Classificação	Areia Silto Argilosa	
Limites		
Liquidez (kg/kg)	34,2	

Plasticidade (kg/kg)	27,1
Índice de Plasticidade (kg/kg)	7,1
ILPF	
Umidade (%)	Natural 5,38
	Higroscópica 2,87
Peso Específico dos Grãos (g/cm ³)	2,867
Distribuição Granulométrica	
Pedregulho (kg/kg)	0
Areia (kg/kg)	70,8
Silte (kg/kg)	18,9
Argila (kg/kg)	10,3
Classificação	Areia Siltosa
Limites	
Liquidez (kg/kg)	37,5
Plasticidade (kg/kg)	24,3
Índice de Plasticidade (kg/kg)	13,3
PASTAGEM	
Umidade (%)	Natural 5,79
	Higroscópica 2,02
Peso Específico dos Grãos (g/cm ³)	2,8848
Distribuição Granulométrica	
Pedregulho (%)	0
Areia (kg/kg)	72,8
Silte (kg/kg)	21,3
Argila (kg/kg)	5,09
Classificação	Areia Silto Argilosa
Limites	
Liquidez (kg/kg)	32,4
Plasticidade (kg/kg)	26,1
Índice de Plasticidade (kg/kg)	6,3

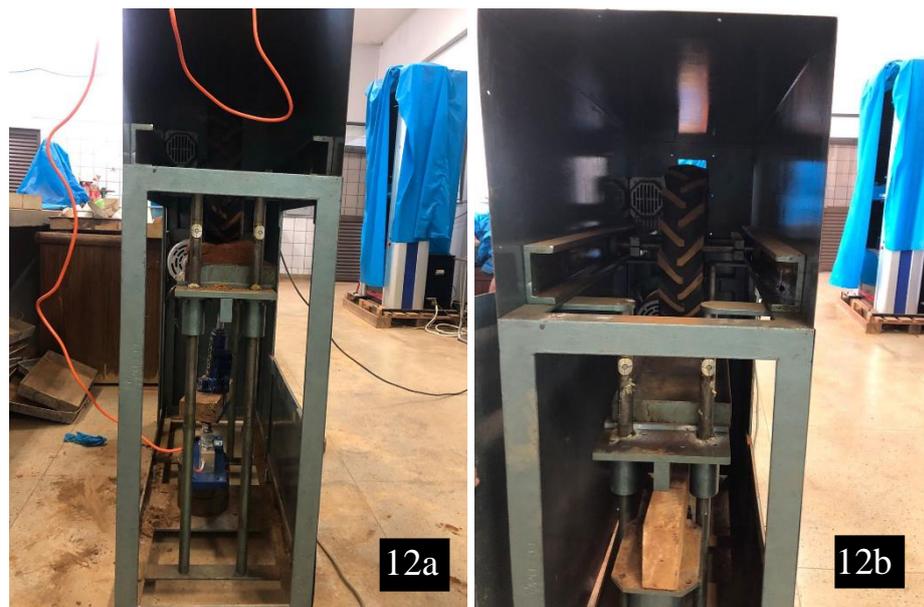
Fonte: Autor (2022)

4.6 Ensaios de Aplicação de Carga Dinâmica- Simulador de Tráfego.

Essa etapa do experimento foi conduzida no Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Estadual de Goiás (Campus Central – sede Anápolis) com uso de um simulador de tráfego linear, equipamento desenvolvido para estudar e avaliar a atuação de cargas dinâmicas verticais aplicadas ao solo, e assim verificar o comportamento desse material devido essa aplicação de cargas. Foi adaptado para a utilização em solos agrícolas sendo necessário a

utilização de uma roda submetida a um esforço vertical, com auxílio de uma célula de carga que faz a leitura da força aplicada, assim sua eficiência comprovada tecnicamente, conforme ilustra a Figura 12 o equipamento é composto por uma estrutura metálica, uma bandeja móvel que permite a regulagem e a colocação do corpo de prova, o motor e o rodado, um macaco hidráulico e uma célula de carga .

Figura 12 a e b- detalhes do simulador de tráfego.



Fonte: Autor (2022)

As amostras de solo indeformadas foram preparadas e redimensionadas para serem utilizadas no simulador de tráfego (Figura 13 a e b), por meio de uma forma metálica com dimensões 0,20x0,20x0,05 m os blocos de solo foram moldados com dimensões 0,20x0,20x0,10 m, para que assim pudessem ser ensaiadas no simulador, conforme podem ser observadas as Figuras. Foram ensaiados 3 corpos de prova para cada carga aplicada, e para cada manejo, assim totalizando 36 unidades amostrais obtidas devido a aplicação de carga pelo simulador de tráfego.

O movimento de ida e volta, da roda do simulador de tráfego, são consideradas como passadas, assim sendo o carregamento aplicado de 0, 25 e 50 equivale respectivamente a 0 passadas, 1 passada e 2 passadas, para a verificação das variáveis referentes a imposição dessas ações mecânicas, que foram mensuradas por meio de uma célula de carga e uso de macaco hidráulico para aplicação das cargas.

A pressão de inflagem do pneu é constante para todos os tratamentos e com valor igual a 96,5 kpa, e área de contato pneu/solo é de 0,00227 m² conforme recomenda, Couto et al. (2013). Assim segundo o mesmo autor, considerando 1 kgf = 9,80665 N, os carregamentos em Newton (N) serão (0, 245,17, 190,33) aplicando a equação abaixo para cálculo da pressão média de contato solo/pneu, tem-se: 0, 108, 216.

$$Pm = \frac{W}{S} \text{ eq. 1}$$

Em que:

Pm = Pressão média aplicada ao solo pelo rodado (Pa)

W= Carga suportada pelo rodado (N)

S= Área de contato do rodado (m²)

Figura 13a –Moldagem dos solos com forma metálica para realizar o ensaio de simulação de tráfego; b- amostra de solo para o simulador de tráfego retirada para realização do ensaio de simulação de tráfego.;



Fonte: Autor (2022)

3.6 Determinação dos Índices Físicos e Módulo de Rigidez.

A determinação dos Índices Físicos do solo, ocorreu após a realização do ensaio de carga dinâmica, e antes do ensaio de compressão uniaxial, assim os resultados obtidos são referentes

as condições das passadas do rodado, 0, 1 e 2. Analisa-se que para 0 passada, o solo encontra-se na condição natural de campo.

Na moldagem dos solos para realizar o ensaio de consolidação, os parâmetros necessários para cálculo dos índices físicos foram coletados. Inicialmente utilizou-se o anel de consolidação para as coletas da massa do anel e dimensões (comprimento e altura), com essas informações obteve o volume de cada amostra. Após a moldagem no corpo de prova, o mesmo foi pesado e obtiveram os dados de massa do anel + massa do solo (Figura 14), realizando uma subtração simples, chega-se a massa total de solo moldado.

Figura 14a- amostra sendo pesada para realizar os cálculos dos índices físicos;



Fonte: Autor (2022)

O ensaio de compressão uniaxial foi realizado, em seguida a amostra foi retirada do anel, novamente pesada em um recipiente e levada para uma estufa, onde ficou acondicionada por 24 horas para determinação da umidade do solo. A partir desses parâmetros e baseados nas equações matemáticas foram determinados os índices físicos do solo:

Peso Específico Natural (ρ_n) – g/cm³

$$\rho_n = \frac{V_t}{M_s} \text{ eq. 2}$$

ρ_n = Peso Específico Natural (g/cm³)

V_t = Volume Total de Solos (cm³)

M_s = Massa de solo (g)

Peso Específico Aparente Seco (ρ_d) – g/cm³

$$\rho_d = \frac{\rho_s}{(1 + e)} \text{ eq. 3}$$

ρ_n = Peso Específico Aparente Seco (g/cm³)

ρ_s = Peso Específico dos Sólidos (cm³)

e = Índice de Vazios.

Índice de Vazios (e)

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \text{ eq. 4}$$

e = Índice de vazios

ρ_d = Peso Específico Aparente Seco (g/cm³)

ρ_n = Peso Específico dos Sólidos (cm³)

Porosidade (η)

$$\eta = \frac{e}{1 + e} \text{ eq. 5}$$

η = Porosidade

e = Índice de vazios.

