

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS – CAV
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO – PPGCS

ELIAS DA SILVA SCOPEL

**CRESCIMENTO INICIAL DE MILHO, SOJA E FEIJÃO E ATRIBUTOS FÍSICOS DE
UM NITOSSOLO BRUNO EM RESPOSTA A DIFERENTES GRAUS DE
COMPACTAÇÃO**

LAGES
2023

ELIAS DA SILVA SCOPEL

**CRESCIMENTO INICIAL DE MILHO, SOJA E FEIJÃO E ATRIBUTOS FÍSICOS DE
UM NITOSSOLO BRUNO EM RESPOSTA A DIFERENTES GRAUS DE
COMPACTAÇÃO**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de mestre em ciência do solo pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo do Centro de Ciências Agroveterinárias - CAV, da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC.

Orientador: Prof. Dr. Jackson Adriano Albuquerque

Co-orientador: Prof. Dr. Álvaro Luiz Mafra

LAGES

2023

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da
Biblioteca Setorial do CAV/UDESC,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Scopel, Elias da Silva

Crescimento inicial de milho, soja e feijão e atributos físicos de um Nitossolo bruno em resposta a diferentes graus de compactação / Elias da Silva Scopel. -- 2023.

71 p.

Orientador: Jackson Adriano Albuquerque

Coorientador: Álvaro Luís Mafra

Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Lages, 2023.

1. Plantio direto. 2. Densidade relativa. 3. Proctor. 4. Cultura de grãos. I. Albuquerque, Jackson Adriano. II. Mafra, Álvaro Luís. III. Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. IV. Título.

ELIAS DA SILVA SCOPEL

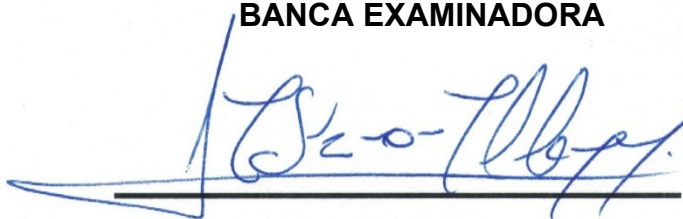
**CRESCIMENTO INICIAL DE MILHO, SOJA E FEIJÃO E ATRIBUTOS FÍSICOS DE
UM NITOSSOLO BRUNO EM RESPOSTA A DIFERENTES GRAUS DE
COMPACTAÇÃO**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de mestre em ciência do solo pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo do Centro de Ciências Agroveterinárias - CAV, da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC.

Orientador: Prof. Dr. Jackson Adriano Albuquerque

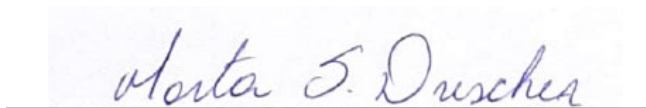
Co-orientador: Prof. Dr. Álvaro Luiz Mafra

BANCA EXAMINADORA



Jackson Adriano Albuquerque, Doutorado
Universidade do Estado de Santa Catarina

Membros:



Marta Sandra Drescher, Doutorado
Universidade Estadual do Rio Grande do Sul



Jean Alberto Sampietro, Doutorado
Universidade do Estado de Santa Catarina

Lages, SC, 16 de fevereiro de 2023.

Aos colegas e professores da
Universidade do Estado de Santa Catarina,
pela inspiração de sempre!

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador por aceitar conduzir o meu trabalho de pesquisa.

Aos professores da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC pelos ensinamentos e profissionalismo.

Aos meus pais, Sueli e Alfeu, que sempre estiveram ao meu lado me apoiando ao longo de minha trajetória. Sou grato à minha família pelo apoio durante a minha vida.

Aos meus colegas do grupo de pesquisa que foram extremamente receptivos e dispostos a ajudar e ensinar.

Deixo um agradecimento especial ao meu orientador pelo incentivo e pela dedicação ao meu projeto de pesquisa.

RESUMO

O plantio direto é um sistema de manejo conservacionista, capaz de reduzir a erosão do solo e as emissões de gases e poluentes na atmosfera. Entretanto, esse sistema tem algumas restrições devido ao processo de compactação, com prejuízos às culturas. O objetivo foi avaliar o efeito de diferentes graus de compactação nos atributos físicos de um Nitossolo e relacionar com o crescimento da parte aérea e das raízes das culturas de feijão, milho e soja, além de indicar em qual grau de compactação o crescimento da parte aérea e das raízes é favorecido (grau de compactação ótimo) e em qual grau de compactação ocorrem prejuízos ao crescimento das culturas (grau de compactação crítico). O experimento foi realizado no laboratório e em casa de vegetação, onde realizou-se o ensaio de Proctor Normal para definir a densidade máxima, a umidade ótima para compactar o Nitossolo e estabelecer as densidades que corresponderam aos graus de compactação (GC) de 85, 90, 95, 100 e 105%. Foi adicionado solo em anéis volumétricos para atingir esses GC (5 anéis para cada GC) para determinar a curva de retenção de água, a condutividade hidráulica saturada e a resistência a penetração. Em casa de vegetação foram montados vasos em três camadas estratificadas, nos quais no terço inferior e superior a densidade do solo corresponde ao GC de 85% e, no terço médio, corresponde aos cinco GC pré-estabelecidos, simulando uma situação que ocorre a campo. Para analisar o efeito da compactação foi cultivado soja, milho e feijão. A umidade foi determinada a cada três dias para calcular a lâmina de água de irrigação para manter a umidade a 85% da capacidade de campo. A altura de plantas foi medida semanalmente. Aos 60 dias foram determinadas a massa seca da parte aérea e das raízes. O aumento do GC diminui a condutividade hidráulica saturada, a capacidade de aeração, a porosidade total e a macroporosidade, mas aumenta a resistência a penetração, a microporosidade e a capacidade de campo. As culturas de soja e milho produzem menos massa seca da parte aérea a partir do GC 90%, enquanto o feijão é a partir do GC 95%. A massa seca das raízes diminui, em todas as culturas estudadas, a partir do GC 95%. Altura de plantas é menor a partir do GC 95%. Para as especificidades do solo, de ambiente e de culturas estudadas, pode-se sugerir que GCs entre 85% e 90% não restringem o crescimento das culturas, entretanto, quando o GC supera 90 a 95% as condições do solo limitam o crescimento da parte aérea e/ou das raízes das culturas.

Palavras-chave: Plantio direto. Densidade relativa. Proctor. Culturas de grãos.

ABSTRACT

The no-tillage is a conservationist management system capable of reducing soil erosion and emissions of gas and pollutant into the atmosphere. However, this system has some restrictions due to the compaction process, with damage to the cultures. The objective was to evaluate the effect of different degrees of compaction on the physical attributes of a Nitosol and to relate it to the growth of shoots and roots of bean, soybean and corn, in addition to indicating in which degree of compaction the growth of shoots and roots is favored (optimal degree of compaction) and at which degree of compaction causes damages to crop growth (critical degree of compaction). The experiment was carried out in the laboratory and in at a greenhouse. The Normal Proctor test was carried out to define the maximum density, the optimal moisture to compact the Nitosol and establish the densities that corresponded to degrees of compaction (DC) of 85, 90, 95, 100 and 105%. Soil was added in volumetric rings to reach these DC (5 rings for each DC) to determine the water retention curve, saturated hydraulic conductivity and penetration resistance. In a greenhouse, vases were mounted in three stratified layers, in which the soil density in the lower and upper thirds corresponds to the 85% DC and, in the middle third, corresponds to the five pre-established DCs, simulating a situation that occurs in the field. To analyze the effect of compaction, soy, corn and bean were cultivated. Soil moisture was determined every three days to calculate the irrigation water depth to maintain humidity at 85% of field capacity. Plant height was measured weekly. At 60 days, the dry mass of shoots and roots were determined. Increasing DC decreases saturated hydraulic conductivity, aeration capacity, total porosity and macroporosity, but increases penetration resistance, microporosity and field capacity. Soybean and corn lost shoot dry mass production from DC 90% while beans had loss from DC 95%. The dry mass of roots decreases, in all cultures studied, from DC 95%. Plant height decreases from DC 95%. For the specificities of the soil, environment and cultures studied, it can be suggested that DCs between 85% and 90% do not restrict the growth of cultures, however, when the DC exceeds 90-95% the soil conditions limit the growth of the shoots and/or roots of crops.

Keywords: No-tillage. Relative bulk density. Proctor. Grain cultures.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Tópicos mais citados em artigos na área de Física do Solo relacionadas ao termo “compactação do solo” (soil compaction degree). As cores verde, azul e vermelho indicam, respectivamente, maior, média e pouca repetitividade de palavras entre artigos.	20
Figura 2 - Países com artigos publicados possuindo o termo “ <i>soil compaction degree</i> ” (grau de compactação de solo) em ordem de quantidade definido pelo tamanho dos círculos.	21
Figura 3 - Geolocalização da área de coleta do Nitossolo Bruno do experimento. ...	35
Figura 4 - Curva de Compactação para o Nitossolo Bruno	38
Figura 5 - Anéis volumétricos compactados artificialmente com cinco repetições de cada um dos graus de compactação - 85, 90, 95, 100 e 105% da D_{sm}	39
Figura 6 - Pesagem do anel volumétrico, em balança de precisão, após tensão de 100 hPa, em mesa de tensão em areia.....	40
Figura 7 - (A) Mesa de tensão com areia para aplicar as tensões de 10, 60 e 100 hPa e (B) Câmara de Richards para as tensões de 330 a 15000 hPa.	41
Figura 8 - Determinação da condutividade hidráulica saturada (K_s).	42
Figura 9 – Medição da resistência a penetração do solo em penetrômetro de bancada.	43
Figura 10 - Vasos montados com três camadas de solo em tubo PVC.	44
Figura 11 - Desenvolvimento das plantas de milho aos 25 dias após a semeadura (DAS) (A) e a 50 (DAS) (B).	46
Figura 12 - Desenvolvimento das plantas de soja aos 25 dias após a semeadura DAS (A) e 50 DAS (B).	47
Figura 13 - Desenvolvimento das plantas de feijão aos 25 dias após a semeadura DAS (A) e 50 DAS (B).	47
Figura 14 – Curvas de retenção de água para o Nitossolo Bruno nos cinco graus de compactação (GC), determinada em nove tensões, ajustadas pelo modelo de Van Genuchten.....	50
Figura 15 – Porosidade total (A), Macroporosidade (B), Microporosidade (C) e Capacidade de aeração (D) em função de diferentes graus de compactação do Latossolo Bruno.	51

Figura 16 – Capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e água disponível (AD) do Nitossolo em diferentes graus de compactação.	52
Figura 17 – Condutividade hidráulica saturada (Ksat) do Nitossolo em cinco graus de compactação (85, 90, 95, 100 e 105%).....	53
Figura 18 – Resistência a penetração de Nitossolo em diferentes graus de compactação.....	54
Figura 19 – Massa seca de parte aérea (MSPA) (A) e Massa seca de raízes (MSR) do feijão (B), milho (C) e soja (D) em função do grau de compactação do Nitossolo Bruno.	55
Figura 20 - Altura de plantas de feijão, milho e soja durante as oito semanas de crescimento (barras verticais), em função dos diferentes graus de compactação (GC 85 a 105%) do Nitossolo.	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação de tamanho de poros em relação a estudos e conceitos de diferentes autores.....	28
Tabela 2 - Caracterização física e química, na camada 0 a 0,2m do Nitossolo Bruno.	35
Tabela 3 - Atributos físicos do Nitossolo para diferentes graus de compactação	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
GC	Grau de Compactação
hPa	Hectopascal
MPa	Megapascal
SPC	Sistema de preparo convencional.
SPD	Sistema de plantio direto

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVO.....	16
1.1.1	Objetivos específicos.....	16
1.2	HIPÓTESES	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	18
2.1	SISTEMA DE PLANTIO DIRETO	18
2.2	VOSVIEWER.....	19
2.3	COMPACTAÇÃO DO SOLO	21
2.3.1	Causas da compactação.....	23
2.3.2	Grau de compactação	25
2.4	ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO	27
2.4.1	Porosidade do solo	27
2.2.3	Condutividade hidráulica saturada.....	29
2.2.4	Resistência à penetração	30
2.3	RELAÇÃO DA COMPACTAÇÃO COM AS CULTURAS	31
2.3.1	Soja.....	33
2.3.2	Milho.....	33
2.3.3	Feijão	34
3	MATERIAL E MÉTODOS	35
3.1	SOLO.....	35
3.2	COLETA DO SOLO.....	36
3.3	DETERMINAÇÕES DE LABORATÓRIO	36
3.3.1	Ensaio de Proctor Normal	36
3.3.2	Montagem dos anéis volumétricos em laboratório	38
3.3.3	Densidade, porosidade e curva de retenção de água	39
3.3.4	Condutividade hidráulica saturada.....	42
3.3.5	Resistência a penetração do solo.....	42
3.4	CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO EM CASA DE VEGETAÇÃO	43
3.4.1	Montagem dos vasos	44
3.4.2	Implantação e avaliação das culturas	45
3.4.3	Avaliação de parte aérea e raízes	48
3.4.3	Análise dos dados.....	48

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1	AVALIAÇÕES FÍSICAS DO SOLO.....	49
4.2	AVALIAÇÕES EM CASA DE VEGETAÇÃO	54
5	CONCLUSÕES	58
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
	ANEXOS.....	69

1 INTRODUÇÃO

O plantio direto é um sistema de manejo ambientalmente correto e reconhecido no mundo inteiro como sustentável, capaz de reduzir a erosão do solo e as emissões de gases e poluentes da atmosfera. O sistema de plantio direto sequestra carbono, incrementa a biodiversidade e favorece o ciclo hidrológico (MAFRA *et al.*, 2014; VALLE, 2015).

Entretanto, o mau manejo deste sistema pode proporcionar degradação física dos solos, principalmente através do processo de compactação, com prejuízos aos atributos quantitativos e qualitativos das culturas. A compactação é uma consequência indesejada da mecanização pois reduz a produtividade do solo e, em casos extremos, o torna inadequado ao crescimento de plantas (Hillel, 1998).

Para Reinert *et al.* (2008) “a compactação é um grave problema para a qualidade do solo e o desenvolvimento de uma agricultura sustentável, pois modifica os fluxos de água e ar no solo e reduz a produtividade das culturas agrícolas”.

Spliethoff *et al.* (2020) enfatizaram que as modificações na estrutura e no arranjo dos poros alteram a retenção de água, a aeração, a disponibilidade de água para as plantas e a resistência do solo à penetração, o que prejudica a fauna do solo e o desenvolvimento das culturas já que são efeitos indesejados, os quais tem custos elevados para recuperação. Contudo, a manutenção e recuperação da qualidade estrutural deve ser um objetivo constante para melhorar a qualidade do solo (Flores *et al.*, 2008).

Os efeitos da compactação nos atributos do solo são conhecidos, mas a resposta de cada solo é diferente uma vez que utilizamos a densidade do solo como indicador da compactação, isso porque a densidade e a porosidade variam com a granulometria, a mineralogia e o teor de matéria orgânica, enquanto o grau de compactação tem sido utilizado para analisar como está a qualidade da estrutura do solo e relacionar com o desenvolvimento e crescimento das culturas agrícolas (CARTER, 1990).

Assim, conhecendo a faixa do GC que permite melhor desenvolvimento das culturas, bem como o GC crítico para as culturas, ele poderia ser aplicado para vários tipos de solos, independentemente da sua granulometria, da mineralogia e do teor de matéria orgânica. Também será possível avaliar em qual grau de compactação a

cultura tem seu crescimento afetado com relação aos atributos morfológicos e produtivos, denominado de grau de compactação crítico.

No estudo de Suzuki *et al.* (2007 p. 9), com diferentes graus de compactação, os autores enfatizaram que:

“Respostas diferenciadas do rendimento com grau de compactação do solo podem ser observadas. Isso demonstra que os valores de grau de compactação para obtenção dos maiores rendimentos dependem das culturas, das condições climáticas e do tipo de solo, e provavelmente da metodologia de determinação da densidade referência (Proctor ou teste de compressão uniaxial, aplicando carga de 2000 hPa em amostras com estrutura de solo não preservada ou carga de 16000 hPa em amostras com estrutura preservada), as quais poderão amenizar ou intensificar os efeitos da compactação”.

Conforme relatado acima, a determinação da faixa adequada e de limites críticos do grau de compactação para o desenvolvimento de culturas é de fundamental importância agrícola para orientar técnicos e produtores na tomada de decisões sobre o manejo do solo onde a compactação tem sido observada a campo.

1.1 OBJETIVO

Avaliar o efeito de diferentes graus de compactação nos atributos físicos de um Nitossolo e relacionar com o crescimento da parte aérea e das raízes das culturas de feijão, milho e soja.

1.1.1 Objetivos específicos

Indicar em qual grau de compactação o crescimento da parte aérea e das raízes é favorecido (grau de compactação ótimo) e em qual grau de compactação ocorrem prejuízos ao crescimento das culturas (grau de compactação crítico).

Quantificar os atributos densidade do solo, porosidade do solo, condutividade hidráulica saturada e resistência a penetração em relação ao aumento gradativo do grau de compactação.

Analisar o crescimento da parte aérea e das raízes do milho, feijão e soja em resposta a presença de camada compactada no Nitossolo Bruno.

1.2 HIPÓTESES

As culturas têm seu crescimento favorecido em um grau de compactação entre 85 e 90%, mas acima de 90% são prejudicadas devido a elevada resistência a penetração e redução da macroporosidade e aeração do solo.

O sistema radicular das plantas se concentra na camada menos densa, situada acima da camada compactada.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 SISTEMA DE PLANTIO DIRETO

O sistema de plantio direto pode ser definido como a prática de semear sobre um solo coberto por resíduos vegetais, e, portanto, com mínimo revolvimento da camada superficial do solo (GOEDERT; SCHERMACK e FREITAS, 2002).

Nesse sistema, de acordo com Rodrigues e Pulga (2021), três princípios devem estar associados: o revolvimento mínimo do solo, com o devido controle de tráfego de máquinas; a rotação de culturas; e a permanência de resíduos vegetais da cultura anterior na superfície do solo. O SPD é importante para a conservação do solo contra a erosão e para o aumento de produtividade, pois os três princípios associados são capazes de trazer benefícios químicos, físicos e biológicos.

A evolução da área com o sistema de plantio direto (SPD) no Brasil apresentou três períodos distintos: 1972 a 1979 onde teve-se a origem das pesquisas com relação ao SPD no país; 1980 a 1991 a maturação do sistema de plantio direto mecanizado; e 1992 em diante se deu a consolidação do SPD mecanizado (CASÃO JUNIOR; ARAÚJO e LLANILLO, 2008). O responsável por importar esta técnica ao país, assim como difundir o conhecimento para outros produtores foi o agricultor Herbert Bartz (1938–2021), que em 1972 aplicou a técnica do SPD em sua propriedade de 180 hectares no estado do Paraná (SOUZA, 2021).

Ao longo dos anos a pesquisa agrícola comprovou a eficiência do plantio direto no controle da erosão hídrica, reduzindo as perdas de solo em mais de cinco vezes em relação ao preparo convencional (CASÃO JUNIOR; ARAÚJO e LLANILLO, 2008) além de benefícios para a qualidade física (SILVA *et al.*, 2016) e química do solo (ALBUQUERQUE *et al.*, 2005; COSTA *et al.*, 2004).

Na região sul do Brasil, há o predomínio da agricultura familiar, e muitas dessas propriedades tem implementado um sistema de produção que integra o cultivo de plantas anuais (milho, soja, feijão etc.) no verão, com a criação de gado bovino sobre pastagens anuais no inverno (NUNES *et al.*, 2006).

Esse sistema é conhecido como Integração lavoura-pecuária (ILP) e pode ser definido como um sistema de produção que alterna, na mesma área, o cultivo de pastagens anuais ou perenes, destinadas à produção animal e culturas destinadas à produção vegetal, sobretudo grãos. É importante considerar que a ILP é considerada

um sistema de produção em que vários fatores biológicos, econômicos e sociais se interrelacionam e determinam a sua sustentabilidade (Balbinot Júnior, 2009).

A ILP em SPD é muito promissora em várias regiões do Brasil, contudo gera preocupações aos técnicos e agricultores devido a possibilidade de compactação do solo na camada superficial, assim como pela baixa massa residual que as forrageiras de inverno proporcionam ao cultivo subsequente, quando mal manejadas (BORTOLINI *et al.*, 2016). Estudos de Dias Junior e Pierce (1996) relataram os efeitos do pisoteio e do pastejo intensivo sobre o solo que, em sistemas conservacionistas, reduz o aporte de material orgânico e o estoque de matéria orgânica, com consequências na agregação do solo. Somado a isso, a densidade do solo aumenta e a porosidade total diminui, principalmente quando o pisoteio e o trânsito de máquinas ocorre quando o solo está com a consistência plástica.

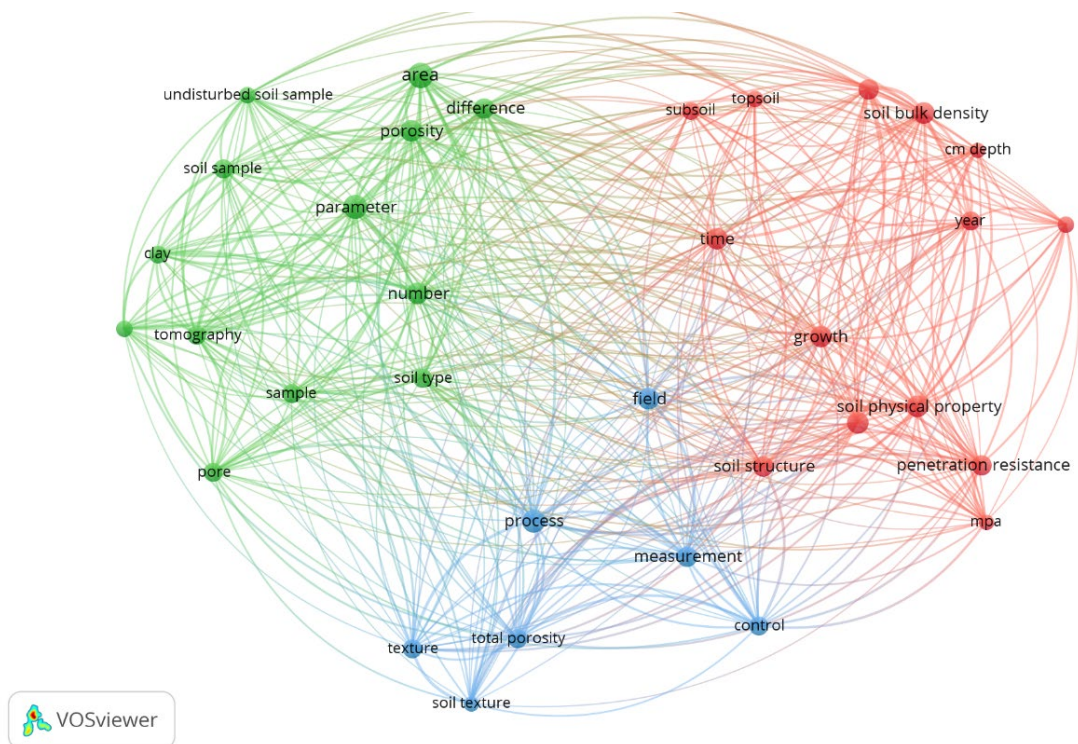
O pisoteio animal e o tráfego de máquinas degradam o solo, principalmente em períodos em que ele apresenta alto conteúdo de água, gerando a compactação do solo, que reduz a infiltração de água e aumenta a resistência do solo (LANZANOVA *et al.*, 2007), o que pode prejudicar o crescimento radicular das plantas (KAISER *et al.*, 2009).

Considerando a importância desse sistema, a compactação do solo será abordada com detalhes na sequência, a partir de uma revisão realizada com auxílio do VOSviewer®.

2.2 VOSVIEWER

Para esta revisão foi utilizada a plataforma VOSviewer®, que busca informações em base de dados de citações multidisciplinares como o Web of Science (Clarivate®). Nela foi possível identificar os países e os termos mais citados em artigos científicos na área de Física do Solo utilizando o termo “*Soil Compaction Degree*” (grau de compactação do solo) e limitada a pesquisa para os últimos cinco anos (2017 a 2022). Na Figura 1 pode-se observar que várias palavras-chaves foram selecionadas pelo sistema como as que mais tinham ligações entre si, assim como as palavras que mais se repetiam nos artigos selecionados, definidas pela cor verde, como por exemplo: tipo de solo (*soil type*), porosidade (*porosity*) e amostra de solo (*soil sample*). Esses termos também serão contemplados neste trabalho.

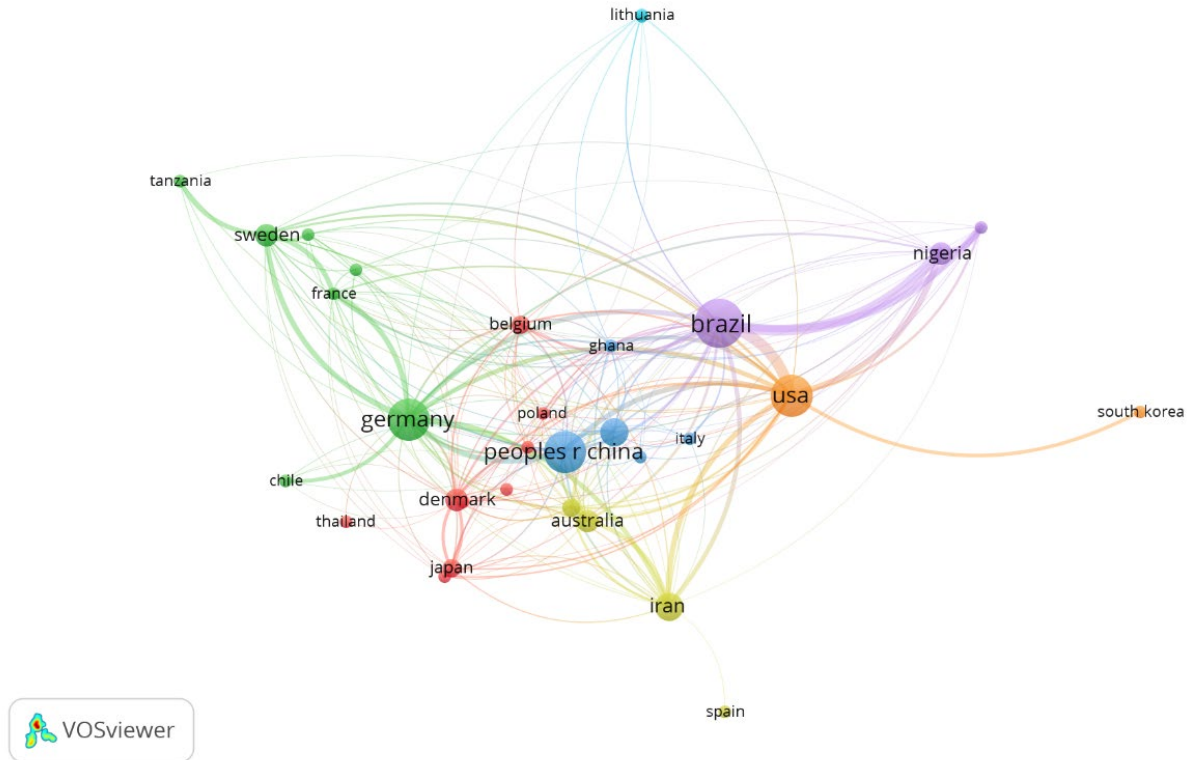
Figura 1 - Tópicos mais citados em artigos na área de Física do Solo relacionadas ao termo “compactação do solo” (soil compaction degree). As cores verde, azul e vermelho indicam, respectivamente, maior, média e pouca repetitividade de palavras entre artigos.



Fonte: adaptado de VOSviewer® (2022)

Na Figura 2 pode-se observar quatro países (circunferências maiores) que mais frequentemente citam artigos com o termo “*soil compaction degree*”, sendo eles: Brasil, Estados Unidos da América, República Popular da China e Alemanha. No Brasil, vê-se como o número de estudos relacionados a compactação do solo são maiores, isso se deve ao grande problema que sofremos com a compactação do solo e a busca de métodos para remediá-las.

Figura 2 - Países com artigos publicados possuindo o termo “*soil compaction degree*” (grau de compactação de solo) em ordem de quantidade definido pelo tamanho dos círculos.



Fonte: adaptado de VOSviewer® (2022)

2.3 COMPACTAÇÃO DO SOLO

Compactação do solo refere-se ao processo que descreve o decréscimo de volume de solos não saturados quando uma determinada pressão externa é aplicada, a qual pode ser causada pelo tráfego de máquinas agrícolas, equipamentos de transporte ou animais. Para a pedologia, esta é definida como uma alteração no arranjo de suas partículas constituintes do solo (RICHART *et al.*, 2005). É uma consequência indesejada da mecanização que reduz a produtividade biológica do solo e, em casos extremos, o torna inadequado ao crescimento de plantas (HILLEL, 1998).

A compactação do solo ocasionada pelo pisoteio dos animais e tráfego de máquinas é um dos grandes entraves à obtenção de elevadas produtividades das culturas, por reduzir o vigor das plantas e aumentar os processos de erosão do solo. Assim, torna-se necessário adequar o manejo aos fatores fitotécnicos, zootécnicos e

edáficos do sistema de produção para evitar a perda da capacidade de suporte à produtividade (SILVA *et al.*, 2014).

A compactação excessiva pode limitar a absorção de nutrientes, a infiltração e a redistribuição de água, as trocas gasosas e o desenvolvimento do sistema radicular, processos que diminuem a produção, aumentam a erosão e a potência necessária para o preparo do solo. Por outro lado, embora esporadicamente, a compactação do solo pode ter efeitos benéficos, atribuídos à melhoria do contato solo-semente e ao aumento da disponibilidade de água em anos secos (BORTOLINI *et al.*, 2016).

O trabalho de Silva *et al.* (2014) enfatizou que a compactação pode influenciar direta e indiretamente o crescimento das raízes, em razão do aumento da resistência à penetração; sendo que a resistência à penetração crítica ao desenvolvimento de raízes de diversas plantas pode variar entre 1,0 e 4,0 MPa; entretanto, a resistência entre 2,0 e 2,5 MPa tem sido a faixa mais utilizada como limitante ao desenvolvimento das raízes, entretanto, a maioria das raízes se desenvolve em solos com resistência à penetração acima desses valores, em razão da capacidade de explorarem zonas de menor resistência como poros e fendas que ocorrem entre unidades estruturais. Contudo, estudos de Albuquerque e Reinert (2001) comprovaram que outros fatores podem limitar o crescimento radicular como a quantidade reduzida de macroporos, a presença de concreções e a elevada saturação por alumínio.

Gubiani, Reinert e Reichert (2014) informaram que dentro do termo compactação, é citada a densidade crítica do solo para o crescimento de plantas, que é definida como a densidade que corresponde ao valor zero do intervalo hídrico ótimo (IHO) e que para um solo há apenas um valor de densidade crítica, desde que o IHO não seja modificado.

Reichert *et al.* (2009) definiram que o conteúdo de argila no solo também pode influenciar no desenvolvimento de raízes, pois quanto maior o conteúdo de argila, menor é a densidade crítica que causa restrição às culturas.

Reinert *et al.* (2008) estudaram densidades críticas de densidade de um Argissolo Vermelho (com textura superficial média e subsuperficial argilosa) para o crescimento de plantas de cobertura (crotalária, guandu, mucuna e feijão-de-porco), e constataram que densidades entre 1,75 e 1,85 Mg m⁻³ impuseram restrições com deformações nas raízes em grau médio, e acima de 1,85 Mg m⁻³, essas restrições foram mais severas, com grande engrossamento, desvios no crescimento vertical e concentração das raízes na camada mais superficial.

2.3.1 Causas da compactação

No Brasil houve uma tendência de se avaliar a susceptibilidade do solo à compactação causada pelo tráfego de máquinas agrícolas conjuntamente com o momento ideal para executar as operações mecanizadas no campo, por considerar racional o uso de medidas preditivas e preventivas da compactação, o que minimizaria os problemas de degradação dos solos agrícolas (RICHART *et al.*, 2005)

As operações de preparo como aração, gradagem, nivelamento e sistematização do terreno têm por objetivo melhorar as condições do solo para a germinação das sementes e para o crescimento e desenvolvimento das plantas, para facilitar o movimento de água e ar e para controlar plantas indesejáveis (ALVARENGA; ALBUQUERQUE FILHO, 2015). Entretanto, também apresenta efeitos negativos, pois o preparo reduz a rugosidade do solo, pulveriza a superfície e forma camadas compactadas na subsuperfície, além de facilitar a erosão hídrica, também limita o crescimento das raízes, o desenvolvimento e a produção das culturas (RICHART, *et al.*, 2005).

Estudos indicam que, quanto maior a pulverização do solo por ocasião do preparo, maior o potencial de compactação tendo em vista que o efeito do tráfego do trator se dá, principalmente, na camada superficial (0 a 20 cm) e a primeira passada é a que mais compacta o solo, tendo em vista que o efeito das passadas subsequentes ocorre em solo com maior densidade e, assim, com maior resistência a deformação plástica (CUNHA *et al.*, 2009).

Segundo Richart *et al.* (2005) a gota de chuva possui energia cinética e é uma fonte natural de compactação, pois quando cai sobre o solo descoberto, poderá compactá-lo e desagregá-lo. É possível quantificar a amplitude dos efeitos causados pela gota de chuva, conhecendo algumas de suas características, tais como: intensidade da chuva, diâmetro médio e a velocidade final das gotas médias (BORTOLOZZO; SANS, 2001). De acordo com Schaefer *et al.* (2002), com o impacto das gotas de chuva sobre a superfície do solo, ocorre a quebra mecânica dos agregados e a formação de uma camada adensada na superfície do solo.

Debiasi *et al.* (2013) enfatizaram que, diante desse cenário, para a manutenção do potencial produtivo do solo é necessário adotar sistemas de manejo adaptados às condições climáticas do país ou das regiões, focados na redução da intensidade de revolvimento e na manutenção da cobertura do solo. Assim, a tecnologia baseada na

implantação das culturas sem preparo prévio do solo, sobre os restos culturais da lavoura anterior começou a ser utilizada no Brasil, denominada de sistema de plantio direto ou sistema de semeadura direta. Segundo Carvalho e Freitas (2008), o sistema de plantio direto (SPD) apresenta vantagens em relação aos demais sistemas de cultivo, e afirmaram que:

“O SPD é muito eficiente no controle da erosão. A palha sobre a superfície protege o solo contra o impacto das gotas de chuva, reduzindo a desagregação e o selamento da superfície, garantindo maior infiltração de água e menor arraste de terra. O plantio direto reduz até 90% as perdas de terra e até em 70% a enxurrada. No plantio direto, necessita-se de menor volume de chuvas para as operações de plantio e tratos culturais”.

Silva *et al.* (2003) informaram que apesar das vantagens relacionadas acima, o SPD tem um fator de preocupação, que é a compactação do solo, causada pelo tráfego de máquinas, os quais foram intensificados com a modernização da agricultura, onde o maquinário ficou mais pesado (maior massa); esse uso de máquinas mais pesadas não foi acompanhado por um aumento proporcional do tamanho e largura dos pneus, resultando em significativas alterações nas propriedades físicas do solo.

Lebert e Horn (1991) e Portugal (2016) afirmaram que, não somente a pressão estática causa compactação, mas também forças dinâmicas da vibração do trator arrastando implementos e pelo patinamento. Estudos de Francetto *et al.*, (2014) têm mostrado o efeito negativo do tráfego contínuo e inadequado de máquinas e implementos sobre os atributos físicos e mecânicos.

O estudo de Reinert *et al.* (2008), em um Argissolo Vermelho Distrófico típico com textura superficial média e subsuperficial argilosa, indicou que o crescimento normal das plantas de aveia preta e ervilhaca ocorre até o limite de densidade de $1,75 \text{ Mg m}^{-3}$, entre a faixa de $1,75$ e $1,85 \text{ Mg m}^{-3}$, ocorre restrição com deformações na morfologia das raízes em grau médio e, acima de $1,85 \text{ Mg m}^{-3}$, essas deformações são significativas, com grande engrossamento, desvios no crescimento vertical e concentração na camada mais superficial.

Segundo Müller *et al.* (2021) a forma mais precisa de diagnóstico de compactação é a observação direta do desenvolvimento de raízes no perfil do solo, assim com a abertura de trincheiras é possível observar o desenvolvimento das raízes das plantas por completo, incluindo as raízes primárias e secundárias, e se existem camadas de impedimento, em qual profundidade e qual sua espessura.

O uso de penetrômetros como forma de avaliação é uma alternativa que tem sido usada para medir a resistência à penetração de raízes de modo indireto e consiste no uso de sondas (penetrômetros) que perfuram o solo e registram a resistência à penetração, em diferentes profundidades do perfil; essa ferramenta, aliada aos sistemas de georreferenciamento, permite fazer um mapeamento geolocalizado da resistência a penetração do solo em diversos pontos e em diferentes profundidades (OLIVEIRA FILHO *et al.*, 2015).

Além dos procedimentos citados acima para diagnosticar a compactação, o grau de compactação do solo é uma alternativa promissora, pois, a princípio, é menos dependente do tipo de solo, como da granulometria, da mineralogia e do teor de matéria orgânica. Com isso, é mais uma ferramenta para analisar problemas advindos da compactação na produtividade das plantas e será detalhado a seguir. Luciano *et al.* (2012) concluíram em seu trabalho que a densidade máxima de compactação é incrementada em solos que possuem algum teor de areia total e areia fina, e é reduzida em solos com maiores teores de argila e maiores limites de liquidez e de pegajosidade.

Em síntese, Richart *et al.* (2005), informaram que o impacto da gota de chuva, operações de preparo do solo e o tráfego de máquinas agrícolas são os causadores da compactação do solo, sendo esta última, a principal causadora do problema.