Módulo de Rigidez.

$$E = \frac{\sigma}{L} \text{ eq. 6}$$

E= Módulo de rigidez do solo;

σ = Tensão aplicada no solo (Kpa);

L= Descolamento vertical.

$$CC = \frac{\Delta\sigma}{\Delta e} \text{ eq. 7}$$

CC= Índice de Compressibilidade

$\Delta\sigma$ = Variação de tensão.

ΔL = Variação de Descolamento Vertical.

3.8 Ensaio de Compressão Oedométrica- Cargas de Consolidação.

O Ensaio compressão uniaxial, foi realizado no Laboratório de física dos solos do Centro de Pesquisa de Pós-Graduação da Universidade Estadual de Goiás, Campus Central- sede Anápolis, utilizando um consolidômetro automático com IHM da marca Masquetto, cuja aplicação das pressões se faz por meio da utilização de ar comprimido. Conforme explica, Silva *et al.* (2015) aparelho é utilizado para a obtenção da pressão de pré-consolidação de um solo, a partir do método de ensaio de consolidação, consiste no processo de transferência gradual de uma carga aplicada à estrutura do solo, até que todos os vazios do solo sejam comprimidos.

As pressões aplicadas, não foram as pressões padronizadas do aparelho, sendo consideradas com base no cálculo da área de superfície de contato do pneu /solo igual a 0,00227 m², a pressão de aplicação da carga no simulador de tráfego, assim para cada amostra as pressões, obedeceram à seguinte ordem:0, 108, 216, 432, 864 e 1500 Kpa, sendo cada uma aplicada até que a deformação máxima fosse alcançada, (SILVA *et al.*, 2015).

Para cada amostra de solo moldada no anel de consolidação, foi verificado o peso antes da aplicação das cargas (Figura 15c) para avaliação dos índices físicos do solo, e em seguida levada

para uma estufa aquecida a temperatura média de 100°C sendo que após 24 horas o solo foi retirado e pesado para coleta da umidade natural do solo.

Figura 15a –Moldagem do corpo de prova no anel de consolidação para realizar o ensaio de compressão uniaxial; b- corpo de prova moldado; c- pesagem do corpo de prova; d- aparelho de compressão uniaxial;



Fonte: Autor (2022)

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ANÁLISE VARIÂNCIA

Para elaboração da análise dos dados foi necessário o uso de transformação Boxcox, a transformação recomendada conforme Barbin (2013), foi utilizada transformação por meio da \sqrt{x} , para garantir a normalidade dos dados por meio do teste de liliefors, e a homogeneidade de variância pelo teste de bartlet.

Observa-se pela análise de variância que em relação aos tratamentos tipo de manejo, cargas dinâmicas e de consolidação para a variável deformação do solo, sendo significativos a Carga Dinâmica (CD), Carga de Consolidação (CC), e a interação entre Manejo e CC, sendo assim pode-se inferir que esses tratamentos apresentaram diferenças significativas. Tendo-se avaliado o Manejo, as interações: entre os tratamentos Manejo, CC e CD, entre Manejo e CC, e CC com CD, não diferiram estatisticamente, logo não possuem significância estatística e não impactam de forma relevante a variável deformação.

TABELA 2– Resumo da análise de variância (valor de p) dos valores médios de deslocamento vertical em mm para as variáveis do manejo sob aplicação da carga dinâmica e carga de compressão uniaxial.

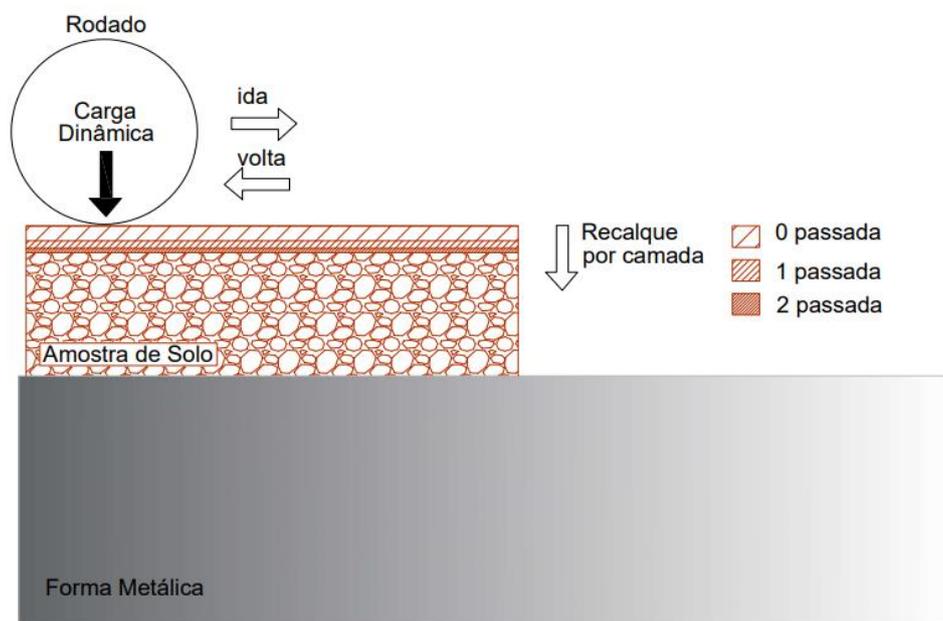
FV	SQ	Deslocamento Vertical
Manejo	0,837	0,372 ^{ns}
CD	1,7099	0,0102*
CC	7,0250	0,0000*
Manejo *CD * CC	0,5025	0,2315 ^{ns}
Manejo * CD	0,6262	0,0000*
Manejo * CC	0,0789	0,9166 ^{ns}
CD * CC	0,3020	0,1577 ^{ns}
CV1: Coeficiente de Variação da Parcela (%)	43,89	
CV2: Coeficiente de Variação da Subparcela (%)	16,84	
CV3: Coeficiente de Variação da Sub subparcela (%)	12,03	

*A 5% de significância. ns: não significativo.

4.1 Carga Dinâmica (CD)

Na avaliação do comportamento de um solo, submetido a ação de cargas dinâmicas, é importante ressaltar que existe a influência da área da superfície de contato solo-rodado, e da pressão de inflação do pneu. Assim manteve-se a pressão de inflação do pneu constante para aplicação das cargas no simulador de tráfego. A figura 16 ilustra o efeito.

Figura 16 –Representação Esquemática da aplicação de Carga Dinâmicas



Fonte: Autor (2022)

Conforme ilustra a figura 16 logo após a aplicação das cargas dinâmicas a camada se estrutura cada vez mais. Percebe-se que solos que não sofreram com aplicação de cargas dinâmicas, ou seja, solo com 0 passada (0 Kpa), possuem maior capacidade de deformação, logo este efeito é evidenciado quando solos em estado inicial sem aplicação de carga dinâmica, possuem maiores deformações quando aplicada uma tensão de consolidação pois não foram submetidos ao efeito da pré-consolidação, deste modo, o carregamento aplicado na consolidação evidencia o efeito da estrutura do solo.

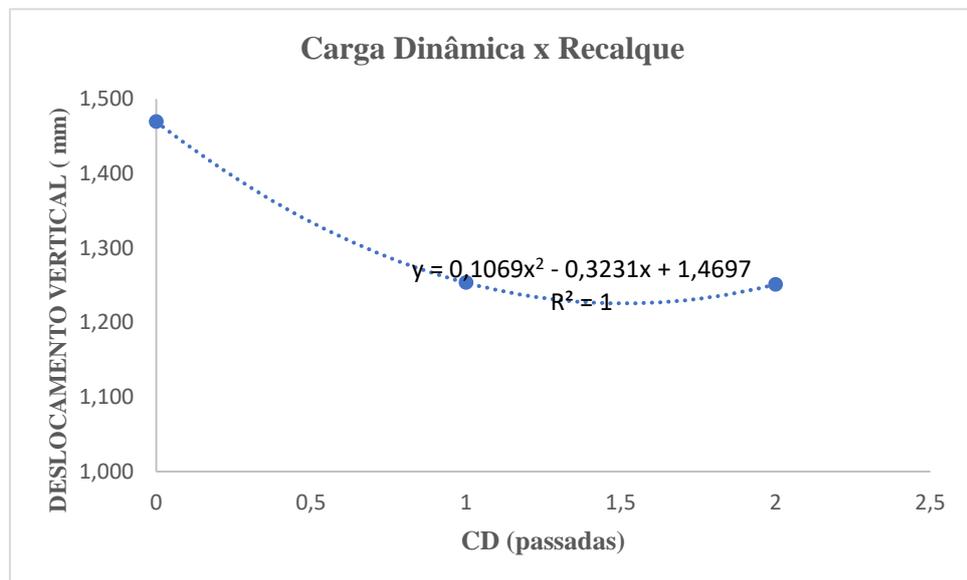
Observe os valores apresentados na Tabela 3, e representados graficamente por meio da Figura 17, e verifique que quanto maior o carregamento dinâmico (mais estruturado está o solo) e menor é a deformação quando se aplica o carregamento de consolidação.

TABELA 3- Valores médios de descolamento vertical (recalque) em função da Carga de Dinâmica (CD) aplicada.

Carga de Dinâmica	Média
0	1,470
1	1,254
2	1,251

Fonte: Autor (2022)

Figura 17– Relação das médias do deslocamento vertical em relação as passadas.



Fonte: Autor (2022)

A figura 17, apresenta no eixo horizontal estão apresentadas as cargas dinâmicas, por meio do número de passadas: 0, 1 e 2 passadas; e no eixo vertical a média das deformações sofridas para cada passada. Assim, para 1 passada a deformação sofrida é menor em comparação ao solo que não sofreu efeito de carga de dinâmica, entende-se que o antes da aplicação de uma carga de adensamento do solo se o mesmo sofreu uma deformação residual por meio de uma ação dinâmica, por exemplo, este já passou por um estresse, deformando e mesmo que de forma mínima passou por uma alteração da sua estrutura física.

No caso de 2 passadas, aplicação de 216 kpa, o solo possui o mesmo comportamento, sofrendo uma deformação residual antes da aplicação de uma tensão de adensamento, sofrendo antes uma deformação residual e ocasionando a uma deformação menor com a consolidação, logo pela análise das médias por meio de uma regressão linear, visto que são três pontos melhor

sendo representados por uma reta, considera-se estatisticamente a deformação para 2 passadas igual a 1 passada, inferindo –se que independente do manejo, o solo que foi submetido a carga dinâmica de 216 kpa, deforma-se menos que um solo que não foi, e a deformação tende-se a estabilizar conforme o número de passadas aumenta.

4.2 Carga de Consolidação (CC)

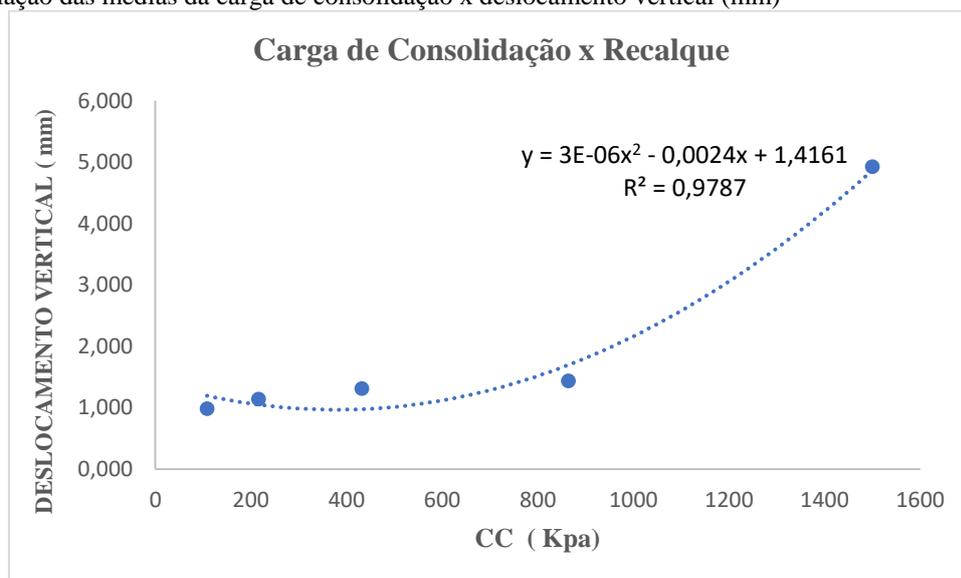
Na análise do comportamento do solo em relação a aplicação da carga de consolidação é importante observar, segundo o gráfico (Figura 18) mostra, que conforme a carga aplicada aumenta (108, 216, 432, 864 e 1500 Kpa), a média das deformações também aumenta, sendo notório o entendimento que, tanto para o ILPF, quanto para o plantio direto e a pastagem, o comportamento do solo é o mesmo para a deformação sob aplicação de uma tensão de compressão uniaxial para consolidação do mesmo. A Tabela 4 apresenta a média dos valores de deslocamento vertical em função da carga de consolidação. Ainda a Figura 18 apresenta a relação das médias da carga de consolidação x deslocamento vertical

TABELA 4- Valores médios de descolamento vertical (recalque) em função da Carga de Consolidação (CC) aplicada.

Carga de Consolidação (Kpa)	Média (mm)
108	0,938
216	1,142
432	1,310
864	1,435
1500	4,925

Fonte: Autor (2022)

Figura 18 – Relação das médias da carga de consolidação x deslocamento vertical (mm)



Fonte: Próprio Autor.

4.3 Interação Manejo x CD

Os tipos de manejo do solo interferiram e a carga de dinâmica interferiu de forma significativa no recalque do solo, como pode ser visto na Tabela 2. manejo em relação a carga dinâmica, foi necessário ser avaliada por meio de teste de médias, o teste utilizado foi o de Tukey, cuja a Tabela 5 abaixo apresenta os resultados, considerando cada manejo estudado, e as cargas dinâmicas aplicadas, apresenta-se ainda na Figura 19 uma representação por de um gráfico das médias do teste de tukey, em relação a condição de estruturação do solo.

TABELA 5- Valores médios obtidos por meio do teste de tukey, da interação entre manejos e cargas dinâmicas (CD) aplicadas.

Manejo	Carga Dinâmica CD		
	0	1	2
ILPF	1,245 Ac	1,342 Aa	1,242 Ab
PD	1,710 Aa	1,040 Cc	1,431 Ba
PAST	1,393 Ab	1,190 Bb	1,079 Bc

ILPF: Integração Lavoura Pecuária Floresta; PD: Plantio Direto; PAST: Pastagem.

Médias seguidas por letras distintas, maiúscula na coluna e minúscula na linha para cada parâmetro, diferem entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

Assim, pode-se avaliar que houve diferença estatística significativa entre os manejos, avaliando a condição de um solo que não houve aplicação de carga dinâmica, a maior média de deformação está no plantio direto, com 0 passadas. Isso se deve a condição reológica do solo

(devido a rotação de culturas e a reestruturação desse solo para plantio), assim entende-se que sua estrutura possui maior índice de vazios, logo quando aplicada uma carga dinâmica a deformação é maior do que a de um solo que apresenta menores alterações estruturais devido ao histórico de carregamento, como é o caso do ILPF, sendo um solo onde existe o plantio de um elemento arbóreo, como o eucalipto, a monocultura e a presença do gado, que permite ao solo ter uma condição estrutural mais rígida (deformação e índice de vazios menores). De forma intermediária, tem-se a pastagem - PAST, que é um solo degradado com condição e que apresenta um comportamento proporcional ao carregamento.

Observe que para 1 passada do rodado, o quadro de análise comparativa muda significativamente, pois a maior média de deformação é do ILPF. Nesta situação estrutural, entende-se que a aplicação da carga dinâmica de 1 passada de rodado (108 kPa) acaba alterando significativamente a estrutura do ILPF aumentando os vazios e conseqüentemente a porosidade de forma mais intensa. Nesta nova situação reológica o solo apresenta maior possibilidade de obter maiores deformações, as pastagens mantem-se com uma deformação intermediária, e o plantio direto - PD possui a menor deformação para 1 passada.

Com a aplicação de 2 passadas de um rodado, equivalentes a 216 Kpa, a maior média de deformação, é referente ao Plantio Direto - PD, que altera significativamente o comportamento estrutural, quando comparado a 1 passada apenas. Santos et al (2018) entende que no sistema plantio direto, após um período de três a quatro anos, os solos apresentam na camada superficial um acréscimo nos valores de densidade e decréscimo na porosidade total, decorrente, sobretudo, do arrançamento natural do solo, quando não é mobilizado, e da pressão provocada pelo trânsito de máquinas e implementos agrícolas, em particular quando realizado em solos argilosos e com teores elevados de umidade.