2.3.2 Grau de compactação

Segundo Hakansson (1990) grau de compactação é definido como “a razão entre a densidade do solo no campo e a densidade do mesmo solo em um estado de referência compactado”. O grau de compactação é um indicador que vem sendo utilizado para quantificar os impactos do manejo sobre a qualidade física do solo e relacionar com o crescimento de plantas (LIPIEC *et al.*, 1991; SUZUKI *et al.*, 2007; COLLARES *et al.*, 2008).

O teste de Proctor é um dos testes que visam obter o estado de referência compactado para obras de engenharia civil. Com ele é determinada a curva de compactação para obter a densidade máxima de cada solo. Foi criado por Ralph Roscoe Proctor em 1933, com o objetivo de obter a densidade máxima do maciço

terroso utilizado em obras de engenharia, como barragens, rodovias e outras obras da construção civil.

Estudos utilizando Proctor voltados a agricultura são relativamente recentes. Hakansson (1990), na Suécia, definiu a distinção entre os termos: estado de compactação do solo e grau de compactação do solo, além de citar o termo grau de compactação ótimo como sendo uma faixa do grau de compactação onde as plantas não sofrem prejuízos e tem seu desenvolvimento de forma satisfatória.

No Canadá, Carter (1990) constatou em solos arenosos, que com grau de compactação de 81% a produtividade de trigo e cevada foram máximas. Em solos Poloneses, Lipiec *et al.* (1991) verificaram que a produção de grãos foi prejudicada quando o grau de compactação superou 88%. Já no Brasil, Rosolem, Foloni e Tiritan (2002) estudaram graus de compactação em Latossolo Vermelho no estado de São Paulo, e concluíram que aumentos nos GC causaram diminuição no crescimento de raízes de crotalária. Quatro anos após, no Mato Grosso, Silva, Maia e Bianchini (2006) trabalharam com soja, milho, algodão e *Brachiaria brizantha* cultivadas em vasos contendo Latossolo Vermelho-Escuro distrófico e constataram que na densidade de $1,5 \text{ Mg m}^{-3}$ comprometeu o crescimento da parte aérea das plantas estudadas. No mesmo ano, Klein (2006) introduziu na literatura o termo: densidade relativa do solo como sinônimo ao termo grau de compactação, que consiste na divisão da densidade do solo pela densidade do solo máxima, obtida com o teste de Proctor. Atualmente, quem detém o maior número de participações, no país, como autor/coautor de artigos relacionados a esse tema, é o pesquisador José Miguel Reichert com cerca de 12 artigos (CLARIVATE, 2023).

O grau de compactação ou compactação relativa pode ser um parâmetro útil e de fácil medição para indicar mudanças nos parâmetros físicos como macroporosidade, condutividade hidráulica, permeabilidade ao ar e resistência à penetração do solo (Carter, 1990). De acordo com Suzuki *et al.* (2007) o estudo do grau de compactação ainda era incipiente no Brasil, especialmente em solos sob plantio direto. Este cenário vem sofrendo modificações, estudos mais recentes vêm sendo publicados, Teles (2019) objetivou avaliar em seu trabalho, qual grau de compactação é restritivo ao desenvolvimento do Jiggs. No mesmo ano, Andognini (2019) avaliou o efeito de diferentes graus de compactação na qualidade física de solos e nas características quantitativas e qualitativas da aveia-preta.

Contudo, como ressalva, o uso do “grau de compactação” foi inicialmente utilizado para camadas de solo revolvidas anualmente pelo manejo do solo, e os métodos de Proctor e de compressão uniaxial utilizados para obter a densidade referência do solo (densidade do solo máxima) utilizam solos com estrutura não preservada (HAKANSSON, 1990). Portanto, quando aplicados em estudos com sistema de plantio direto, com estrutura preservada, essa ressalva deve ser considerada.

Em experimento realizado em lavouras localizadas no Rio Grande do Sul, Suzuki (2005) obteve os maiores rendimentos para a cultura da soja com grau de compactação intermediário, cerca de 82%. O autor também afirmou que o alto grau de compactação reduz a porosidade e a aeração do solo, e aumenta a densidade e a resistência do solo à penetração, com isso reduz o desenvolvimento radicular. Salienta também, que um grau de compactação muito baixo pode ser indicativo de um solo muito solto, comprometendo a retenção de água e o contato solo-raiz.

Para a cultura do milho, Santos *et al.* (2005) e Mazurana *et al.* (2013) relataram que as maiores produções de matéria seca da parte aérea foram obtidas nos graus de compactação de 72%, evidenciando o efeito benéfico do menor grau de compactação para essa cultura. Suzuki *et al.* (2007) concluíram que para um Latossolo Vermelho distroférico típico o crescimento da soja foi maior no GC próximo de 86%; enquanto em um Argissolo Vermelho distrófico arênico não foi possível determinar um GC ótimo para as culturas da soja e feijão, pois o solo analisado estava com elevado GC (entre 93 e 98%).

2.4 ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO

2.4.1 Porosidade do solo

Os poros do solo são representados por cavidades de diferentes tamanhos e formas, determinados pelo arranjo das partículas sólidas (Ribeiro *et al.*, 2007) e constituem a fração volumétrica do solo ocupada com ar e solução (ar, água e nutrientes). Os poros do solo correspondem, portanto, ao espaço onde ocorrem os processos dinâmicos do ar e da solução do solo (HILLEL, 1972; COOPER, 2019).

Ribeiro *et al.* (2007) e Tognon (1991) definiram que a variação na condutividade hidráulica do solo saturado, densidade do solo, porosidade total e índice de vazios é

explicada pela variação na distribuição do tamanho dos poros dos solos, os quais são capazes de interferir na aeração, na condução e na retenção de água (REINERT *et al.*, 2020), na resistência à penetração e na ramificação das raízes no solo e, consequentemente, no aproveitamento de água e nutrientes disponíveis.

Hillel (1980) informou que o solo ideal deve apresentar um volume e dimensão dos poros adequados para a entrada, movimento e retenção de água e ar para atender às necessidades das culturas e são classificados em relação a seus tamanhos e funções, como pode ser visto abaixo (Tabela 1).

Tabela 1 - Classificação dos poros em função do seu diâmetro.

Classificação	Diâmetro de poros (μm)	Autor(es)
Criptoporos	<0,2	Klein e Libardi (2002)
Microporos	<60	Kiehl (1979)
	<50	Richards (1965)
	<10	Luxmoore (1981)
	0,2 a 50	Klein e Libardi (2002)
Mesoporos	10 a 1000	Luxmoore (1981)
	30 a 100	Edwards <i>et al.</i> (1990)
Macroporos	>60	Kiehl (1979)
	>50	Richards (1965); Klein e Libardi (2002)
	>1000	Luxmoore (1981)

Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Klein e Libardi (2002) informaram que os macroporos perdem a água em tensões menores que 60 hPa, os microporos que são esvaziados entre as tensões de 60 e 15000 hPa, e os criptoporos são os que perdem a água apenas para tensões maiores que 15000 hPa. Esta classificação foi adotada para este estudo.

Edwards *et al.* (1990) enfatizaram que mesmo os poros supracitados (macro e microporos) sendo de extrema importância, existem os mesoporos, os quais são responsáveis pela condução da água após a escoação da mesma pelos macroporos, além de enfatizar a existência dos bioporos.

Os bioporos são poros deixados por organismos da macrofauna e pelo processo de mineralização que as raízes sofrem, neles, são encontradas uma maior quantidade de nutrientes deixados pela decomposição das raízes e excreção de húmus de minhoca, além de constituir canal para melhor infiltração de água e desenvolvimento de raízes (HAN *et al.*, 2015)

A porosidade do solo é uma característica diretamente afetada pelo grau de compactação do solo, por isso a necessidade de estudo, uma vez que aumentos de densidade do solo causam aproximação das partículas de solo e consequentemente diminuição do tamanho dos poros.

2.2.3 Condutividade hidráulica saturada

A condutividade hidráulica do solo (K) é uma propriedade que expressa a facilidade com que a água se movimenta dentro do solo. A máxima de condutividade hidráulica é atingida quando o solo se encontra saturado, denominando-se condutividade hidráulica saturada (REICHARDT, 1990).

Gonçalves e Libardi (2013) informaram que os estudos iniciais sobre a condutividade hidráulica saturada são creditados a Henri Darcy, que em 1856 estabeleceu uma equação, batizada com seu nome, equação de Darcy, que estabelece:

“Que a quantidade de água que passa por unidade de tempo e de área pelo meio poroso saturado é proporcional ao gradiente de potencial total da água nesse meio. A constante de proporcionalidade foi denominada por Darcy de condutividade hidráulica, hoje conhecida como condutividade hidráulica do solo saturado” (GONÇALVES; LIBARDI, 2013 p. 2).

Darcy, trabalhando com colunas de areia saturada de água comprovou que, através de um permeâmetro de carga constante, que a quantidade de água que fluía por unidade de tempo e de área era proporcional ao gradiente hidráulico, sendo a constante de proporcionalidade denominada de condutividade hidráulica; é um parâmetro específico de cada meio poroso e representa sua capacidade de transmitir água (DARCY, 1856 *apud* SAUNDERS, 1978).

Autores como Richards, em 1931, e Hillel, em 1970 destacaram o trabalho de Darcy; Richards combinou a equação criada por Darcy com a equação da continuidade e obteve a equação diferencial geral que descreve o movimento de água nos solos. Anos depois, Hillel validou a equação de Darcy, relacionando a condutividade hidráulica com o potencial matricial (SAUNDERS, 1978).

De acordo com Silva e Kato (1997) e Albuquerque, Sangoi e Ender (2001), a compactação causa redução dos macroporos e, consequentemente, da condutividade hidráulica saturada, ao mesmo tempo que aumenta a resistência à penetração; sendo a macroporosidade o atributo que mais se relaciona com a condutividade hidráulica

do solo saturado, uma vez que quando o solo se encontra saturado, todos os poros estão preenchidos e conduzindo água, sendo sua condutividade máxima. Quando o solo perde água, os poros maiores ficam preenchidos por ar e a condutividade hidráulica decresce rapidamente (HILLEL, 1971; JONG VAN LIER, 2010).

A condutividade hidráulica saturada de um solo tem uma grande ligação com graus de compactação, tal que, tanto no ramo seco como no ramo úmido do solo, com o aumento do GC, ocorre a diminuição da água disponível nos três tipos de solo trabalhados (Latosolo Vermelho-Amarelo, Latossolo Vermelho-Escuro e Latossolo Roxo) e em todas as condições de manejo (cultura anual, pastejo e floresta) (DIAS JÚNIOR; ESTANISLAU, 1999).

2.2.4 Resistência à penetração

A resistência à penetração (RP) é uma determinação que caracteriza a resistência física que o solo oferece a algo que tenta se mover através de suas partículas (PEDROTTI *et al.*, 2001). Reichert *et al.* (2010) definiram que, qualitativamente, a resistência do solo é a capacidade de ele suportar forças sem apresentar falhas, seja por ruptura, fragmentação ou fluxo; em termos quantitativos, essa resistência pode ser definida como a máxima tensão que um solo pode suportar sem ocorrer falha.

A RP é uma das propriedades físicas diretamente relacionados com o crescimento das plantas e modificada pelos sistemas de preparo do solo. O crescimento das raízes pode causar a deformação do solo numa zona próxima à ponta das raízes e a pressão exercida contra as partículas e/ou agregados deve ser suficiente para propiciar a penetração e o alongamento das raízes (LETEY, 1985).

Ao longo dos anos, a RP tem sido utilizada, com inúmeras aplicações em diversas áreas da pesquisa agrônômica, sendo várias já consolidadas, tais como: detecção de camadas compactadas, estudos da ação de ferramentas de máquinas no solo, prevenção de impedimento mecânico ao desenvolvimento do sistema radicular das plantas, predição da força de tração necessária para execução de trabalhos, e para conhecimento de processos de umedecimento e de secamento (CUNHA *et al.*, 2002).

Assis *et al.* (2009) constataram que a RP depende de fatores intrínsecos do solo (textura, estrutura, mineralogia) e varia sensivelmente com a umidade do solo.

Em condição de baixa umidade, a água encontra-se com elevada tensão nos poros do solo. Além dessa tensão, somam-se as forças de coesão e de adesão já existentes entre os sólidos do solo, resultando em maior resistência à deformação ou à penetração de raízes numa condição de baixa umidade. Com o aumento da umidade, as forças de coesão entre as partículas do solo e o atrito interno diminuem, consequentemente reduz a RP.

Resistência a penetração na faixa de 2,0 a 4,0 MPa têm sido propostas como crítica ao crescimento radicular de culturas anuais (ARSHAD *et al.*, 1996; SUZUKI *et al.*, 2007), sendo seu efeito prejudicial potencializado quando o solo se encontra com baixa umidade (TAVARES FILHO; TESSIER, 2009). Secco (2003) avaliou o efeito da compactação de um Latossolo Vermelho distrófico e sugeriu RP na faixa de 2,6 a 3,3 MPa reduz a produtividade de trigo, milho e soja de 18, 34 e 24 %, respectivamente.

Beutler *et al.* (2006) observaram, em um Latossolo Vermelho com 330 g kg⁻¹ de argila, decréscimo de 32 % na produtividade da soja a partir de uma RP de 2,2 MPa. Teles (2019) concluiu que a resistência a penetração, em quatro subordens de Argissolo, obteve aumento significativo com o aumento da densidade do solo, independentemente do tipo do solo.

2.3 RELAÇÃO DA COMPACTAÇÃO COM AS CULTURAS

As alterações nas propriedades físicas do solo tornam imprescindível a utilização de espécies de cobertura capazes de romper camadas compactadas, como foi apontado no estudo de Bonneli *et al.* (2011), onde a produção de matéria seca de *Brachiaria decumbens* reduziu com o aumento da resistência a penetração e da densidade do solo, apresentando a menor produtividade quando a RP alcançou 2,4 MPa e a densidade 1,37 Mg m⁻³. Silva Filho *et al.* (2010) ao avaliarem áreas de pastagens utilizadas há 20 anos, constataram que, na camada de 0-10 cm de um Latossolo, a resistência a penetração estava acima do tolerado para o desenvolvimento de raízes, o que mostra a necessidade do manejo adequado das pastagens para evitar sua degradação.

Estudos de Medeiros, Soares e Guimarães (2005) indicaram que a compactação do solo reduz o volume de macroporos, enquanto os microporos permanecem praticamente inalterados, e como consequência o desenvolvimento das raízes é reduzido devido a maior resistência à penetração do solo e menor taxa de

mineralização da matéria orgânica, difusão e concentração de oxigênio, e disponibilidade de nutrientes e água no solo.

Em diversos estudos, fica claro que a compactação, tipo de solo e a densidade influenciam na disponibilidade de água. Cavalieri *et al.* (2006) em um Latossolo Vermelho distrófico com textura franco argilo-arenosa, relataram maior disponibilidade hídrica quando a densidade do solo estava entre 1,35 até 1,65 Mg m⁻³, e menor disponibilidade acima de 1,65 Mg m⁻³. Além disso, em solos arenosos o crescimento radicular de plantas é limitado com densidades acima de 1,75 Mg m⁻³ (REINERT *et al.*, 2008).

A quantidade de areia presente em um solo influencia o grau de compactação e a densidade do solo que limitam o crescimento das culturas. Correa *et al.* (2006) observaram que a umidade ótima de compactação diminuiu e a densidade do solo máxima aumentou, à medida que se adicionou areia em Latossolos Vermelho-Amarelo de textura média, argilosa e muito argilosa.

Visto isso, vários autores como Silva *et al.* (1986), Ohu, Ayotamuno e Folorunso (1987) e Raghavan, Alvo e Mckyes (1990), afirmaram que é esperado que o grau de compactação máximo do solo cresça à medida que o teor de argila dos solos aumente; o contrário é verdadeiro, onde solos com maiores teores de areia são menos compactáveis. Silva e Raghavan (2001) concluíram em seu experimento que densidade do solo de até 1,6 Mg m⁻³, correspondentes a uma RP de 1,2 MPa, em solo arenoso, não foram suficientes para suprimir o crescimento radicular de aveia preta, guandu, milheto, mucuna preta, sorgo granífero e tremoço azul.

Além das respostas dos tipos de solo em relação a compactação, existem pesquisas para selecionar espécies que tenham capacidade de romper camadas compactadas, como a ervilhaca (*Vicia sativa*) citadas no estudo de Fontaneli (2010), que além de produzirem matéria seca, auxiliam na descompactação do solo e na ciclagem de nutrientes. No estudo de Reinert *et al.* (2008) foi concluído que o crescimento normal das plantas de cobertura ocorre até o limite de densidade de 1,75 Mg m⁻³, já na faixa entre 1,75 e 1,85 Mg m⁻³, ocorre restrição com deformações na morfologia das raízes em grau médio e, acima de 1,85 Mg m⁻³, essas deformações são significativas, com grande engrossamento, desvios no crescimento vertical e concentração na camada mais superficial.

2.3.1 Soja

O experimento de Kutah *et al.* (2017) concluiu que o desenvolvimento das raízes, assim como o número de vagens por planta foram as variáveis mais afetadas pelo grau de compactação do solo; com base nos resultados obtido pelos pesquisadores pode-se concluir que RP próximos ou superiores a 90% para seu estudo (cerca de 2,7 MPa) são críticos ao desenvolvimento de plantas de soja. Também pode-se afirmar que conforme aumentou a RP, os parâmetros avaliados, altura de plantas, diâmetro do caule, número de vagens e número de folhas, foram prejudicados (ROSA; GROMOWSKI JUNIOR e RESENDE, 2019).

Segundo Silva *et al.* (2014) as variáveis da soja são afetadas em diferentes graus de compactação de um Latossolo Bruno: a altura das plantas diminuiu a partir do grau de compactação de 82%; a produção de matéria seca das raízes a partir de 75%; e a produção de matéria seca da parte aérea a partir de 87%. Portanto, os autores enfatizam que o grau de compactação restritivo à cultura depende do atributo que está sendo avaliado.

2.3.2 Milho

Para a cultura do milho, Santos *et al.* (2005) evidenciaram que maiores produções de matéria seca de parte aérea, teor de fósforo na parte aérea e fósforo acumulado na parte aérea foram obtidas nos graus de compactação entre 65 a 77%, evidenciando o efeito benéfico de um certo grau de compactação; além disso, em solos com maior compactação, foi necessário a aplicação de maior dose de fósforo para aumentar a produtividade, sugerindo maiores gastos com adubos em solos compactados. Ressaltaram que o fósforo atuou como um fator de “alívio da compactação”, elevando a produtividade.

Em relação a RP Freddi *et al.* (2009) relataram que a produtividade dos híbridos de milho diminuiu quando a RP foi maior que 2,2 MPa, determinada com umidade do solo na tensão de 100 hPa.

Um estudo em casa de vegetação, utilizando um Latossolo Vermelho-Amarelo definiu que o aumento da densidade reduziu o desenvolvimento radicular e a produção de matéria seca total de milho com maior magnitude quando a compactação ocorre na camada superficial. E houve redução do crescimento da parte aérea com o

aumento da densidade do solo, independente da profundidade da camada compactada (CARNEIRO *et al.*, 2018).