Em casos de sistemas de integração, ILPF, Souza et al. (2020) explica que esses solos podem estar melhores estruturados pois sofrem influência de intensidade e frequência de pastejo, tráfego e peso de animais, teor de matéria orgânica, cobertura vegetal, variação de espécies *in loco*, tais como árvores, monocultura entre outros, além de um fator determinante que é a umidade, tendendo a quanto maior a umidade, maior a compactação devido ao estado plástico do solo.

Define-se como estrutura do solo, = a forma, o tamanho a disposição espacial de partículas individuais ou em grupos (agregados), de maneira a obter a combinação de poros e agregados, que podem variar conforme as condições externas, influenciando a resistência e as características físicas, químicas e biológicas do material (BERTOLDO E LEVIEN, 2019).

Baseando-se nas médias obtidas pelo teste de tukey, pode-se considerar os solos como sendo estruturados- quando submetido a ação de pre adensamento, e apresentam variação considerável de recalque, devido a maior porosidade, como no caso do Plantio Direto; Pouco Estruturado ou Desestruturado- apresentam pouca variação do recalque, solo mais compacto com estrutura menos porosa, como é o caso do ILPF; Solo Degradado- A variação do valor do recalque é linear, como observa-se o caso dos solos de pastagem, assim representa-se a Figura 19 de forma gráfica a estruturação de solos por manejo e recalque.

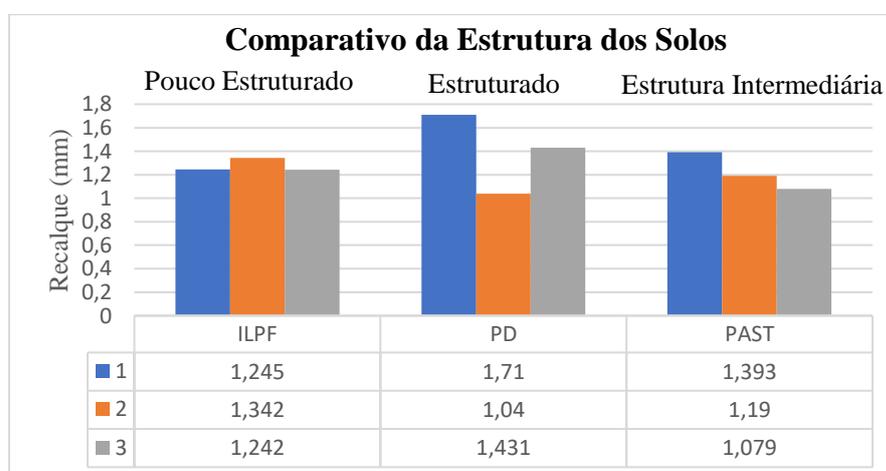
0 Passada = Mais estruturados deformam mais (Na sequência PD → PAST → ILPF)

1 Passada = Rompe a estrutura do ILPF e estrutura a PD e PAST (Na sequência de maior para menor deformação ILPF → PAST → PD)

2 Passadas = Rompe a estrutura do PD devido a maior porosidade (Na sequência de maior para menor deformação PD → ILPF → PAST)

Para questões agronômicas, solos como o plantio direto, são excelentes para plantio, pois quanto maior a porosidade, melhor o desenvolvimento radicular e absorção de nutrientes. Solos que são muito estruturados para obter melhor desenvolvimento das culturas, em contrapartida solos mais compactos tendem a reduzir a produção e podem ser chamados de desestruturados ou pouco estruturados para plantio. Um solos estruturados, como o plantio direto, não suportam carga dinâmica muito intensa. E em casos como a pastagem, são solos classificados com uma estrutura intermediária, mostrando que são solos com um estado de degradação.

Figura 19 –Representação Gráfica comparativa em relação aos sistemas ILPF, PD e PAST quanto a estruturação do solo.



Fonte: Próprio Autor.

4.4 Índices Físicos.

A avaliação estatística para cada variável, mostra que para 0, 1 e 2 passadas não houve uma alteração significativa da estrutura do solo, a aplicação da carga dinâmica nesse caso não teve um impacto significativo considerando a umidade do solo estabilizada entre 2 a 5 %, assim um solo com essa umidade, sofrendo aplicação dessa carga, não possui alteração significativa da sua estrutura física. Solos com esse teor de umidade, são considerados como solos secos, e tendem a romper (existe pouco umidade entre as partículas o que diminui sua resistência devido a fragilidade) quando submetidos a tensão acima do que o mesmo suporta. Nesta situação a capacidade de mobilizar resistência cisalhante é baixa o que torna o efeito da baixa umidade associado a estrutura porosa um deflagrador da ruptura (Lambe, 1991). A tabela 6 apresenta a análise de variância dos dados submetidos ao teste de normalidade de liliefors e homogeneidade de bartlet e ambos foram satisfeitos.

TABELA 6– Resumo da análise de variância (valor de p) dos valores médios de índices físicos, Peso Específico Natural, Peso Específico Aparente, índice de Vazios, Porosidade.

FV	Índices Físicos			
	PE Natural	PE Aparente	Índice de Vazios	Porosidade
Manejo	0,3882 ^{ns}	0,2525 ^{ns}	0,2838 ^{ns}	0,2907 ^{ns}
CC	0,4379 ^{ns}	0,6194 ^{ns}	0,3688 ^{ns}	0,3516 ^{ns}
Manejo *CC	0,2720 ^{ns}	0,5526 ^{ns}	0,4962 ^{ns}	0,5631 ^{ns}
CV1	6,80	7,62	14,21	6,49
CV2	6,12	6,05	11,19	5,16

*A 5% de significância. ns: não significativo.

Em relação ao Peso Específico Natural do Solo (ρ_n), Peso Específico Aparente Seco (ρ_d), índice de vazios (e) e porosidade (η) para todos os tratamentos, não houve significância no teste F, inferindo que não houve diferença estatística entre os tratamentos, assim em relação a passagem do rodado, e a interação entre o tratamento também não foi significativa.

A Carga Dinâmica, e Carga de Compressão Uniaxial, suficientes para causar alteração desses índices físicos, quando analisados baseado nas médias estatísticas, devido principalmente ao baixo teor de umidade do solo, considerando-o como seco (entende-se seco como sem a sensação da umidade). Finalmente, detectou-se uma alteração nos índices físicos

somente quando avaliados com base no valor numérico e na análise reológica do comportamento do solo de modo qualitativo.

4.5 Estudo do Comportamento Reológico do Solo.

Para cada manejo foi realizada a passada do rodado: 0, 1 e 2 e em seguida aplicada a carga de consolidação, a análise do comportamento real do solo é dado considerando a variação dos recalques ($\Delta L = \text{máximo} - \text{mínimo}$) em relação a variação da carga aplicada de consolidação ($\Delta\sigma = \text{máximo} - \text{mínimo}$) por passada para cada manejo, em escala logarítmica; assim pode-se obter o Módulo de Rigidez Inicial do solo, cujos resultados apresentam-se na tabela 7.

TABELA 7- Valores em escala logarítmica para a variação da tensão de consolidação ($\Delta\sigma$), a variação de recalque (ΔL), e o valor do Módulo de Rigidez (E), para cada Manejo e Passada. Dados não transformados.

Manejo-Passada	Módulo de Rigidez		
	$\Delta\sigma$	ΔL	E
ILPF-0	3,144	0,626	0,199
ILPF -1	3,144	0,540	0,172
ILPF-2	3,144	0,609	0,194
PD-0	3,144	0,724	0,230
PD -1	3,144	0,745	0,237
PD-2	3,144	0,662	0,211
PAST-0	3,144	0,704	0,224
PAST -1	3,144	0,635	0,202
PAST-2	3,144	0,676	0,215

Fonte: Próprio Autor

A análise da rigidez do solo é importante para determinar o histórico de tensões que esse material já sofreu, é necessário também avaliar a condição dos índices físicos e as modificações sofridas conforme a aplicação da carga dinâmica, como pode ser observado na tabela 8.

TABELA 8– Resumo das Médias dos valores de Peso Específico Natural (ρ_n), Peso Específico Aparente Seco (ρ_d), Índice de Vazios (e), Porosidade (η) nos diferentes manejos e cargas dinâmica aplicadas.

Manejo	Índices Físicos			
	ρ_n	ρ_d	e	η
	(g/cm ³)	(g/cm ³)		(%)
ILPF -0	1,434	1,367	1,100	52,310
ILPF-1	1,327	1,290	1,231	55,011
ILPF-2	1,339	1,302	1,203	54,586
PD -0	1,430	1,401	1,043	51,006
PD-1	1,343	1,314	1,179	54,024

PD-2	1,392	1,340	1,147	53,137
PAST-0	1,265	1,235	1,321	56,652
PAST-1	1,316	1,233	1,318	56,716
PAST-2	1,383	1,312	1,173	53,949

Fonte: Próprio Autor

Observando os valores acima, considerando o módulo de rigidez do ILPF, é notável que quando não há carga dinâmica, o solo encontra-se com estrutura natural (neste caso um solo menos estruturado); na primeira passagem do rodado, pode-se observar que o índice de vazios aumenta e a densidade diminui tornando o solo menos rígido (consequentemente uma redução no valor do E), I Como pode observar, não há uma diferença significativa na segunda passada do rodado, pois o solo se encontra já em condição residual de deformação. Neste cenário, o valor E aumenta, em relação a primeira, inferindo que houve uma redução do índice de vazios e aumento da rigidez do solo e consequentemente da sua densidade. Este comportamento se deve devido ao fato do solo do ILPF na condição do manejo, envolvendo a plantio arbóreo, monocultura e presença de gado, uma condição física do solo previamente mais compacta, menor porosidade e maior resistência superficial. Os dados da Tabela 8 e os valores dos índices físicos, e de forma gráfica, como é possível observar pelas Figuras 17 e 18 a alteração no p_n e p_d , para cada passada do rodado e para cada manejo.

No ILPF, o p_n diminui consideravelmente após a primeira passada quando comparado à solo testemunha (0 passada) (Isso representa uma variação de volume positiva de 8%); Em relação a segunda passada o comportamento do solo é similar ao de 1 passada, não sofrendo uma alteração significativa. A diferença entre a primeira e segunda passada foi de apenas 0,9% em relação a variação de volume, este comportamento evidencia a melhor estruturação inicial do solo.

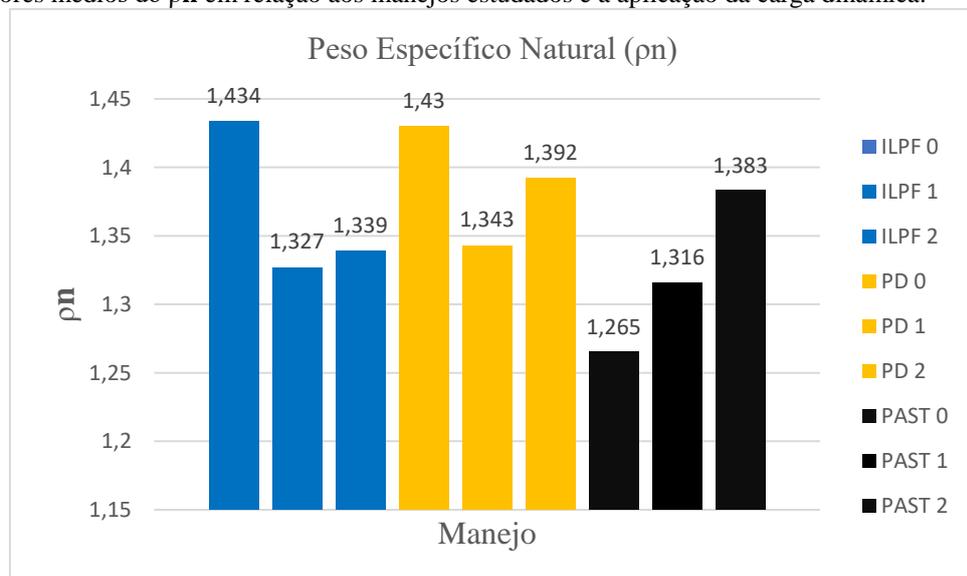
No Plantio Direto, o solo apresentou uma situação semelhante ao ILPF (considerando a análise dos pesos específico), porém a diferença para o solo que não houve tráfego é em torno de 6% para 1 passada do rodado, e quando comparado o recalque de uma (1) para duas (2) passada equivale a aproximadamente 4%. As evidências de alterações estruturais serão apresentadas a seguir com a avaliação da porosidade e do módulo de rigidez, pois o solo possui a melhor condição para o plantio sendo bem estruturado.

O solo de pastagem, possui um comportamento diferente dos demais, pois é um solo que não sofreu nenhuma intervenção agrícola, seja cobertura vegetal, manejo, adubação ou outras, logo submetido a um carregamento dinâmico ele aumenta o p_n , proximamente de 4% para 1 passada como pode ser observado na Figura 20, e para 2 passadas do rodado o valor

continua aumentando, proximamente 9% comparado ao solo sem passada, o que era de se esperar para estruturas virgens.

Lanzanova *et al.* (2007) observaram que, após aplicação de carga de compressão em curto período de tempo, houve aumento da resistência do solo, diretamente relacionada ao aumento da resistência à penetração mecânica, reduzindo macroporosidade e infiltração de água no solo na camada de 0–0,075 m de um Argissolo Vermelho cultivado com pastagens de inverno. Assim observa-se o processo de adensamento da pastagem pelo aumento do ρ_n e ρ_d .

Figura 20 –Valores médios do ρ_n em relação aos manejos estudados e a aplicação da carga dinâmica.

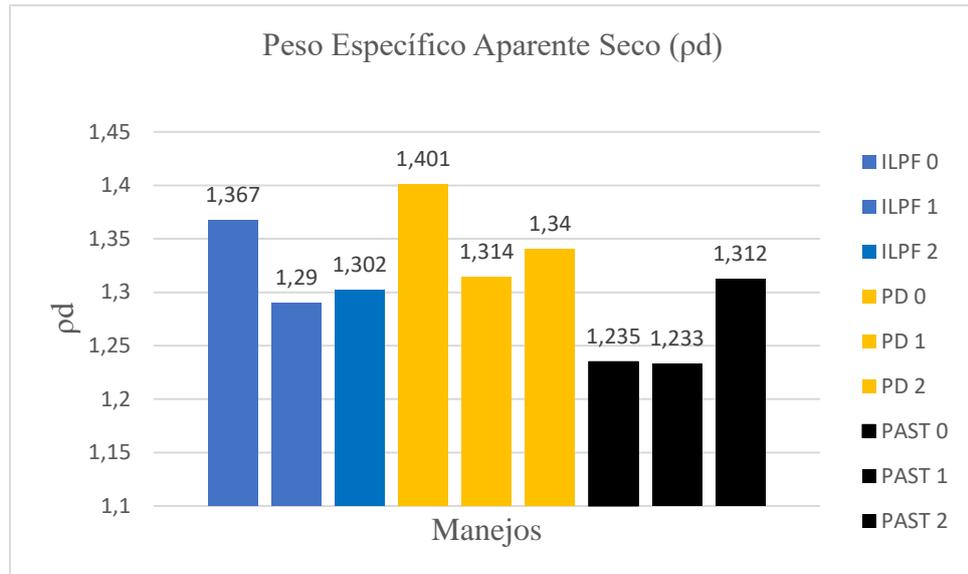


Fonte: Próprio Autor

O peso específico aparente seco (ρ_d), apresentado de forma gráfica na Figura 21, para o ILPF o solo que não sofreu carga dinâmica sofre uma redução de 5,63% no valor do ρ_d em relação a aplicação de 1 passada. Não sofre uma diferença de valores significativa entre 1 e 2 passadas. Souza *et al.* (2020) afirma que existe alteração de atributos físicos e hídricos do solo, em caso de sistemas integrados, de forma a aumentar a resistência do solo e sua densidade, acima dos 5 anos de uso devido ao pisoteio de animais e rotação de culturas.

Para o PD também sendo esse comportamento similar para o PD. Na pastagem em relação a testemunha a primeira passada não teve uma alteração significativa, a segunda fica evidenciada com acréscimo no valor de aproximadamente 6%.

Figura 21 – Valores médios do ρ_d em relação aos sistemas de manejos e a aplicação da carga dinâmica.