2.3.3 Feijão

Em estudos que analisavam a relação entre concentração de micronutrientes e compactação do solo, foi constatado por Alves *et al.* (2003), em experimento em casa de vegetação com dois solos, Latossolo Vermelho-Amarelo e Latossolo Vermelho, que nutrientes mais móveis no solo, como nitrogênio, potássio e enxofre, sujeitos à lixiviação, em geral, tiveram suas concentrações aumentadas na massa seca da parte aérea do feijoeiro com o aumento do grau de compactação do solo; também foi indicado que o incremento do grau de compactação reduziu o crescimento do feijoeiro. O aumento da compactação do solo afetou negativamente o desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea do feijoeiro em um experimento utilizando um Latossolo Vermelho perférico em casa de vegetação, cujo efeito foi mais expressivo a partir da densidade do solo de $1,2 \text{ Mg m}^{-3}$ (GUIMARÃES *et al.*, 2002).

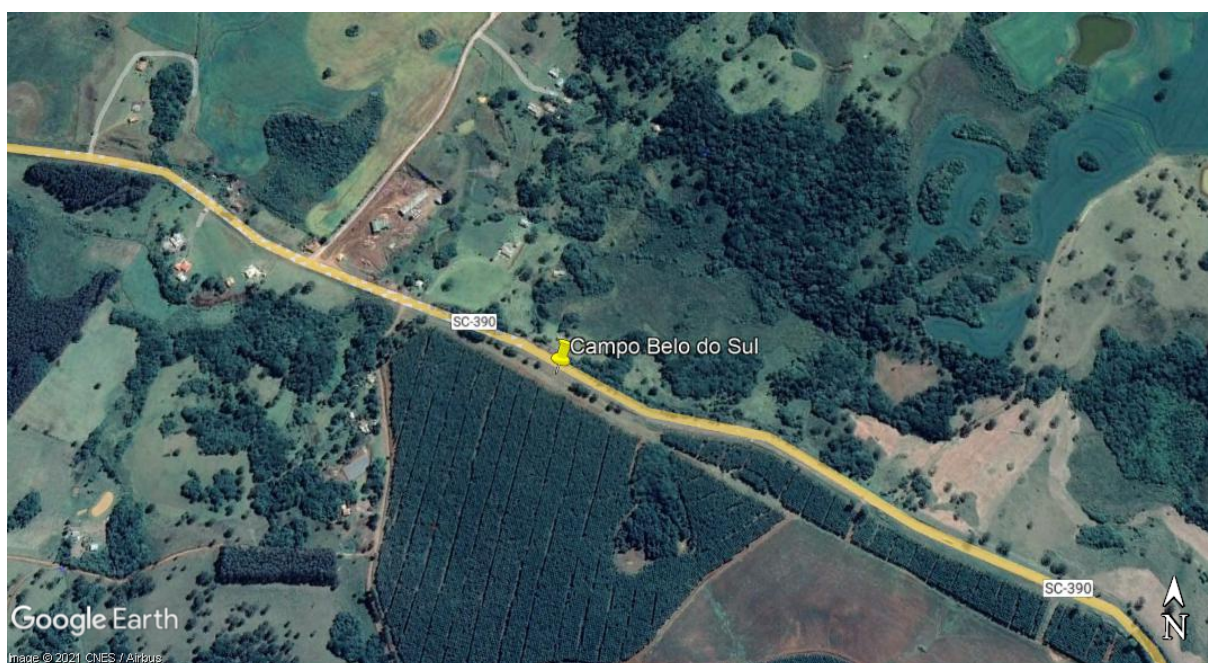
Considerando a interrelação entre grau de compactação e tipo de cultura, se faz necessário um estudo para solos da região do Planalto Serrano Catarinense, objetivando quantificar o crescimento da parte aérea e radicular de algumas culturas sob condições de solo compactado. Uma das questões que precisa ser melhor compreendida é sobre os limites críticos do grau de compactação que afetam o desenvolvimento das culturas. O objetivo do presente estudo é auxiliar técnicos e produtores na tomada de decisões sobre o manejo do solo onde a compactação tem sido observada a campo.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 LOCAL E SOLO

O solo do experimento é um Nitossolo Bruno, coletado no município de Campo Belo do Sul, Santa Catarina, coordenadas 27°54'42" S 50°42'44" O (Figura 3) e altitude de 998 m. Para avaliar os atributos físicos e químicos, o solo foi enviado ao laboratório de análise de solos do CAV-UDESC e os resultados estão descritos na Tabela 2. O solo é muito argiloso (72%), muito ácido (pH_{SMP} 4,8) e com caráter aluminico.

Figura 3 - Geolocalização da área de coleta do Nitossolo Bruno do experimento.



Fonte: Google Earth®, 2021.

Tabela 2 - Caracterização física e química, na camada 0 a 0,2m do Nitossolo Bruno.

Argila MO ¹	pH_{SMP}	Ca	Mg	Na	K	Al	H+Al	S	CTC_{ef}	CTC_{pH7}	V	m
----%----		----- $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$ -----									---%---	
72 2,4	4,8	1,1	0,5	0,01	0,28	4,5	17,4	1,9	6,4	19,3	10	71

Nota: ¹Matéria orgânica (MO); pH em água ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$); pH em índice SMP (pH_{SMP}); Cálcio (Ca); Magnésio (Mg); Sódio (Na); Potássio (K); Alumínio (Al); Hidrogênio + alumínio (H+Al); Enxofre (S); Capacidade de troca de cátions efetiva (CTC_{ef}); Capacidade de troca de cátions em pH7 (CTC_{pH7}); Saturação por bases (V); Saturação por alumínio (m).

Fonte: elaborado pelo autor (2022).

3.2 COLETA DO SOLO

Foi coletado 250 kg de solo com estrutura alterada na camada arável (0-0,2 m), com auxílio de pá de corte, acondicionado em sacos de 25 kg e transportado ao laboratório de Física e Manejo do Solo do Centro de Ciências Agroveterinárias (CAV) da Universidade do Estado de Santa Catarina (Udesc), em Lages-SC. O solo foi armazenado até atingir a friabilidade para ser peneirado em malha de 4,75 mm.

3.3 DETERMINAÇÕES DE LABORATÓRIO

3.3.1 Ensaio de Proctor Normal

A densidade do solo máxima (D_{sm}) e a umidade ótima de compactação (U_{go}) foram obtidas pelo teste de Proctor normal, padronizado no Brasil pela ABNT através da NBR 7.182/86 (ABNT, 1986). Para realizar esse teste, as amostras foram secas ao ar, destorroadas e peneiradas com peneira de malha com 4,8 mm. Durante o peneiramento, buscou-se eliminar o material orgânico não decomposto (raízes e restos de parte aérea).

Cerca de 15 kg de solo com umidade inicial próximo da friabilidade foi dividido em dez sacos plásticos. Uma mostra foi mantida com umidade na friabilidade e nas demais foi adicionado água com quantidades crescentes (acréscimos gradativos de $0,02 \text{ g g}^{-1}$), para aumentar em aproximadamente $0,20 \text{ g g}^{-1}$ a umidade entre a amostra menos úmida (umidade na friabilidade) e a amostra mais úmida. Para determinar o volume de água a ser adicionado, utilizou-se a equação 1.

$$V_a = \frac{M_{su}}{1 + U_{gi}} \times (U_{gd} - U_{gi}) \quad (\text{Eq. 1})$$

Em que, V_a : volume de água a ser adicionado (cm^3); M_{su} : massa de solo úmido (g); U_{gi} : umidade gravimétrica inicial (g g^{-1}); e U_{gd} : umidade gravimétrica desejada (g g^{-1}).

As amostras com diferentes umidades foram submetidas ao teste de Proctor Normal em um aparelho da marca Soiltest, modelo CN 4230. Cada amostra, com diferentes umidades, foi compactada em um cilindro metálico com 1.000 cm^3 de

volume, em três camadas, cada uma recebendo 26 golpes de um soquete metálico de 2,5 kg, caindo de uma altura de 30 cm, conforme descrito na norma ABNT, gerando uma energia de 5,62 kgf.cm⁻². A energia aplicada é calculada através da equação 2.

$$E = \frac{p \cdot L \cdot n \cdot N}{V} \quad (\text{Eq. 2})$$

Em que, E: energia aplicada (kgf cm⁻²); p: peso do soquete (kg); L: altura de queda do soquete (cm); n: número de camadas (3); N: número de golpes aplicados por camada; e V: volume do cilindro (cm³).

O ensaio foi realizado com amostras de solo, sem reuso. Após cada ensaio, a amostra solo + cilindro teve sua massa medida. Posteriormente o solo foi retirado de dentro do cilindro para determinar a umidade gravimétrica das três camadas (topo, meio e fundo) e calcular a massa de solo seco (equação 3).

$$M_{ss} = \frac{M_{su}}{1 + U_g} \quad (\text{Eq. 3})$$

Em que, Msu: massa de solo úmido (g); Mss: massa de solo seco (g); e Ug: umidade gravimétrica (g g⁻¹).

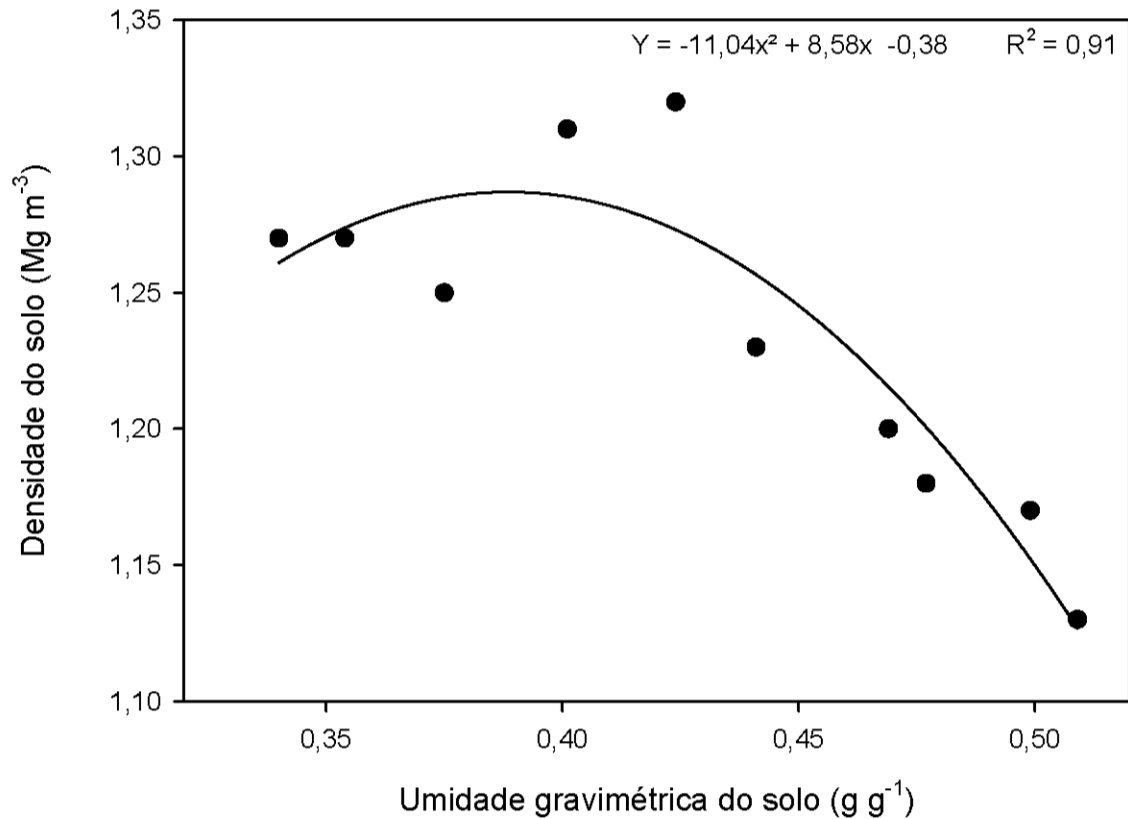
Após determinada a densidade do solo em cada umidade gravimétrica, foi plotado um gráfico e ajustada a curva de compactação do solo pelo software SigmaPlot® (umidade gravimétrica x densidade do solo) pela equação $y = ax^2 + bx + c$. A partir desta equação foi estimada a Ugo e a Dsm utilizando as equações 4 e 5, respectivamente.

$$U_{go} = \frac{-b}{2.a} \quad (\text{Eq. 4})$$

$$D_{sm} = \frac{-(b^2 - 4.a.c)}{4.a} \quad (\text{Eq. 5})$$

A umidade ótima de compactação foi de 0,39 g g⁻¹ e a densidade do solo máxima (Dsm) foi de 1,29 Mg m⁻³.

Figura 4 - Curva de Compactação para o Nitossolo Bruno



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

3.3.2 Montagem dos anéis volumétricos em laboratório

O solo foi peneirado e seco ao ar, com umidade conhecida, pesado e adicionado em cilindros de aço (0,05 m de altura, 0,06 m de diâmetro e volume de $141\ cm^3$). As massas foram pesadas para obter densidades de: 1,09; 1,18; 1,23; 1,29 e $1,36\ Mg\ m^{-3}$ – correspondentes a diferentes GC: 85, 90, 95, 100 e 105% da Dsm.

Na montagem, foi utilizada uma prensa hidráulica. Para evitar a perda de solo, foi utilizado um conjunto com borracha elástica e tecido permeável, encaixados na parte inferior do anel volumétrico. A quantidade específica de solo, equivalente a cada uma das densidades desejadas, foi acondicionada dentro do anel até que o volume de solo correspondesse ao volume do anel (Figura 5).

Figura 5 - Anéis volumétricos compactados artificialmente com cinco repetições de cada um dos graus de compactação - 85, 90, 95, 100 e 105% da *Dsm*.



Fonte: Acervo do autor, 2021.

3.3.3 Densidade, porosidade e curva de retenção de água

As amostras de solo montadas no laboratório foram saturadas em bandeja com água por um período de 48 horas, por meio da capilaridade, com elevação gradual de água até atingir a superfície do solo. Após a saturação, a massa dos conjuntos anel + material de proteção + solo saturado foram pesados em balança de precisão de duas casas (Figura 6).

Figura 6 - Pesagem do anel volumétrico, em balança de precisão, após tensão de 100 hPa, em mesa de tensão em areia.



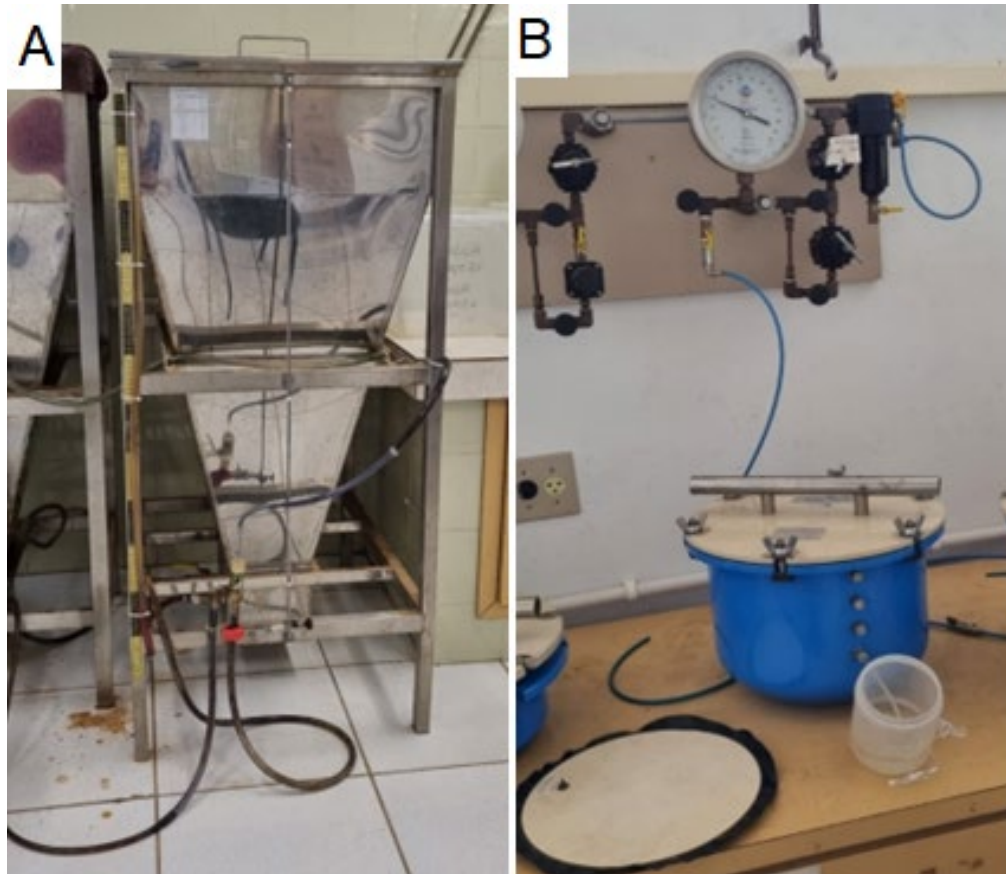
Fonte: Acervo do autor, 2021.

Após a pesagem, os cilindros foram levados à mesa de tensão para aplicar as tensões de 10, 60 e 100 hPa (GUBIANI, 2009) (Figura 7A), e posteriormente levados às câmaras de Richards para aplicar as tensões de 330, 1000, 3000, 5000, 10000 e 15000 hPa (LIBARDI, 2005) (Figura 7B). Após a aplicação de cada tensão, o solo drena até atingir o equilíbrio e sua massa é então determinada em balança de precisão (Figura 6) para calcular a umidade retida em cada tensão aplicada. Após a última tensão (15000 hPa), os anéis foram novamente saturados por capilaridade e seguiram para o teste de condutividade hidráulica saturada.

Com essas determinações foi calculada: a Porosidade total (PT), pela divisão da diferença entre massa do solo saturado e massa de solo seco, pelo volume do anel volumétrico; a microporosidade (Micro), diferença de umidade entre a massa da amostra na tensão de 60 hPa e a massa de solo seco em estufa; a macroporosidade (Macro) através da diferença entre PT e Micro (EMBRAPA, 1997); a capacidade de campo (CC), umidade do solo na tensão de 100 hPa; o ponto de murcha permanente

(PMP), umidade do solo na tensão de 15000 hPa; e a água disponível (AD), umidade retida entre as tensões de 100 e 15000 hPa.

Figura 7 - (A) Mesa de tensão com areia para aplicar as tensões de 10, 60 e 100 hPa e (B) Câmara de Richards para as tensões de 330 a 15000 hPa.



Fonte: Acervo do autor, 2021.

Aos dados de tensão aplicada e umidade volumétrica retida foi ajustada a curva de retenção de água pela equação de Van Genuchten (LIBARDI, 2005) (Equação 6), e plotado em gráficos utilizando o software SigmaPlot 12.