Fonte: Próprio Autor

Os solos de ILPF, já sofrem uma compactação natural devido a presença de gado, a rotação de culturas e presença de elementos arbóreos, permitem que o solo possua uma estrutura física inicial mais rígida. Nestas situações espera-se, quando submetidos a carregamentos recalques menores, quando comparado nesse caso, ao plantio direto e a pastagem. Segundo avaliam Assis *et al* (2015) em sistema de Integração Lavoura Pecuária Floresta a porosidade total geralmente apresenta valores maiores e a densidade seca do solo valores menores, de forma a permitir analisar que o solo, nesta situação, apresenta uma estrutura do solo que difícil o desenvolvimento radicular devido ao aumento da porosidade.

Quando há uma baixa umidade no solo, há um aumento na resistência do mesmo, porém há uma tendência de maior ruptura interna, e a presença de eucalipto em manejos agroflorestais ocasiona na perda de umidade do solo. (SOUZA, *et.al.*,2020)

A maioria dos trabalhos publicados, e relacionados à influência de sistemas de preparo sobre características físicas do solo, tem apontado para uma compactação na camada superficial em áreas manejadas com o sistema de Plantio Direto – PD. Esse aumento da densidade na camada superficial tem sido associado a trânsito de máquinas agrícolas e ao não revolvimento do solo no sistema plantio direto. (SANTOS. *et.al.*,2018). Os dados deste trabalho corroboram com esta tese.

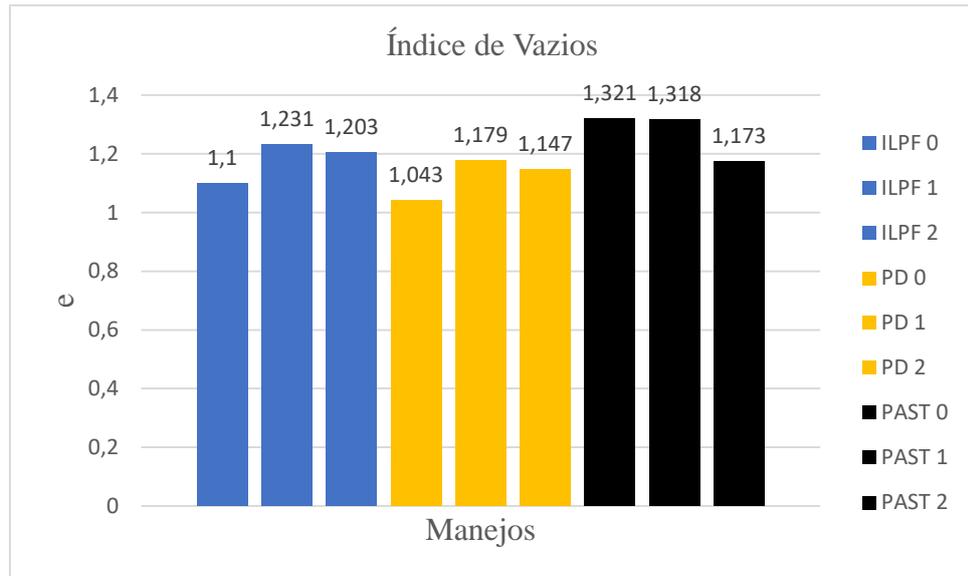
Como pode-se observar, as amostras de Plantio direto, sofreu deformações maiores na condição natural, quando comparado ao ILPF e a pastagem. No caso estudado, é o manejo que mais foi impactado com a aplicação das tensões de consolidação e dinâmicas. Avalia-se que a condição estrutural de solos de manejo por Plantio Direto, devido as adubações, cobertura

vegetal e rotação de culturas, apresenta um o solo com estrutura física com maior possibilidade de deformação (mesmo em condições de baixa umidade) quando aplicado carga dinâmicas. Isto fica evidenciado quando se verifica o que recalque do solo considerando PD na condição natural (0 Passada) para a primeira passada. Observe os valores do índice de vazios (Figura 22) e porosidade (Figura 23). No caso da segunda passada, observa-se que a deformação foi menor, sugerindo um possível colapso da estrutura do solo (possível quebra da parte interna e reorganização das partículas sólidas). Nesta situação o índice de vazios diminui. Conforme explica Candine et al. (2021) o rearranjo estrutural de partículas do solo ocorre devido o tráfego de máquinas, em relação a carga aplica sobre o solo.

Em relação ao comportamento do solo devido ao rearranjo estrutural, Couto *et al.* (2013) demonstra que o grau de compactação até 4 passadas aumenta, de forma significativa, mesmo comparado a 8 passadas que possui tendência de reduzir o grau de compactação, assim a carga aplicada demonstrou aumento no grau de compactação, podendo ser justificado seu menor valor para cargas maiores pela mudança na estrutura do solo, ocasionando o rearranjo dos vazios do solo.

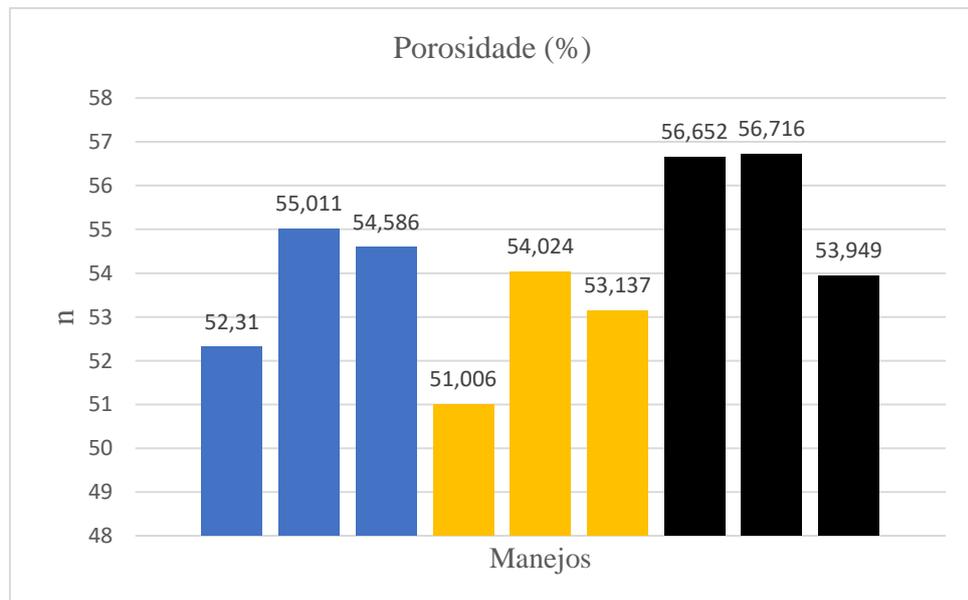
A redução do valor na compactação de 4 passadas para 8 passadas, ocorre aos níveis de pressões aplicadas serem maiores que a capacidade de suporte de carga do solo, ocasionando a destruição de sua estrutura (COUTO *et.al.*,2013). Assim a carga para 2 passadas que ocasionou a ruptura do solo do plantio direto é de 216 Kpa, sendo que esse solo resistiu a primeira passada sem ser destruído suportando uma carga de 108 Kpa. Para Antunes Junior *et al.* (2016), deve ser observada a umidade crítica, responsável por ocorrer as máximas deformações, geralmente próxima ao limite de plasticidade do solo, deve-se prevenir o tráfego de máquinas quando a umidade estiver próxima ao limite de plasticidade, o que ocorre no centro oeste em épocas chuvosas no período de outubro a março.

Figura 22 – Valores médios do índice de vazios (e) em relação aos sistemas manejos e a aplicação carga dinâmica.



Fonte: Próprio Autor

Figura 23 – Valores médios do índice de vazios (e) em relação aos diferentes manejos e a aplicação da carga dinâmica.



Fonte: Próprio Autor

Para Antunes Júnior *et al.* (2016) em sistema de integração a maior porosidade é reflexo da maior atividade biológica e seus efeitos na agregação do solo. Valores semelhantes podem ser avaliados ao comparar o sistema agroflorestal (64,71%) com o plantio convencional (54,38%) no Latossolo Cerrado.

Em sistemas de plantio direto, Bertollo e Levien (2019) avaliaram num argissolo vermelho que sob tráfego controlado de máquinas houve influência na densidade do solo e em solos não cultivados ocorreu alteração significativa na macroporosidade até profundidade média de 10 cm. Assim há alteração no desenvolvimento radicular, podendo ser prejudicial para as plantas.

O comportamento dos solos de pastagem, em comparação com os demais manejos analisados, acontece de forma intermediária, os recalques ocorridos estão entre os valores do ILPF e do PD. Não houve uma redução de volume de vazios tão significativa, na primeira passada, porém na segunda, há um decréscimo de proximamente 5%.

Em relação a pastagem, por ser um solo sem histórico de manejo, a condição é a de um material com aspectos físicos, químicos e biológicos sem atuação de manejos, cobertura vegetal, adubagens e demais condições de melhoramento, logo infere-se que o solo possui uma deformação vertical baseada num histórico de tensões natural. Para Lanzasova *et al.* (2007) a microporosidade em solos de pastagens sob efeito de compactação não há uma alteração significativa, ao contrário da macroporosidade e a porosidade total sofreram influência maior, corroborando assim com os dados dessa pesquisa principalmente analisada com 2 passadas.

O módulo de rigidez do solo, é apresentando quando se relaciona o recalque do solo em relação a tensão aplicada, a Figura 21, ilustra essa situação, podendo inferir que para todos os manejos, a tensão aplicada 108 KPa já é maior que a tensão de pré adensamento desse solo, pois nota-se um ponto de inflexão na curva em todos os manejos na aplicação de 108 Kpa. Analisa-se que um solo seco, como no caso desse estudo, não suporta tensões acima de 100 Kpa, já estando no limite máximo de suporte de cargas.

Os valores de deslocamento vertical em relação aos tipos de manejos, cargas dinâmicas e cargas de consolidação estão apresentados na tabela 8 e de forma gráfica na Figura 21, assim observa-se que para a avaliação do módulo de rigidez, o manejo que possui um comportamento com maiores valores é o PD, pois o solo está melhor estruturado, nesse caso quando aplicam-se carregamentos existe um aumento maior da rigidez devido a reorganização da estrutura desse solo, e no caso desse manejo houve a ruptura do mesmo e nova estruturação impondo um maior valor de rigidez.

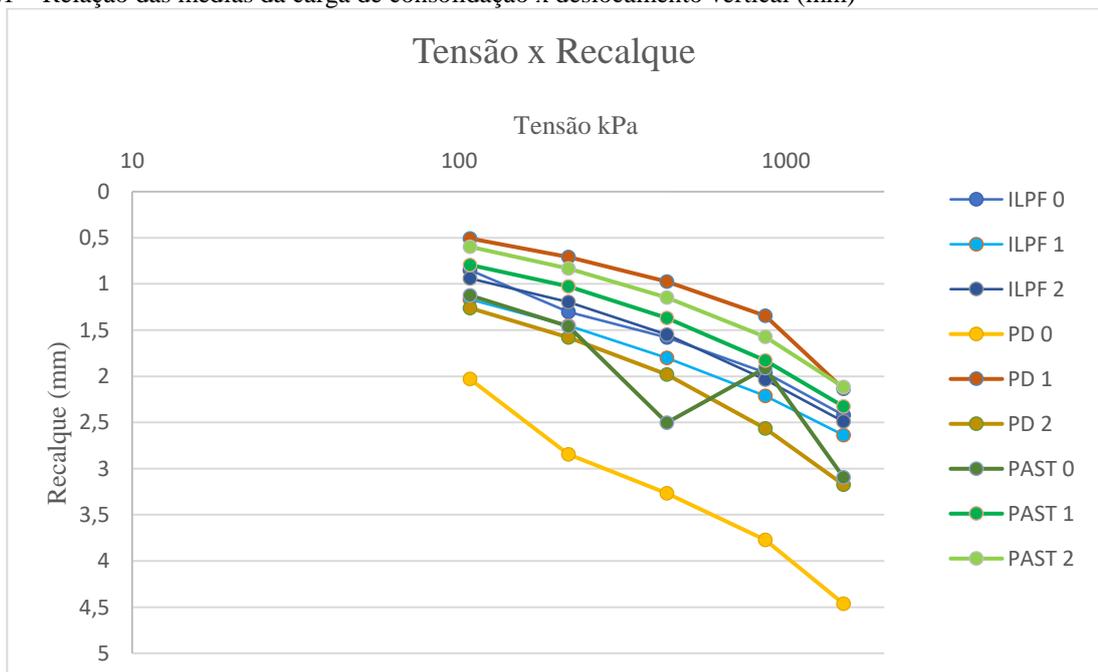
TABELA 9- Valores médios dos recalques em mm, para cada manejo, em relação as cargas dinâmicas e de consolidação. Valores não transformados.

Carga de Consolidação (CD)	ILPF- Recalque-Passadas		
	0	1	2
108	0,850	1,167	0,940
216	1,303	1,450	1,197
432	1,580	1,800	1,547
864	1,960	2,213	2,037
1500	2,420	2,637	2,490

Carga de Consolidação (CD)	PD- Recalque-Passadas		
	0	1	2
108	2,030	0,507	1,260
216	2,847	0,707	1,580
432	3,267	0,973	1,980
864	3,773	1,343	2,567
1500	4,463	2,137	3,173

Carga de Consolidação (CD)	PAST -Recalque-Passadas		
	0	1	2
108	1,123	0,793	0,597
216	1,457	1,027	0,833
432	2,503	1,370	1,147
864	1,910	1,827	1,573
1500	3,093	2,327	2,117

Figura 21 – Relação das médias da carga de consolidação x deslocamento vertical (mm)



O ILPF apresenta uma situação intermediária, por ser um solo menos estruturado, o valor do recalque é menor que do PD, pela observação da Figura 8, as curvas do ILPF para 0, 1 e 2 passadas apresentam a inclinação da curva muito próximas, diferente do comportamento na PD que apresentam curvas mais distantes com maiores variações.

Em solos sem históricos de tensões, como o caso da Pastagem, que é considerado como solos virgens, em 0 passada quando há aplicação de carga de adensamento, a variação da deformação é muito significativa, e existem muitos pontos de inflexão mostrando que a rigidez do solo é variável devido ao solo não ter sofrido tensões anteriormente significantes, pela tabela 8 percebe-se que a pastagem possui comportamento intermediário em relação a solos que sofreram manejos agrícolas, e alterações de suas características físicas. Para 1 e 2 passadas a pastagem, há a reestruturação dos solos com o recalque e conseqüentemente ele sofre menos com aplicação de cargas de adensamento.

6. CONCLUSÕES

O estudo da capacidade de carga de solos agrícolas é de extrema importância para avaliação da qualidade do solo, e conseqüente a análise dos aspectos físicos, químicos e biológico dos solos para aumento da produtividade agrícola, desenvolvimento das culturas e sustentabilidade agrícola. Pelas condições de

Para condições de solo secos, tem que solos com integração lavoura pecuária floresta, possuem melhor condição nos atributos físicos do solo, sofrendo menos com aplicação de cargas dinâmicas e de consolidação, assim considera-se como solo menos estruturado para o plantio. O ILPF é aplicado para casos de solos degradados para recuperação de suas características.

O solo com manejo de plantio direto, é mais poroso, possui estrutura física com maior porosidade, logo as condições de adensamento e de efeitos dinâmicos são mais intensas. Notou-se que em condição seca, o solo rompe a partir da primeira passada com carga de 108 KPa, sendo considerado como estruturado, necessitando de melhores estudos para evitar o rompimento do mesmo nas épocas mais secas do ano, devido a passagem de máquinas e equipamentos agrícola.

A pastagem, um solo degradado, possui recalque linear, conforme a aplicação de carga aumenta, assim sofre deformações máximas e reestruturação do arranjo físico do solo, por não ter sofrido manejos agrícolas.

Observa-se ainda a importância de traçar estratégias e rotas logísticas bem definidas, para evitar que máquinas pesadas trafeguem em solo de cultivo e assim prejudique seu desempenho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9604**: Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo com retirada de amostras deformadas e indeformadas. Rio de Janeiro: ABNT, 1996b. 9p.

ALVARES, C.A; STAPE, J.L; SENTELHAS, P.C; GONÇALVES, J.L.M; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v.22, n.6, p.711-728, 2013.

ANTUNES JUNIOR E.J; REIS, E.F. Physical properties of an Oxisol under different planting and management systems. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, p. 4749-4753, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9604**: Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo com retirada de amostras deformadas e indeformadas. Rio de Janeiro: ABNT, 1996b. 9p.