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[(1 + \alpha \Psi_m)^n]^m} \quad (\text{Equação 6})$$

Em que, θ : umidade volumétrica do solo (g g^{-1}); θ_r : umidade volumétrica no ponto de murcha permanente (g g^{-1}); θ_s : umidade volumétrica na saturação (g g^{-1}); Ψ_m : potencial matricial (MPa); α , n e m são os parâmetros empíricos do modelo (adimensionais).

3.3.4 Condutividade hidráulica saturada

Após a pesagem dos anéis a 15000 hPa, eles foram novamente saturados por capilaridade através da elevação gradual da lâmina de água, e após isso a determinação da condutividade hidráulica saturada (K_s) (Figura 8) pode ser realizada utilizando o permeômetro de carga variável, seguindo a metodologia descrita por Gubiani *et al.* (2008).

Figura 8 - Determinação da condutividade hidráulica saturada (K_s).



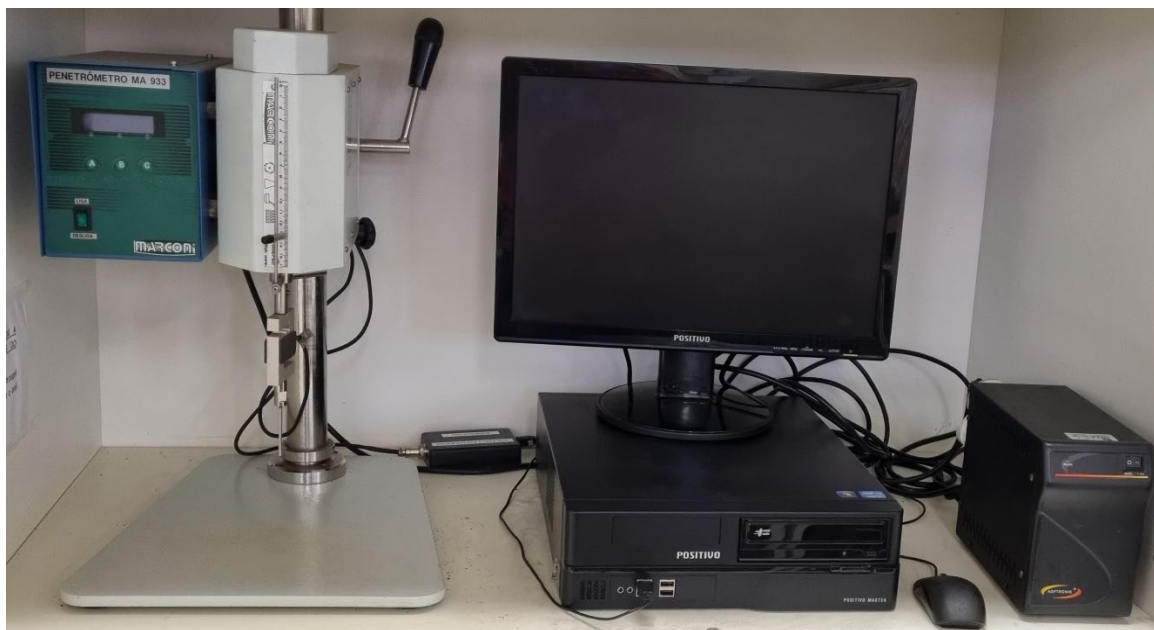
Fonte: Acervo do autor, 2021.

3.3.5 Resistência a penetração do solo

Finalizada a análise de condutividade hidráulica saturada, os 25 anéis (5 GCs com 5 repetições), foram colocados em mesa de areia na tensão de 100 hPa, e após foi medida a resistência a penetração (RP) em um penetrômetro de bancada da marca

Marconi®, modelo MA 933, equipado com um cone de 3,0 mm de diâmetro (Figura 9), o qual foi introduzido nas amostras até a profundidade de 5,0 cm, com velocidade de medição constante de 30 mm min^{-1} e leituras a cada 1 segundo.

Figura 9 – Medição da resistência a penetração do solo em penetrômetro de bancada.



Fonte: Acervo do autor, 2021.

Devido ao efeito de bordadura dos anéis, a resistência a penetração foi calculada como a média da RP determinadas na camada de 1 a 4 cm. Ao final da definição de RP, os cilindros com solo foram levados à estufa de circulação de ar com temperatura constante de $105^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ para determinação da massa de solo seco.

3.4 CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO EM CASA DE VEGETAÇÃO

O experimento com as culturas foi conduzido em casa de vegetação no Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina (CAV/UDESC), na cidade de Lages - SC, de 05 de novembro de 2021 a 11 de janeiro de 2022.

Trinta dias antes da montagem do experimento, o pH do solo foi corrigido para 6,0 com calcário calcítico filler e armazenado até próximo a montagem dos vasos, quando então recebeu a adubação conforme recomendação do Manual de Calagem

e Adubação para os estados do RS e SC (CQFS – RS/SC, 2016), de forma separada, para cada uma das culturas.

3.4.1 Montagem dos vasos

Os tratamentos foram cinco graus de compactação (GC de 85, 90, 95, 100 e 105%, que correspondem as Ds de 1,09, 1,18, 1,23, 1,29 e 1,36 Mg m⁻³). Cada coluna foi montada com canos de PVC com diâmetro de 100 mm, com anéis superiores e inferiores com altura de 100 mm e os anéis intermediários com 70 mm, totalizando 270 mm de altura. As três partes foram unidas com fita Silvertape® (Figura 10).

Figura 10 - Vasos montados com três camadas de solo em tubo PVC.



Fonte: Acervo do autor, 2021.

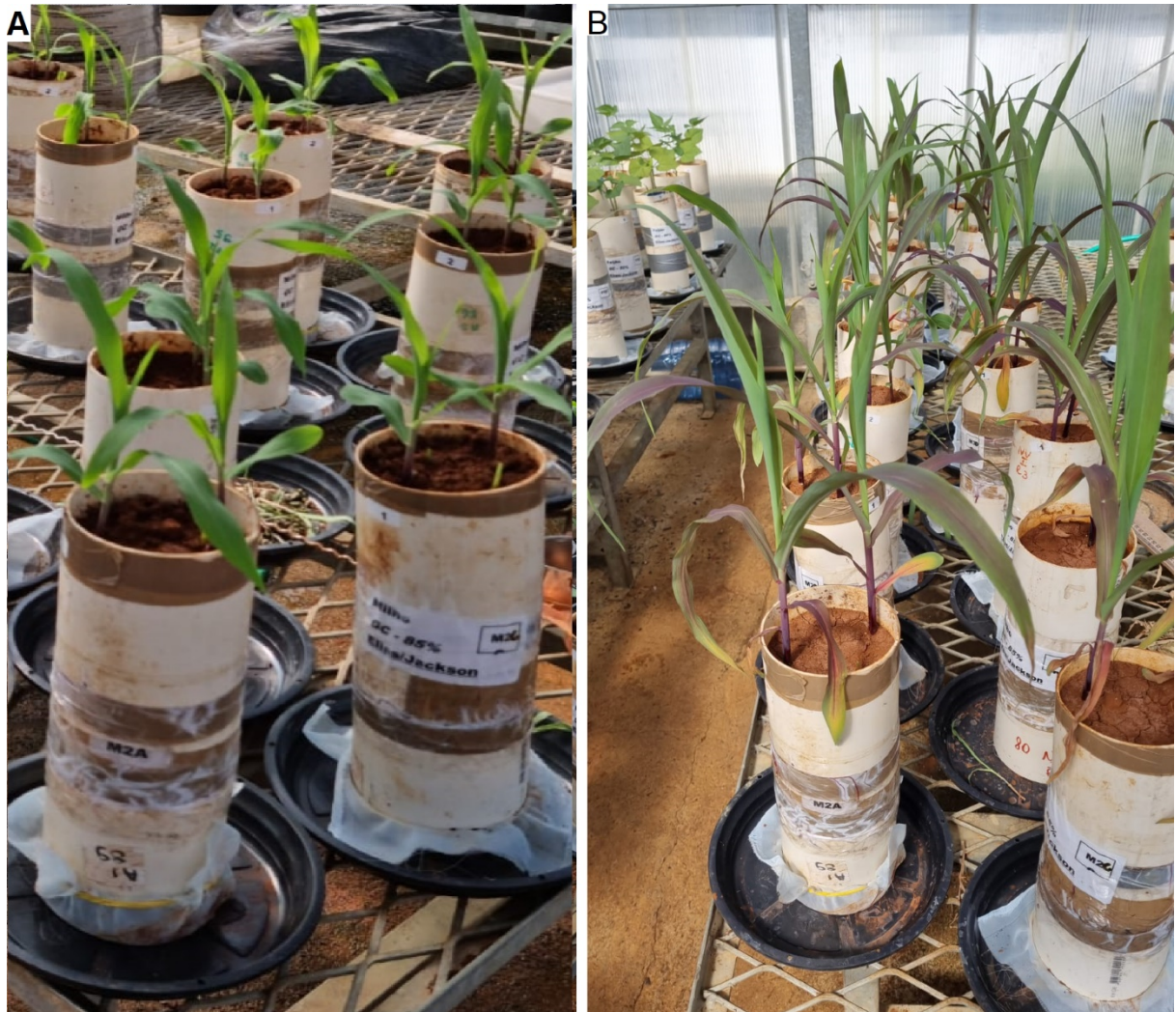
Os anéis superiores e inferiores foram preenchidos com solo, usando a densidade correspondente ao GC de 85%, para facilitar o crescimento das raízes. Os anéis superiores foram preenchidos até a altura de 80 mm, deixando uma borda de 20 mm para irrigação. Nos anéis intermediários a densidade do solo correspondeu aos cinco GC estabelecidos. Na base de cada coluna foi firmado um pedaço de tule com o auxílio de uma borracha para evitar perda de solo. A formatação dos vasos foi assim elaborada para simular uma condição existente a campo no sistema de plantio

direto, no qual a compactação ocorre numa camada logo abaixo da camada superficial – entre 8 e 15 cm.

3.4.2 Implantação e avaliação das culturas

As culturas da soja (*Glycine max*), milho (*Zea mays*) e feijão (*Phaseolus vulgaris*) foram semeadas em 12 de novembro de 2021, sendo as cultivares RSF IPRO Raio, NK508 e IPR Tuiuiú, respectivamente. A densidade de semeadura nos vasos para as culturas foi de 4 sementes por vaso, com profundidade de semeadura de 5 mm. Sete dias após a semeadura, foi realizado o desbaste, mantendo-se duas plantas por vaso. Semanalmente, fez-se a medição da altura das plantas. A umidade do solo foi controlada por meio de pesagem dos vasos, a cada 3 dias, em balança de precisão e posterior irrigação com o auxílio de um regador manual, a fim de repor a água evapotranspirada, mantendo a umidade do solo a 85 % da capacidade de campo ($0,43 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). As figuras 11, 12 e 13 mostram o desenvolvimento das plantas de milho, soja e feijão, respectivamente, aos 25 e 50 dias após a semeadura do experimento (DAS).

Figura 11 - Desenvolvimento das plantas de milho aos 25 dias após a semeadura (DAS) (A) e a 50 (DAS) (B).



Fonte: Acervo do autor, 2021.

Figura 12 - Desenvolvimento das plantas de soja aos 25 dias após a semeadura DAS (A) e 50 DAS (B).



Fonte: Acervo do autor, 2021.

Figura 13 - Desenvolvimento das plantas de feijão aos 25 dias após a semeadura DAS (A) e 50 DAS (B).



Fonte: Acervo do autor, 2021.

3.4.3 Avaliação de parte aérea e raízes

A altura de plantas foi medida uma vez por semana, durante oito semanas. Após 60 dias da emergência, as plantas foram cortadas rente ao solo, acondicionadas em sacos de papel, pesadas, colocadas em estufa de circulação de ar a 60 °C por 48 h, e após este período, foram pesadas novamente para definir a massa seca da parte aérea. Para avaliar o sistema radicular foi realizada a separação das três unidades (camadas) formadoras dos vasos, e as raízes de cada camada foram separadas do solo para determinar a massa seca das raízes nos diferentes graus de compactação. Para a separação das raízes e do solo, foi utilizada peneira com malha de 2 mm e submetidas a jatos de água, para remover o solo das raízes que permanecem retidas sobre a malha. As raízes limpas foram separadas e colocadas em sacos de papel, secas em estufa e pesadas para determinar a massa seca das raízes.

3.4.3 Análise dos dados

Os dados dos atributos do solo e das culturas foram submetidos à análise de homogeneidade das variâncias (Teste de Bartlett) e normalidade dos resíduos (Teste de Shapiro-Wilk). A análise da variância foi realizada através do teste F ($p=0,05$) considerando o delineamento inteiramente casualizado. As médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($p=0,05$). Ao fim foi realizada a análise de correlação de Pearson.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 AVALIAÇÕES FÍSICAS DO SOLO

O aumento do grau de compactação diminuiu a porosidade total, a macroporosidade, a capacidade de aeração e a condutividade hidráulica saturada, e elevou a resistência à penetração, o volume de microporos, a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente (Tabela 3).

Tabela 3 - Atributos físicos do Nitossolo para diferentes graus de compactação

GC	Ds	PT	Macro	CA	Micro	CC	PMP	AD	Ks	RP
%	Mg m ⁻³	----- m ³ m ⁻³ -----				-----			mm h ⁻¹	MPa
85	1,09	0,69 a	0,25 a	0,26 a	0,44 e	0,43 d	0,33 e	0,09 b	163 a	1,8 d ¹
90	1,18	0,64 b	0,18 b	0,18 b	0,46 d	0,45 c	0,34 d	0,10 ab	54 b	2,7 d
95	1,23	0,63 bc	0,15 c	0,15 c	0,48 c	0,47 b	0,36 c	0,11 a	22 bc	4,0 c
100	1,29	0,61 cd	0,11 d	0,11 d	0,50 b	0,49 a	0,38 b	0,11 a	4 c	5,8 b
105	1,36	0,59 d	0,08 e	0,09 e	0,51 a	0,50 a	0,39 a	0,11 a	2 c	9,2 a
CV ² (%)		2	9	6	1	1	1	7	42	13

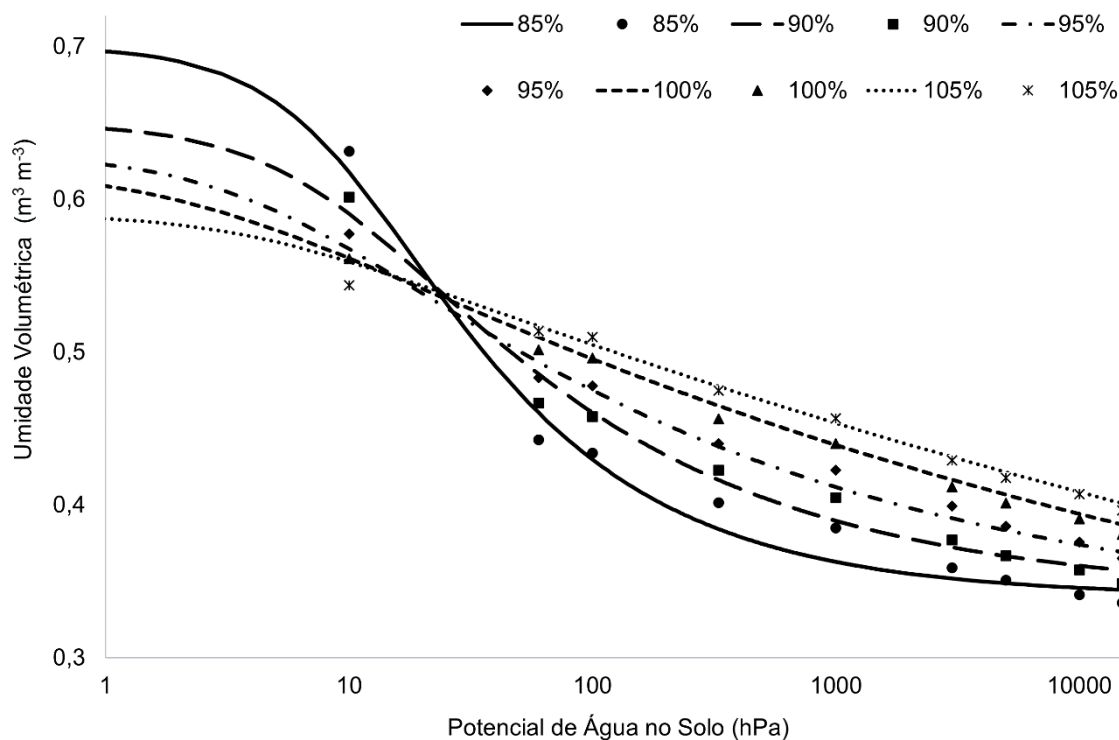
Nota: ¹Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem pelo teste Tukey a 5%. Densidade do solo (Ds); Porosidade total (PT); Macroporos (Macro); Capacidade de aeração (CA); Microporos (Micro); Capacidade de campo (CC); Ponto de murcha permanente (PMP); água disponível (AD); Condutividade Hidráulica saturada (Ks); Resistência a penetração (RP).

²Coefficiente de variação.

Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

As curvas estimadas pelo modelo de Van Genuchten (Figura 14) indicam que o aumento da densidade do solo diminuiu a porosidade total do solo, assim como a macroporosidade e a capacidade de aeração, e como consequência aumentou a retenção de água no ponto de murcha permanente (15000 hPa). Essas alterações são atribuídas à formação de poros muito pequenos devido a aproximação de partículas, o que eleva a energia de retenção de água. A principal modificação na retenção de água foi observada entre as tensões de 0 a 60 hPa, correspondentes aos poros de drenagem da água.

Figura 14 – Curvas de retenção de água para o Nitossolo Bruno nos cinco graus de compactação (GC), determinada em nove tensões, ajustadas pelo modelo de Van Genuchten.



Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

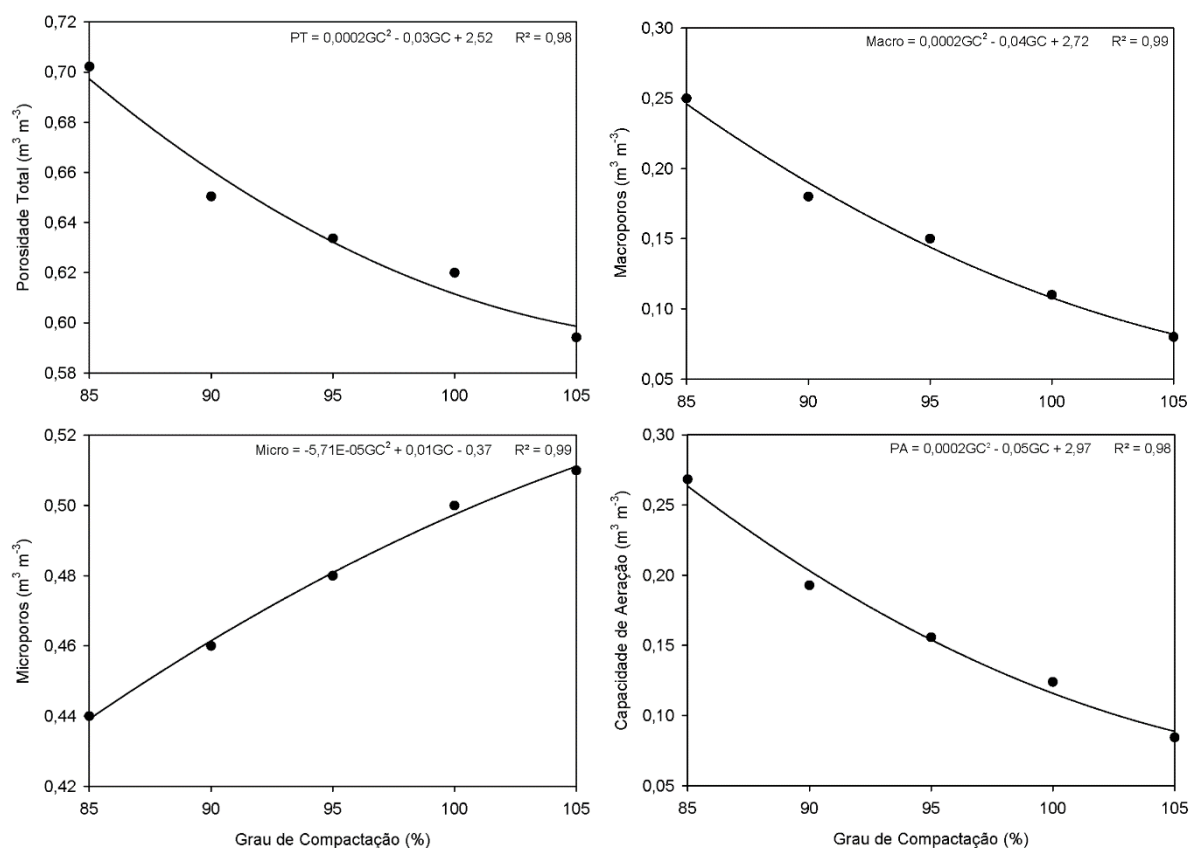
A porosidade total diminuiu com o aumento da densidade do solo e com o aumento do grau de compactação, de $0,69$ para $0,59 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ respectivamente no GC 85 e 105% (Figura 15 A), corroborando com resultados obtidos por Suzuki (2005).

Suzuki *et al.* (2007) constataram que o aumento da densidade diminui a macroporosidade, e informam que no Latossolo no GC 76%, e em um Argissolo no GC 86% a macroporosidade chegou a $0,10 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$, que segundo Xu *et al.* (2007) e Reinert e Reichert (2006) é o limite crítico, abaixo do qual o crescimento das plantas é prejudicado. No presente estudo esse limite é alcançado em GC maior que 100% (Figura 15 B).

A maior densidade de solo aumentou a microporosidade ($0,44 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ no GC 85% e $0,51 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ no GC 105%) (Figura 15 C), evidenciando que nesse Nitossolo a porosidade é constituída predominantemente por poros pequenos, sendo relatados resultados semelhantes por Ribeiro *et al.* (2007). Para a capacidade de aeração (Figura 15 D) Xu *et al.* (2007) definiram que quando a CA é menor que $0,10 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$,

as plantas começam a sofrer prejuízos. Para o Nitossolo desse estudo, esse limite crítico é alcançado a partir do GC 100%.

Figura 15 – Porosidade total (A), Macroporosidade (B), Microporosidade (C) e Capacidade de aeração (D) em função de diferentes graus de compactação do Latossolo Bruno.

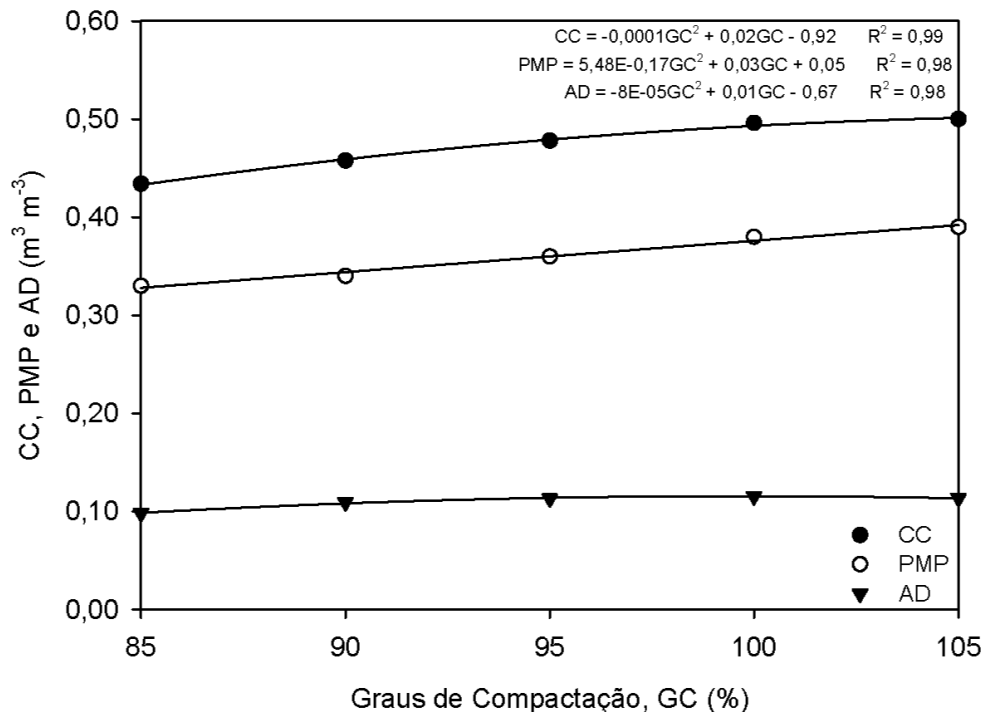


Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

A capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP) (Figura 16) aumentaram com a densidade do solo e consequentemente com o grau de compactação. A água disponível (AD) foi menor quando o solo estava menos compactado – no grau de compactação de 85% e 90% - enquanto nos GC subsequentes não houve diferença estatística (Tabela 3, Figura 16).

Existe redução da umidade volumétrica (Uv) na saturação (0 hPa) e elevação na CC e no PMP, Andoghini (2019) constatou que a água retida próximo ao ponto de saturação não significa que há maior disponibilidade de água para as plantas, pois nesta tensão a água é facilmente drenável, enquanto o aumento no PMP diminuiu a água disponível.

Figura 16 – Capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e água disponível (AD) do Nitossolo em diferentes graus de compactação.



Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

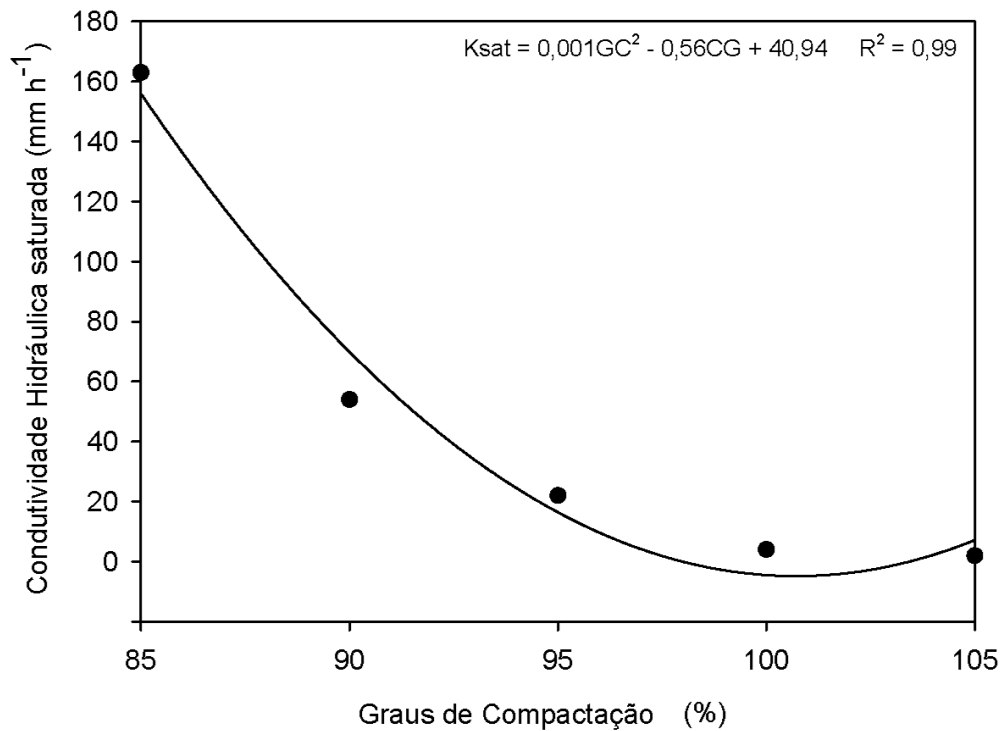
A condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) diminui com a compactação do solo de 163 para 2 mm h⁻¹ respectivamente nos GCs de 85 e 105% (Figura 17). Essa redução foi relacionada diretamente com a redução da macroporosidade, uma vez que nesses poros o fluxo da água é favorecido pela força gravitacional, corroborando o estudo de Albuquerque, Sangoi e Ender (2001)., discorreu que:

“O fluxo laminar de um fluido por um tubo capilar, que é o caso do fluxo da água no solo, é descrito pela lei de *Poiseuille*, que diz que para cada uma dada diferença de pressão hidrostática através do comprimento do tubo capilar, o volume de água fluindo por unidade de tempo será proporcional à quarta potência do seu raio. Assim a densidade de fluxo de água em um poro será proporcional à segunda potência do seu raio, e os poros com maior raio contribuem relativamente mais para o fluxo de água do que os poros de diâmetro menor” (HURTADO, 2004, p.20) .

Segundo Mesquita e Moraes (2004) a condutividade hidráulica saturada é mais dependente da estrutura do que da textura do solo. As práticas culturais que alteram a estrutura do solo influenciam diretamente a K_{sat} em maior magnitude que os processos de gênese e formação da estrutura dos solos. Inclusive, devido ao

importante efeito do diâmetro dos poros, a variabilidade de Ksat em sítios próximos pode alcançar várias ordens de grandeza.

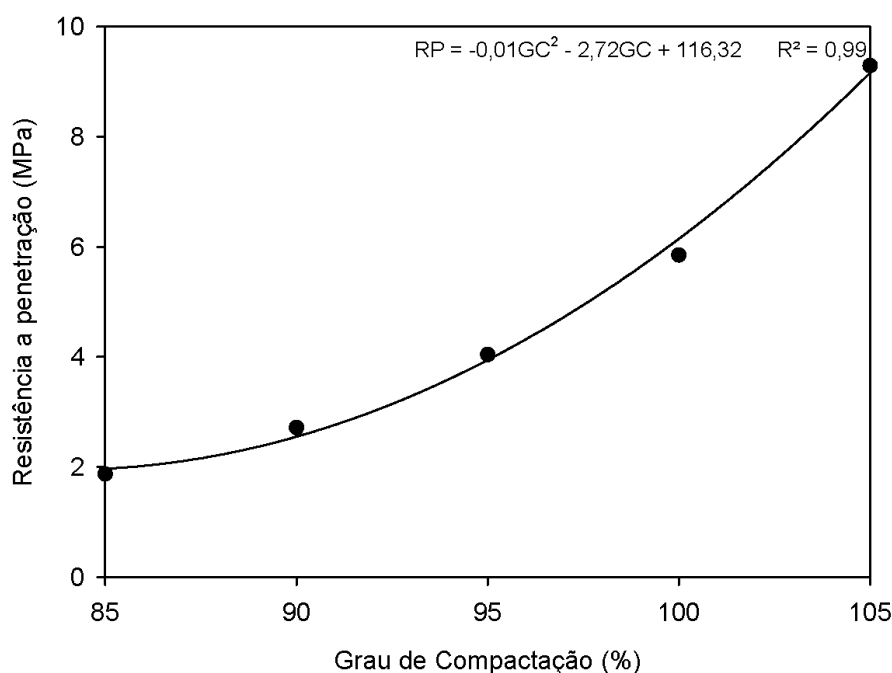
Figura 17 – Condutividade hidráulica saturada (Ksat) do Nitossolo em cinco graus de compactação (85, 90, 95, 100 e 105%).



Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

Em relação a resistência a penetração ficou confirmado que, com o aumento do grau de compactação a RP aumenta consideravelmente. Na Figura 18, é possível observar diferenças na RP, onde no GC de 85% foi de 2 MPa e em 105% foi próximo de 10 MPa. Essa variação também foi relatada por Suzuki *et al.* (2007) em um Latossolo e um Argissolo, ambos sob cultivo de soja e feijão, e por Silva *et al.* (2014), em um Latossolo Bruno aluminico típico sob cultivo de soja. Rosolem *et al.* (1999), em experimento semelhante em casa de vegetação, utilizando uma mistura de Latossolo Vermelho-Escuro álico e de um Latossolo Roxo álico, relataram que a RP de 1,3 MPa, determinada por meio de um penetrômetro de bolso, reduz em cinquenta por cento o crescimento de raízes seminais adventícias do milho.

Figura 18 – Resistência a penetração de Nitossolo em diferentes graus de compactação.



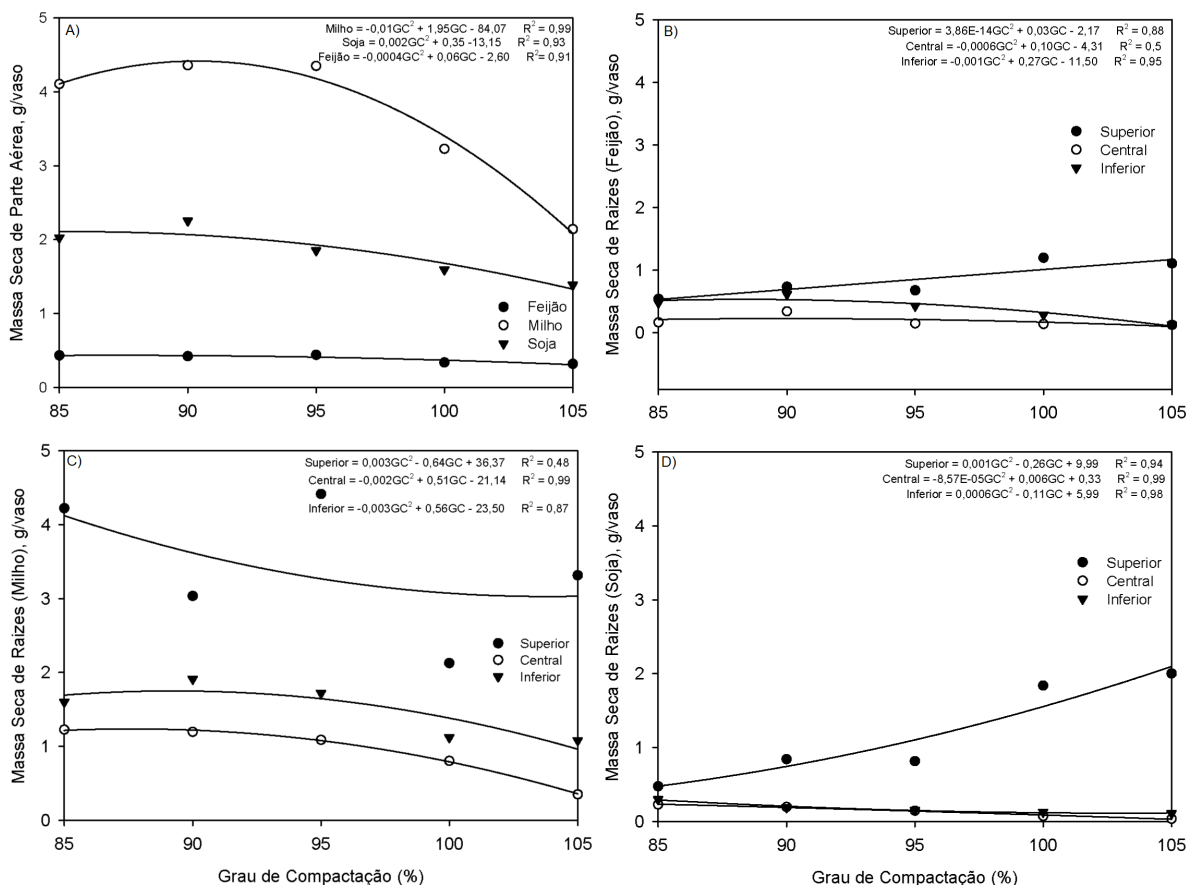
Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

4.2 AVALIAÇÕES EM CASA DE VEGETAÇÃO

A produção de massa seca da parte aérea por vaso (MSPA) diminuiu com o aumento do grau de compactação do solo (Figura 19 A), onde a partir do GC 90% (Ds $1,18 \text{ Mg m}^{-3}$) as plantas de soja e milho começaram a ter produção de MSPA diminuída enquanto para a cultura do feijoeiro essa diminuição ocorreu a partir do GC 95% (Ds $1,23 \text{ Mg m}^{-3}$). Estatisticamente, somente a cultura da soja diferiu com o GC.

Resultados semelhantes foram relatados por Silva *et al.* (2014). Kutah *et al.* (2017), em um experimento realizado em Latossolo Bruno argiloso, para a cultura da soja, enfatizaram que a partir da densidade de $1,14 \text{ Mg m}^{-3}$ as plantas começaram a perder massa seca da parte aérea. Adicionalmente, Montanari *et al.* (2010) em experimento a campo no MS, em um Latossolo Vermelho distroférico típico muito argiloso, concluíram que densidades entre $1,36$ e $1,41 \text{ Mg m}^{-3}$, diminuem a produtividade de grãos de feijão. Em experimento realizado em casa de vegetação, em Latossolo Vermelho distrófico (textura argilo-arenosa) implantado com feijão guandu anão, Farias *et al.* (2013) concluíram que a compactação diminui o desenvolvimento e a produtividade da cultura.

Figura 19 – Massa seca de parte aérea (MSPA) (A) e Massa seca de raízes (MSR) do feijão (B), milho (C) e soja (D) em função do grau de compactação do Nitossolo Bruno.



Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

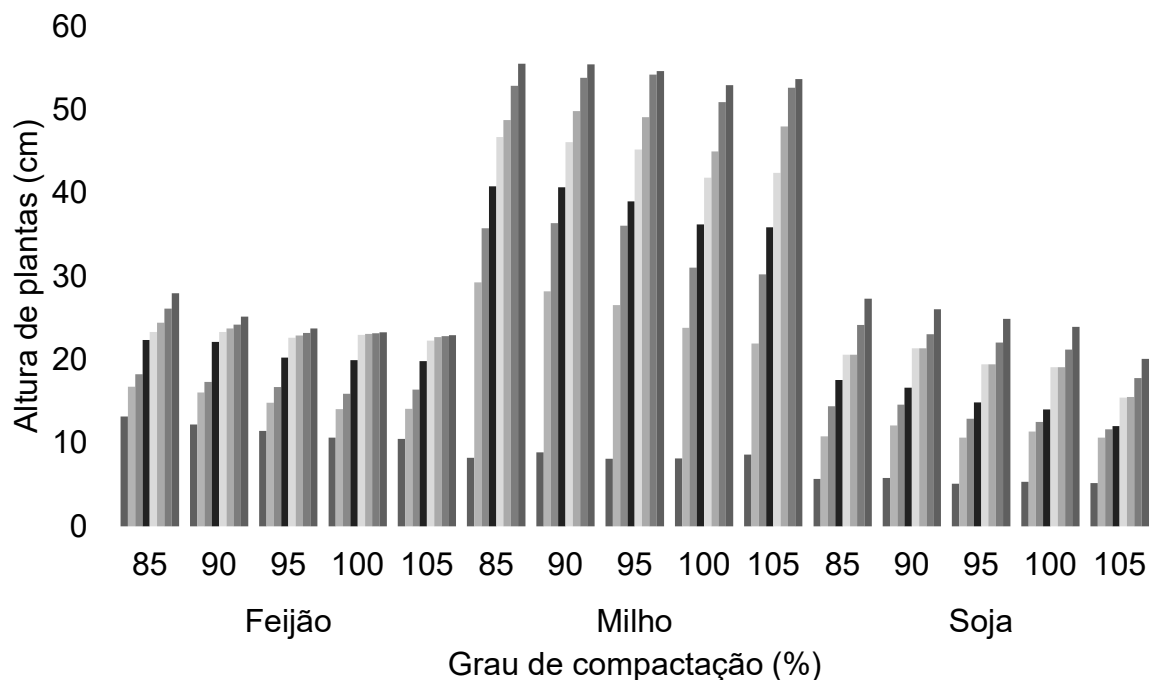
A produção de massa seca das raízes (MSR) (Figura 19 B, C e D) foi semelhante para as três culturas. Na porção superior dos anéis o GC é de 85%, e nessa camada as plantas tenderam a manter a formação normal de raízes. Com relação aos anéis centrais e inferiores, as raízes tiveram menos massa seca com o aumento da compactação, e somente para cultura da soja, foi possível constatar diferença estatística entre os valores dos anéis centrais e inferiores. Ou seja, com a compactação, as raízes cresceram menos na camada compactada (anel central) e se concentraram no anel superior que tem menor grau de compactação. Com isso, houve menor crescimento abaixo da camada compactada (anel inferior). Isso foi observado com maior intensidade nos GC de 95% a 105%.

Valadão *et al.* (2015) e Carneiro *et al.* (2018) estudaram a influência da compactação do solo na cultura do milho e concluíram que “o aumento da

densidade reduziu o desenvolvimento radicular e a produção de matéria seca total”, contrário do enfatizado por Albuquerque e Reinert (2001) de que a elevada densidade do solo e consequente resistência à penetração, não afetaram o sistema radicular do milho em Argissolo Vermelho. A MSR do feijoeiro (Figura 19 B) também diminuiu com o aumento do grau de compactação, dados que corroboraram o estudo de Collares *et al.* (2008) em um Latossolo muito argiloso, enfatizaram que o crescimento radicular e a massa da parte aérea do feijoeiro foram afetados pela compactação adicional, refletindo-se em redução da produtividade.

Para altura de plantas, foi constatado que a altura do feijão, milho e soja foi menor com o aumento do GC. Para o feijão o crescimento ficou estagnado nas últimas semanas nos maiores GC especialmente nos GC de 95% e maiores (Figura 20). Silva *et al.* (2014), relataram redução na altura de plantas da soja em densidades a partir de $0,95 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ em Latossolo Bruno.

Figura 20 - Altura de plantas de feijão, milho e soja durante as oito semanas de crescimento (barras verticais), em função dos diferentes graus de compactação (GC 85 a 105%) do Nitossolo.



Fonte: elaborado pelo autor, 2022.

Labegalini *et al.* (2016) concluíram em experimento em casa de vegetação com milho, em um Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico (textura franco argilo-arenosa), que a compactação do solo nas diferentes profundidades reduziu linearmente o crescimento das plantas, sendo que o tratamento 100% ($1,5 \text{ Mg m}^{-3}$) resultou em plantas com alturas menores (15,2 cm).

A análise de correlação de Pearson (Anexo A) mostrou correlação positiva do GC com a capacidade de campo, o ponto de murcha permanente, a resistência a penetração e a microporosidade com índices de correlação maiores que 0,90. Já as variáveis capacidade de aeração, macroporosidade, porosidade total, condutividade hidráulica saturada e o crescimento de plantas de feijão e soja tiveram correlação negativa (-0,90) em relação ao GC.

5 CONCLUSÕES

Com a elevação do grau de compactação diminui a porosidade total, a macroporosidade, a capacidade de aeração e a condutividade hidráulica saturada e aumenta a resistência à penetração, o volume de microporos, a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente. As variáveis condutividade hidráulica saturada e resistência a penetração são as mais afetadas pela compactação.

As culturas da soja e do milho tem menor massa seca da parte aérea quando o grau de compactação é de 90% (D_s 1,18 $Mg\ m^{-3}$) ou maior. A cultura do feijão tem menor massa seca da parte aérea em GC de 95% (D_s 1,23 $Mg\ m^{-3}$) ou maior.

O crescimento de raízes das três culturas é reduzido a partir do GC 95%. Com isso, as culturas concentram o crescimento das raízes na camada mais superficial do solo, menos compactada.

Há restrição no crescimento de plantas nos GC maiores que 95%.

Para as especificidades do solo, de ambiente e de culturas estudadas, os GC entre 85% e 90% são mais favoráveis às culturas. Entretanto, a partir do GC 95% são críticos, pois prejudicam o crescimento das raízes e da parte aérea das culturas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo: Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986. 10p.

ALBUQUERQUE, J. A.; MAFRA, A. L.; FONTOURA, S. M. V.; BAYER C.; PASSOS J. F. M. Avaliação de sistemas de preparo e calagem em um Latossolo Bruno aluminico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 29, p. 963-975, 2005.

ALBUQUERQUE, J. A.; REINERT, D. J. Densidade radicular do milho considerando os atributos de um solo com horizonte B textural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 25, p. 539-549, 2001.

ALBUQUERQUE, J. A.; SANGOI, L.; ENDER, M. Efeitos da integração lavoura-pecuária nas propriedades físicas do solo e características da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 25, n. 3, p. 717-723, set. 2001.

ALVARENGA, R. C.; ALBUQUERQUE FILHO, M. R. de. Manejo do solo e sistema de plantio direto. In: PEREIRA FILHO, I. A.; RODRIGUES, J. A. S. (ed.). **Sorgo**. Brasília: Embrapa Milho e Sorgo, 2015. p. 1-19.

ALVES, V. G.; ANDRADE, M. J. B. de; CORRÊA, J. B. D.; MORAES, A. R. de; SILVA, M. V. da. Concentração de macronutrientes na parte aérea do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) em função da compactação e classes de solos. **Ciência e Agrotecnologia**, [S.L.], v. 27, n. 1, p. 44-53, fev. 2003.

ANDOGNINI, J. **Efeito do grau de compactação nos atributos físicos de solos de Santa Catarina e nas características produtivas e nutritivas da aveia-preta**. 2019. 88 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Ciência do Solo, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2019.

ARSHAD, M. A.; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. Physical Tests for Monitoring Soil Quality. **SSSA Special Publications**, [S.L.], p. 123-141, jan. 1997.

ASSIS, R. L. de; LAZARINI, G. D.; LANÇAS, K. P.; CARGNELUTTI FILHO, A. Avaliação da resistência do solo à penetração em diferentes solos com a variação do teor de água. **Engenharia Agrícola**, [S.L.], v. 29, n. 4, p. 558-568, 2009.

BALBINOT JUNIOR, A. A.; MORAES, A. de; VEIGA, M. da.; PELISSARI, A.; DIECKOW, J. Integração lavoura-pecuária: intensificação de uso de áreas agrícolas. **Ciência Rural**, [S.L.], v. 39, n. 6, p. 1925-1933, 29 maio 2009.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; CENTURION, M. A. P. da. C.; SILVA, A. P. da. Efeito da compactação na produtividade de cultivares de soja em Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 30, n. 5, p. 787-794, out. 2006.

BORTOLINI, D.; ALBUQUERQUE, J. A.; RECH, C.; MAFRA, A. L.; RIBEIRO FILHO, H. M. N.; PÉRTILE, P. Propriedades físicas do solo em sistema de integração lavoura-pecuária em Cambissolo Húmico. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, [S.L.], v. 15, n. 1, p. 60-67, 10 maio 2016.

BORTOLOZZO, A. R.; SANS, L. M. A. Selamento superficial e seus efeitos na taxa de infiltração: uma revisão. **Revista Factuciência**, [S.L.], v. 1, n. 1, p. 34-41, 24 maio 2001.

CARNEIRO, K. A. A.; OLIVEIRA, F. P. de.; ARAUJO, M. C. S. P. de; FERNANDES, L. F.; ABRANTES, E. G. de.; VENDRUSCOLO, J. Influência da compactação do solo no crescimento de milho (zea mays l.) em Latossolo Vermelho-Amarelo. **Colloquium Agrariae**, [S.L.], v. 14, n. 4, p. 88-98, 1 dez. 2018.

CARTER, M. R. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. **Canadian Journal of Soil Science**, [S.L.], v. 70, n. 3, p. 425-433, 1 ago. 1990.

CASÃO JUNIOR, R.; ARAÚJO, A. G. de.; LLANILLO, R. F. **Sistema plantio direto no sul do Brasil**: fatores que promoveram a evolução do sistema e desenvolvimento de máquinas agrícolas. Londrina: FAO/lapar, 2008. 100 p.

CAVALIERI, K. M. V.; TORMENA, C. A.; VIDIGAL FILHO, P. S.; GONÇALVES, A. C. A.; COSTA, A. C. S. da. Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 30, n. 1, p. 137-147, fev. 2006.

COLLARES, G. L.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Compactação de um Latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 32, n. 3, p. 933-942, jun. 2008.

COOPER, M. **Porosidade Do Solo**. Piracicaba, 2019. Color. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/793754/mod_resource/content/1/Aula%203%20%20Estrutura%20e%20Agrega%C3%A7%C3%A3o%20do%20Solo.pdf. Acesso em: 9 ago. 2021.

CORREA, A. A. R.; TEIXEIRA, V. H.; LOPES, S. P.; OLIVEIRA, M. S. de. Avaliação das propriedades físicas e mecânicas do adobe (tijolo de terra crua). **Ciência e Agrotecnologia**, [S.L.], v. 30, n. 3, p. 503-515, jun. 2006.

COSTA, F. de S.; BAYER, C.; ALBUQUERQUE, J. A.; FONTOURA, S. M. V. Calagem e as propriedades eletroquímicas e físicas de um Latossolo em plantio direto. **Ciência Rural**, v. 34, p. 281-284, 2004.

CQFS- RS/SC. COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO. Manual de calagem e adubação os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. 11.ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Núcleo Regional Sul. 2016. 376p.

CUNHA, J. P. A. R. da.; CASCÃO, V. N.; REIS, E. F. dos. Compactação causada pelo tráfego de trator em diferentes manejos de solo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, [S.L.], v. 31, n. 3, p. 371-375, 25 jun. 2009.

DIAS JUNIOR, M. S.; ESTANISLAU, W. T. Grau de compactação e retenção de água de Latossolos submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 23, n. 1, p. 45-51, mar. 1999.

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 20, n. 2, p. 175-182, 1996.

DOURADO-NETO, D.; NIELSEN, D. R.; HOPMANS, J. W.; REICHARDT, K.; BACCHI, O. O. S. Software to model soil water retention curves (SWRC, version 2.00). **Scientia Agricola**, [S.L.], v. 57, n. 1, p. 191-192, mar. 2000.

EDWARDS, W.M.; SHIPITALO, M.J.; OWENS, L.B.; NORTON, L.D. Effect of *Lumbricus terrestris* L. burrows on hydrology of continuous no-till corn fields. **Geoderma**, v. 46, n. 1-3, p. 73-84, 1990.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 370p.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Pecuária mais eficiente pouparia atmosfera de 30 milhões de toneladas de CO₂ por ano**. Disponível em: <<http://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/7545578/pecuariamais-eficiente-pouparia-atmosfera-de-30-milhoesde-toneladas-de-co2-por-ano>>. Acesso em: 25 de abr. 2021.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Serviço Nacional de Levantamento e Classificação dos Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2. ed. Rio de jan. 1997. 212 p.

FARIAS, L. do N.; BONFIM-SILVA, E. M.; PIETRO-SOUZA, W.; VILARINHO, M. K. C.; SILVA, T. J. A. da.; GUIMARÃES, S. L. Características morfológicas e produtivas de feijão guandu anão cultivado em solo compactado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S.L.], v. 17, n. 5, p. 497-503, maio 2013.

FLORES, C. A., REINERT, D. J., REICHERT, J. M., ALBUQUERQUE, J. A., PAULETTO, E. A. Recuperação da qualidade estrutural, pelo sistema plantio direto, de um Argissolo Vermelho. **Ciência Rural**. v. 38, p. 2164-2172, 2008.

FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F.; DUARTE, A. P.; LEONEL, C. L. Compactação do solo e produção de cultivares de milho em Latossolo Vermelho: i - características de planta, solo e índice s. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 33, n. 4, p. 793-803, ago. 2009.

GOEDERT, W. J.; SCHERMACK, M. J.; FREITAS, F. C. de. Estado de compactação do solo em áreas cultivadas no sistema de plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [S.L.], v. 37, n. 2, p. 223-227, fev. 2002.

GONÇALVES, A. D. M. A.; LIBARDI, P. L. Análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 37, n. 5, p. 1174-1184, out. 2013.

GUBIANI, P. I.; ALBUQUERQUE, J. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Tensão e extração de água em mesa de tensão e coluna de areia, em dois solos com elevada densidade. **Ciência Rural**, [S.L.], v. 39, n. 8, p. 2535-2538, 9 out. 2009.

GUBIANI, P. I.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Valores críticos de densidade do solo avaliados por condições de contorno. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 44, n. 6, p. 994-1000, jun. 2014.

GUIMARÃES, C. M.; STONE, L. F.; MOREIRA, J. A. A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro: efeito sobre o desenvolvimento radicular e da parte aérea. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S.L.], v. 6, n. 2, p. 213-218, 2002.

HAKANSSON, Inge. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. **Soil Tillage Res**, [S.L.], v. 16, p. 105-120, 1990.

HAN, E. KAUTZ, T.; PERKONS, U.; UTEAU, D.; PETH, S.; HUANG, N.; HORN, R.; KÖPKE, U. Root growth dynamics inside and outside of soil biopores as affected by crop sequence determined with the profile wall method. **Biology And Fertility of Soils**, [S.L.], v. 51, n. 7, p. 847-856, 27 jun. 2015.

HILLEL, D. **Environmental Soil Physics**: fundamentals, applications, and environmental considerations. San Diego: Academic Press, 1998. 800 p.

HILLEL, D. **Fundamentals of Soil Physics**. Massachusetts: Academic Press, 1980. 413 p

HILLEL, D. **Introduction to Soil Physics**. Massachusetts: Academic Press, 1982. 367 p

HILLEL, D. **Soil and water**: physical principles and processes. 3. ed. New York: Academic Press, 1972. 288 p.

HURTADO, A. L. B. **Variabilidade da condutividade hidráulica do solo em valores fixos de umidade e de potencial matricial**. 2004. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, USP, Piracicaba, 2004.

JONG VAN LIER, Q. (ed.). **Física do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. 298 p.

KAISER, D. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; COLLARES, G. L.; KUNZ, M. Intervalo hídrico ótimo no perfil explorado pelas raízes de feijoeiro em um Latossolo sob diferentes níveis de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 33, n. 4, p. 845-855, ago. 2009.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia**: relações solo-planta. São Paulo: Ceres, 1979. 262 p.

KLEIN, V. A. Densidade relativa - um indicador da qualidade física de um Latossolo Vermelho. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 5, n. 1, p. 26-32, 2006

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Condutividade hidráulica de um Latossolo Roxo, não saturado, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 32, n. 6, p. 945-953, 2002.

KUTAH, B. F.; BARBOSA, F. T. Efeito da compactação de diferentes solos sobre o desenvolvimento inicial da soja. In: XXVI ENCONTRO ANUAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 26., 2017, Ponta Grossa. **Seminário**. Ponta Grossa: Ufpg, 2017. p. 1-4.

LANZANOVA, M. E.; NICOLOSO, R. da. 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**, [S.L.], v. 31, n. 5, p. 1131-1140, out. 2007.

LEBERT, M.; HORN, R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. **Soil And Tillage Research**, [S.L.], v. 19, n. 2-3, p. 275-286, fev. 1991.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. *Advances in Soil Science*, v.1, p.277-294. 1985.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da Água no Solo**. 2. ed. São Paulo: Edusp, 2012. 352 p.

LIMA, C. L. R.; SILVA, A. P.; IMHOFF, S.; LEÃO, T. P. Compressibilidade de um solo sob sistemas de pastejo rotacionado intensivo irrigado e não irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, n.6, p.945-951, 2004.

LIPIEC, J.; HAKANSSON, I; TARKIEWICZ, S.; KOSSOWSKI, J. Soil physical properties and growth of spring barley related to the degree of compactness of two soils. **Soil & Tillage Research**, v.19, p.307-317, 1991.

LUCIANO, R. V.; ALBUQUERQUE, J. A.; COSTA, A. da.; BATISTELLA, B.; WARMLING, M. T. Atributos físicos relacionados à compactação de solos sob vegetação nativa em região de altitude no Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 36, n. 6, p. 1733-1744, dez. 2012.

LUXMOORE, R. J. Micro, Meso and Macroporosity of Soil. **Soil Science Society of America Journal**, [S.L.], v. 45, n. 3, p. 671-672, maio. 1981.

MAFRA, M. S. H.; CASSOL, P. C.; ALBUQUERQUE, J. A.; CORREA, J. C.; GROHSKOPF, M.A. Acúmulo de carbono em Latossolo adubado com dejetos líquidos de suínos e cultivado em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, p. 630-638, 2014.

MARIA, I. C.; CASTRO, O. M.; SOUZA DIAS, H. Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em Latossolo roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, n.3, p.703-709, 1999.

MAZURANA, M.; FINK, J. R.; SILVEIRA, V. H. da.; LEVIEN, R.; ZULPO, L.; BREZOLIN, D. Propriedades físicas do solo e crescimento de raízes de milho em um Argissolo Vermelho sob tráfego controlado de máquinas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 37, n. 5, p. 1185-1195, out. 2013.

MEDEIROS, R. D. de.; SOARES, A. A.; GUIMARÃES, R. M. Compactação do solo e manejo da água. I: efeitos sobre a absorção de N, P, K, massa seca de raízes e parte aérea de plantas de arroz. **Ciência e Agrotecnologia**, [S.L.], v. 29, n. 5, p. 940-947, out. 2005.

MESQUITA, M. da G. B. de F.; MORAES, S. O. The dependence of the saturated hydraulic conductivity on physical soil properties. **Ciência Rural**, 34, 963–969, 2004.

MONTANARI, R.; CARVALHO, M. de P. e; ANDREOTTI, M.; DALCHIAVON, F. C.; LOVERA, L. H.; HONORATO, M. A. de O. Aspectos da produtividade do feijão correlacionados com atributos físicos do solo sob elevado nível tecnológico de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 34, n. 6, p. 1811-1822, dez. 2010.

MÜLLER, F. C. (Ed.). **Uso, Manejo e Conservação do Solo**. Porto Alegre: Grupo A, 2021. E-book. ISBN 9786556902715

NUNES, E. P. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE. Censo Agropecuário 2006.

OHU, J. O.; AYOTAMUNO, M. B.; FOLORUNSO, O. A. Compaction characteristics of prominent agricultural soils in Borno State of Nigeria. **Transactions Of The Asae**, [S.L.], v. 30, n. 6, p. 1575-1577, 1987. Disponível em: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=30604>. Acesso em: 28 set. 2021.

OLIVEIRA FILHO, F. X.; MIRANDA, N. O.; MEDEIROS, J. F.; SILVA, P. C. M.; MESQUITA, F. O.; COSTA, T. K. G. Zona de manejo para preparo do solo na cultura da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S.L.], v. 19, n. 2, p. 186-193, fev. 2015.

OLIVEIRA, V.S.; ROLIM, M. M.; VASCONCELOS, R. F. B.; PEDROSA, E. M. R. Distribuição de agregados e carbono orgânico em um Argissolo Amarelo distrocoeso em diferentes manejos. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, v.14, p. 907–913, 2010.

PEDROTTI, A.; PAULETTO, R. S.; CRESTANA, S.; FERREIRA, M. M.; DIAS JUNIOR, M. S.; GOMES, A. S.; TURATTI, A. L. Resistência mecânica à penetração de um Planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 25, n. 3, p. 521-529, set. 2001.

- PORTUGAL, N. R. N. **Compactação do solo por atividades agropecuárias**. 2016. 31 f. Monografia (Especialização) - Curso de Graduação em Tecnologia em Gestão Ambiental, A Faculdade de Educação e Meio Ambiente, Ariqueles, 2016.
- RAGHAVAN, G. S. V.; ALVO, P.; MCKYES, E. Soil Compaction in Agriculture: a view toward managing the problem. **Advances In Soil Science**, [S.L.], p. 1-36, fev. 1990.
- RAIJ, B. Van. **Análise química para a fertilidade de solos tropicais**. Campinas, Instituto Agrônômico, p. 285. 2001.
- REICHARDT, K. A água em sistemas agrícolas. São Paulo: Manole, 1990. 188p.
- REICHERT, J. M.; ALBUQUERQUE, J. A.; PERAZA, J. E. S.; COSTA, A. Estimating water retention and availability in cultivated soils of southern Brazil. **Geoderma Regional**, v. 21, e00277, 2020.
- REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; SUZUKI, L. E. A. S.; HORN, R. Mecânica do solo. In: JONG VAN LIER, Q. (ed.). **Física do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. 298p.
- REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J.; HORN, R.; HAKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**, [S.L.], v. 102, n. 2, p. 242-254, mar. 2009.
- REINERT, D. J.; ALBUQUERQUE, J. A.; REICHERT, J. M.; AITA, C.; ANDRADA, M. M. C. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 32, n. 5, p. 1805-1816, out. 2008.
- REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Propriedades físicas do solo. Santa Maria: **Universidade Federal de Santa Maria**, 2006. 18p.
- RIBEIRO, K. D.; MENEZES, S. M.; MESQUISTA, M. G. B. F.; SAMPAIO, F. M. T. S. Propriedades físicas do solo, influenciadas pela distribuição de poros, de seis classes de solos da região de Lavras-MG. **Ciência e Agrotecnologia**, [S.L.], v. 31, n. 4, p. 1167-1175, ago. 2007.
- RICHARDS, L. A. Physical conditions of water in soil. In: BLACK, C. A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society for Testing and Materials, 1965. p. 128-152.
- RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; RODRIGUES BRITO, O.; FUENTES LLANILLO, R.; FERREIRA, R. Compactação do solo: causas e efeitos. **Semina: Ciências Agrárias**, [S.L.], v. 26, n. 3, p. 321, 30 jun. 2005.
- RODRIGUES, R. A. R.; PUGAS, J. O Sistema Plantio Direto (SPD) e a conservação do solo. **Embrapa Solos-Capítulo em livro científico (ALICE)**, 2021.

ROSA, H. A.; GROMOWSKI JUNIOR, G.; RESENDE, J. D. Influência da compactação do solo em parâmetros produtivos da cultura da soja. **Revista Técnico-Científica do CREA-PR**, Curitiba, v. [S.L.], n. [S.L.], p. 1-7, mar. 2009.

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

ROSOLEM, C.A; FOLONI, J.S.S; TIRITAN, C.S. Root growth and nutrient accumulation in cover crops as affected by soil compaction. **Soil And Tillage Research**, [S.L.], v. 65, n. 1, p. 109-115, abr. 2002.

SANTOS, G. A.; DIAS JUNIOR, M. S.; GUIMARÃES, P. T. G.; FURTINI NETO, A. E. Diferentes graus de compactação e fornecimento de fósforo influenciando no crescimento de plantas de milho (*Zea mays* L.) cultivadas em solos distintos. **Ciência e Agrotecnologia**, [S.L.], v. 29, n. 4, p. 740-752, ago. 2005.

SAUNDERS, L. C. U. **Métodos de determinação e variabilidade espacial da condutividade hidráulica sob condições de campo**. 1978. 81 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Solos, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1978. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/111140/tde-20200111-125541/publico/SaundersLuisCarlosUchoa.pdf>. Acesso em: 04 nov. 2022.

SCHAEFER, C. E. R.; SILVA, D. D.; PAIVA, K. W. N.; PRUSKI, F. F.; ALBUQUERQUE FILHO, M. R.; ALBUQUERQUE, M. A. Perdas de solo, nutrientes, matéria orgânica e efeitos microestruturais em Argissolo Vermelho-Amarelo sob chuva simulada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [S.L.], v. 37, n. 5, p. 669-678, maio 2002.

SECCO, D. **Estados de Compactação e suas implicações no comportamento mecânico e na produtividade de culturas em dois Latossolos sob plantio direto**. 2003. 128 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

SILVA FILHO, E. P.; COTTAS, L. R.; MARINI, G. B. S. Avaliação da compactação dos solos em áreas de pastagens e florestas em Porto Velho-Rondônia. **Boletim de Geografia**, [S.L.], v. 28, n. 1, p. 145-155, 24 set. 2010.

SILVA, Á. P.; LIBARDI, P. L. Influência da compactação nas propriedades físicas de dois Latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 10:91-95, 1986.

SILVA, C. L.; KATO, E. Efeito do selamento superficial na condutividade hidráulica saturada da superfície de um solo sob Cerrado. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, v. 32, n. 2, p. 213-220, fev. 1997

SILVA, F. R.; ALBUQUERQUE, J. A.; COSTA, A. Crescimento inicial da cultura da soja em Latossolo Bruno com diferentes graus de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 38, n. 6, p. 1731-1739, dez. 2014.

SILVA, F. R.; ALBUQUERQUE, J. A.; COSTA, A.; FONTOURA, S. M. V.; BAYER, C. WARMLING, M. I. Physical properties of a Hapludox after three decades under different soil management systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, p. 1-14, e0140331.

SILVA, G. L. S. (Ed.). Uma análise sobre os impactos dos rebanhos sobre o solo nas pastagens naturais. **Pubvet**, Londrina, v. 8, n. 11, p. 1283-1415, jun. 2014.

SILVA, G. J.; MAIA, J. C. de S.; BIANCHINI, A. Crescimento da parte aérea de plantas cultivadas em vaso, submetidas à irrigação subsuperficial e a diferentes graus de compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 30, n. 1, p. 31-40, fev. 2006.

SILVA, R. B.; DIAS JUNIOR, M. S.; SILVA, F. A. M.; FOLE, S. M. O tráfego de máquinas agrícolas e as propriedades físicas, hídricas e mecânicas de um Latossolo dos Cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 27, n. 6, p. 973-983, dez. 2003.

SILVA, R. H.; ROSOLEM, C.A. Crescimento radicular de espécies utilizadas como cobertura decorrente da compactação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 25, n. 2, p. 253-260, jun. 2001.

SOUZA, V. **Gente do campo**: conheça a trajetória de Herbert Bartz, 'pai' do plantio direto no Brasil. 2021. Disponível em: <https://g1.globo.com/economia/agronegocios/agro-a-industria-riqueza-do-brasil/noticia/2021/02/23/gente-do-campo-conheca-a-trajetoria-de-herbert-bartz-pai-do-plantio-direto-no-brasil.ghtml>. Acesso em: 19 out. 2022.

SPLIETHOFF, J.; POTT, C. A.; RAMPIM, L.; WATZLAWICK, L. F.; JADOSKI, S. O. Soil compaction limits for Ilex paraguariensis. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 9, n. 5, p. e23953101, 2020.

SUZUKI, L. E. A. S. **Compactação do solo e sua influência nas propriedades físicas do solo e crescimento e rendimento de culturas**. 2005. 151 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

SUZUKI, L. E. A. S.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; LIMA, C. L. R. de. Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [S.L.], v. 42, n. 8, p. 1159-1167, ago. 2007.

STRECK, C. A. **Compactação do solo e seus efeitos no desenvolvimento radicular da cultura do feijoeiro e da soja**. 2003. 83 p. dissertação (Mestrado). Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria.

TANIMOTO, K. A Method of Estimating the Degree of Compaction of Sandy Soils. **Soils And Foundations**, [S.L.], v. 5, n. 1, p. 55-66, 1964.

TAVARES FILHO, J.; TESSIER, D. Compressibility of Oxisol aggregates under no-till in response to soil water potential. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 33, n. 6, p. 1525-1533, dez. 2009.

TELES, J. S. **Desenvolvimento do jiggs em diferentes graus de compactação em solos de Santa Catarina**. 2019. 78 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Ciência do Solo, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2019.

TAYLOR, H. M. *et al.* Soil strength-root penetration relations for medium- to coarse-textured soil materials. **Soil Science**, v.102, p.18-22, 1966.

TOGNON, A. A. **Propriedades físico-hídricas do Latossolo Roxo da região de Guairá-SP sob diferentes sistemas de cultivo**. 1991. 81 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Agronomia, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1991.

VALADÃO, F. C. de A. *et al.* Adubação fosfatada e compactação do solo: sistema radicular da soja e do milho e atributos físicos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 39, n. 1, p. 243-255, fev. 2015.

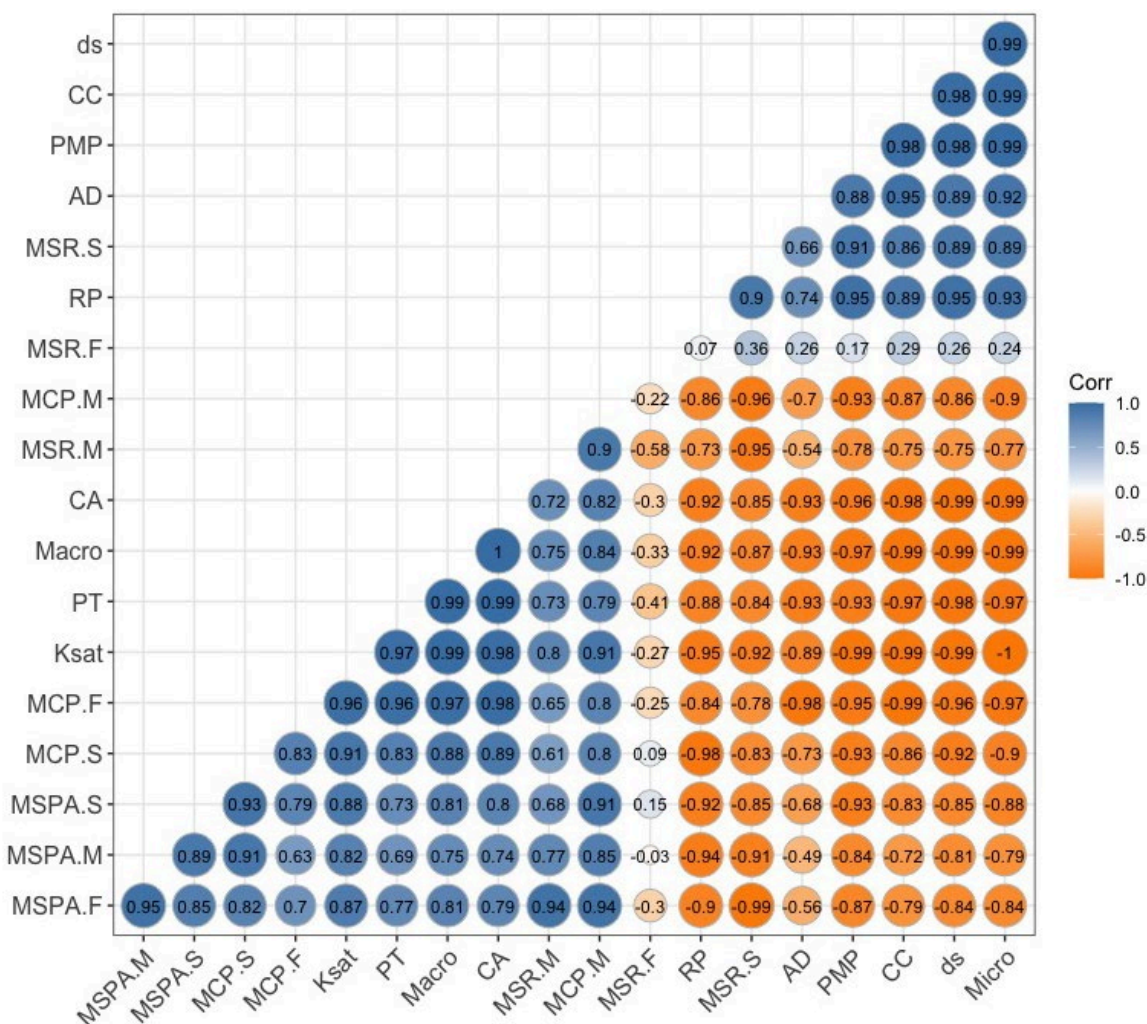
VALLE, D. **Plantio Direto: A tecnologia que revolucionou a agricultura brasileira/ coordenação**. editorial: Paulino Motter, Herlon Goelzer de Almeida; edição e textos Dimitri Valle; consultor técnico: Ivo Mello – Foz do Iguaçu: Parque Itaipu, 2015.

VILLAZON-GOMEZ, J. A. *et al.* Resistance to penetration in a Chromic Vertisol with natural pasture. **Pastos y Forrajes**, v. 41, n. 3, 2018.

VOSVIEWER: Visualizing scientific landscapes. Visualizing scientific landscapes. 2021

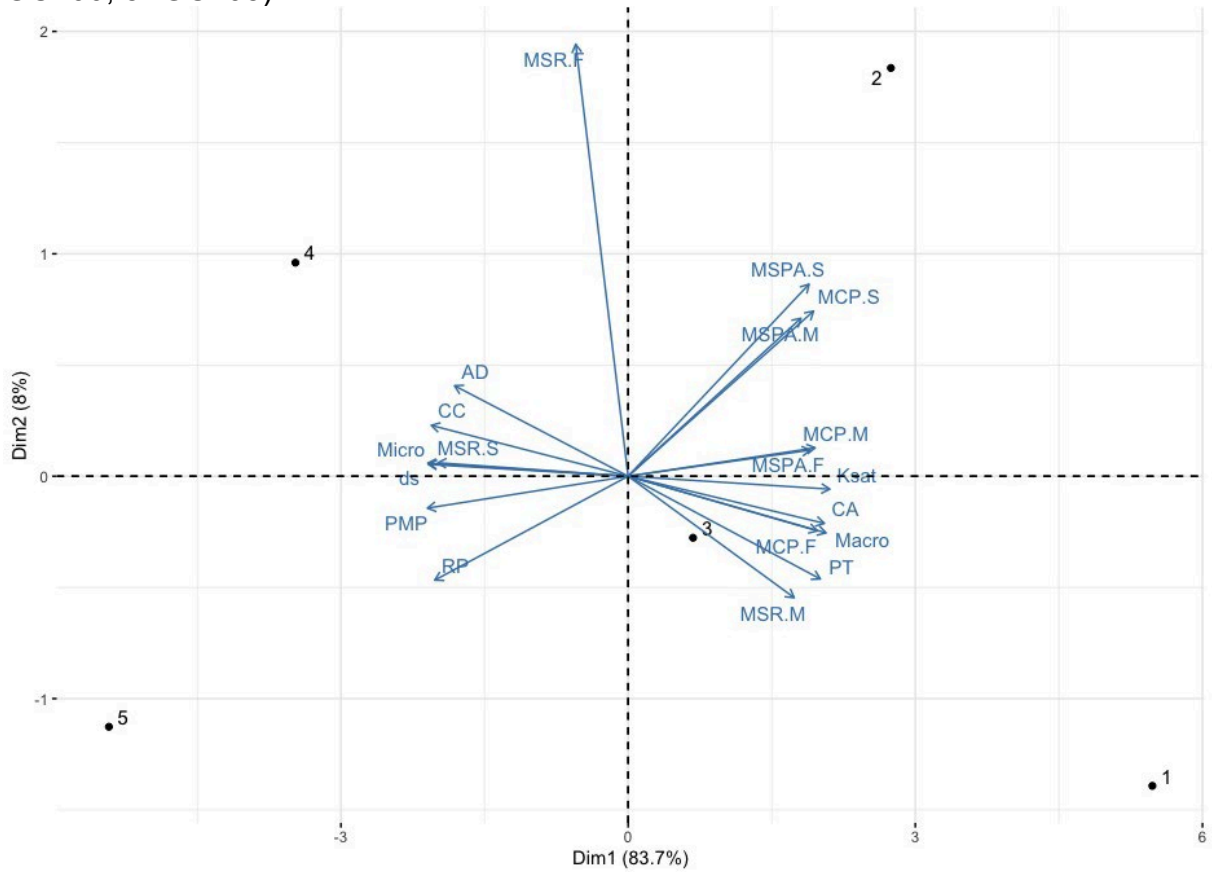
ANEXOS

ANEXO A – Análise de correlação de Pearson, onde a cor azul indica que as variáveis que estão positivamente correlacionadas, enquanto círculos em laranja indicam as variáveis que estão negativamente correlacionadas entre si.



Nota: Densidade do solo (Ds); Porosidade total (PT); Macroporos (Macro); Capacidade de aeração (CA); Microporos (Micro); Capacidade de campo (CC); Ponto de murcha permanente (PMP); água disponível (AD); Condutividade Hidráulica saturada (Ks); Resistência a penetração (RP); Massa seca de parte aérea para feijão, milho e soja (MSPA F, M e S); Massa seca de raízes para feijão, milho e soja (MSR F, M e S) e Média de crescimento de plantas de feijão, milho e soja (MCP F, M e S).

ANEXO B – Análise de componentes principais dos atributos do solo e da cultura em função dos graus de compactação do Nitossolo (1- GC85; 2- GC90; 3- GC95; 4- GC100; 5- GC105).



ANEXO C – Evapotranspiração das culturas do feijão, milho e soja, medida a cada três dias ao longo de sessenta dias, em função de diferentes graus de compactação do Nitossolo.