BOCALETI, L.H.R; GASPAROTTO, F; PARIZ, S; FILHO, E.S; PACCOLA, E.A.S. Sustentabilidade Agrícola e Saúde do Solo. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**. Bahia, v.12, n.5, p.1-13, 2021.

BARBIN, D; Planejamento e Análise Estatística de Experimentos Agronômicos.2.ed. Londrina, 2013. 212p.

BRAJA, M; SOBHAN, K. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. 8.ed. São Paulo: CENGAGE, 2015.

BERTOLLO A.M; LEVIEN R. Compactação do solo em sistemas de plantio direto na palha. **Revista Pesquisa Agropecuária Gaúcha**.Rio Grande do Sul, v.25, n.3, p.208-218, 2019.

CANDINE, P.F; VIANA, P.M.F; REIS, E.F. Mudança estrutural em um latossolo sob cargas dinâmicas e diferentes sistemas de preparo do solo. **Australian journal of Crop Science**. Austrália, v.15, n.8, p.1151-1156, 2021.

CORDEIRO, L.A.M; BALBINO, L.C. **Políticas de fomento à adoção de Sistemas de Integração Lavoura, Pecuária, Floresta no Brasil**. Repositório de Informação Tecnológico da Embrapa INFOTEC-E EMBRAPA, Brasília: Embrapa, 2019. Cap.07, p.99-115.

COUTO, R.F; REIS, E.F; VIANA, P.M.F; HOLTZ, V; OLIVEIRA, L. A; ALVES, S.M.F. Compactação e recalque superficial de um latossolo vermelho em condição de campo e laboratório. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v.17, n.11, p.1239–1245, 2013.

DE MARINS, A, C; REICHERT, J, M; SECCO, D; ROSA, H, A; VELOSO, G. Avaliação da pegada para três tipos de pneus agrícolas. **Elservier: Avaliações de energia sustentável renovável**. v.81, p.464-472, 2018.

DIAS, C.M.O; OLIVEIRA, W.S; SILVEIRA C.J.S; ROCHA, H.C.R. Avaliação da produção de matéria seca de diferentes plantas forrageiras no sistema ILPF (Integração Lavoura Pecuária Floresta) na região do médio sudoeste baiano. **Brazilian jornal Development**. Curitiba, v.7, n.12, p.119978-119984, 2021.

EMBRAPA. Manual de Métodos de Análise de Solo. 3ed. Brasília: Embrapa Solos, 2017.

FAGUNDES, M.O.; REIS, D.A.; PORTELLA, R.B.; PERINA, F.J.; BOGIANI, J.C. Qualidade de um latossolo sob plantio convencional e sistema plantio direto no cerrado baiano. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, Bahia, v.10, n.3, p.281-297, 2019.

KLERKX, L.; JAKKU, E.; LABARTHE, P. A review of social science on digital agriculture, smart farming and agriculture 4.0: New contributions and a future research agenda. **NJAS – Wageningen Journal of Life Sciences**, Reino Unido, Royal Northland, v.100315, p.90-91, 2019.

LANZANOVA, M.E; NICOLOSO, R.S; LOVATO, T; ELTZ, F.L.F; AMADO, T.J.C; REINERT, D.J. Atributos Físicos do solo em sistema de integração lavoura pecuária sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v.31, n.1, p.1131-1140, 2007.

MACEDO V.R.M; SILVA A.J.N; CABEDA M.S.V. Influência de tensões compressivas na pressão de pre compactação e no índice de compressão do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v.14, n.8, p.856-862, 2010.

MION, R.L.; HOLANDA, A.S.; BARROSO, S.H.A.; SILVA, S.A.T. Tensões aplicadas no solo pelas diferentes pressões do pneu de um trator agrícola. **Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering**, v.36, n.1, p.63-77, 2016.

MOLINA JÚNIOR, W.F; Comportamento mecânico do solo em operações agrícolas.1.ed. Piracicaba: ESALQ/USP, 2017. 223p.

NETO F.V.C; PEREIRA M.G; LELES P.S.S; ABEL E.L.S. Atributos químicos e físicos do solo em áreas sob diferentes coberturas florestais e pastagem em Além Paraíba- MG. **SciELO-Scientific Eletronic Library On line**. São Paulo. 2018.

NUNES, J.A.S.; SILVA, E.M.B.; SILVA T.J.A. Bulk density and water tensions in the soil on corn root production. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.4, n.20, p.357-363, mar. 2016. Disponível em: <<http://www.agriambi.com.br>>. Acesso em: 12 nov. 2020.

PACHECO, A.R; NICOLI, C.M.L; CALIL, F.N; REIS, C.F; MORAES, C.C. Uma década de inovação tecnológica em integração lavoura-pecuária-floresta na fazenda Boa Vereda. **Comunicado Técnico EMBRAPA**, Colombo, n.392, 1ªed. 2016.

PINTO C.S; Curso Básico de Mecânica dos Solos.3.ed. São Paulo: OFICINA DE TEXTOS, 2006. 363p.

REICHERT, J.M.; ROSA, V.T.; VOGELMANN, E.S.; ROSA, D.P.; HORN, R; REINERT, D.J.; SATTTLER, A.; DENARDIN, J.E. Conceptual framework for capacity and intensity physical soil properties affected by short and long-term (14 years) continuous no-tillage and controlled traffic. **Soil & Tillage Research**, Amesterdã, v.158, p.123-136, 2016.

ROCHA, B.P; GIACHETI, H.L.A determinação do módulo de cisalhamento (G_0) dos solos em furos de sondagem. **Science and Technology**. São Paulo, p.46-52, 2017.

SANCHES, A.; ALVES, L.R.A.; BARROS, G.S.C. Oferta e demanda mensal de milho no Brasil: Impactos da segunda safra. **Revista de Política Agrícola**, Brasília, v.4, n.17, p.73-97, 2018.

SANTOS; R.A.; SILVA S.M.C; CARNEIRO V.A; OLIVEIRA A.L.R; MILHOMEM A.V. Sistema de Plantio Direto: Conservação e manutenção da capacidade produtiva dos solos do Cerrado Goiano. **Revista Sapiência Sociedade Saberes e Práticas Educacionais**, Iporá, v.7, n.2, p.230-255, 2018.

SAVIOLI J.S; SANTOS F.F; LEITE F; LOPES R.A.P. Desempenho operacional e atributos físicos do solo sob tráfego de trator agrícola. **Research Society and Development**. São Paulo, v.9, n.11, p.1-21, 2020.

SILVA, J.W.T; SOUZA, B.M.L; SILVA, C.M.Sistema de Integração Lavoura, Pecuária Floresta (ILPF). **Revista Ciência Animal**, Ceará, v.30, n.3, p.71-84, 2020.

SILVA, R.C. **Mecanização e manejo do solo**. 1.ed. São Paulo: Érica, 2014. 121p.

SILVA R.B; LANÇAS, K.P; MASQUETTO R.J. Consolidômetro: Equipamento pneumático-eletrônico para avaliação do estado de consolidação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v.31, p.617-615, 2015

SILVEIRA, A.R; ROCHA, W.W; LEITE, A.M.P; SANTOS, J.J; JUNIOR M.S.D. Capacidade de suporte de cargas de um latossolo submetido a duas alternativas de uso do solo e sob floresta nativa. **Scientia Florestalis**. Piracicaba, v.50, n.1, p.01-09, 2022.

SOUZA, J.F.D; BONINI C. S B; MATEUS G.P; SOUZA, C.T; PERUSSO R.L.S; PEDRO F.G; OLIVERIO G.L. Compactação do solo em sistemas de integração lavoura pecuária floresta após cinco anos de implantação e uso. **Revista de Ciências Agroveterinárias**. Lages, v.19, n.3 p.348-353, 2020.

SZNITOWSKI, A.M; GASPARINI L. V; LEITNER, C. P. S; BAGGENSTOSS, S; LIMA, A.M. Sistemas Integrados de produção agrícola: uma alternativa sustentável aos sistemas de produção especializados. **Brazilian Journal of Development**. Curitiba, v.5, n.7, p.9047-9051, 2019.

TOMAZ, G.A; WANDER, A.E. Barreiras a adoção do sistema ILFP em Goiás. **Revista de Política Agrícola**, Brasília, v.26, n.1. p.93-100, 2017.