

UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL
CAMPUS CERRO LARGO
CURSO DE AGRONOMIA

JUNIOR KOPP

**INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO (IHO) DO SOLO EM ÁREA SOB SISTEMA DE
PLANTIO DIRETO CONSOLIDADO**

CERRO LARGO
2023

JUNIOR KOPP

**INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO (IHO) DO SOLO EM ÁREA SOB SISTEMA DE
PLANTIO DIRETO CONSOLIDADO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Agronomia da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), como requisito para obtenção do título de Bacharel em Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. Douglas Rodrigo Kaiser

CERRO LARGO

2023

Bibliotecas da Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS

Kopp, Junior

Intervalo hídrico ótimo (IHO) do solo em área sob sistema de plantio direto consolidado / Junior Kopp. -- 2023.

59 f.:il.

Orientador: Doutor em Ciência do Solo Douglas Rodrigo Kaiser

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal da Fronteira Sul, Curso de Bacharelado em Agronomia, Cerro Largo, RS, 2023.

1. Qualidade física do solo. 2. Propriedades físicas do solo. 3. Plantio direto. 4. Intervalo hídrico ótimo (IHO). I. Kaiser, Douglas Rodrigo, orient. II. Universidade Federal da Fronteira Sul. III. Título.

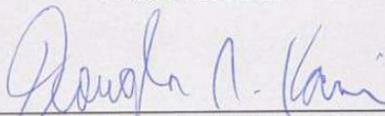
JUNIOR KOPP

INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO (IHO) DO SOLO EM ÁREA SOB SISTEMA DE
PLANTIO DIRETO CONSOLIDADO

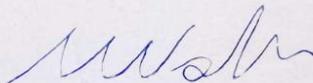
Trabalho apresentado ao curso de
Graduação em da Universidade Federal da
Fronteira Sul (UFFS) como requisito parcial
para obtenção do título Bacharel em
Agronomia.

Este trabalho foi defendido e aprovado pela banca em 14/02/2023.

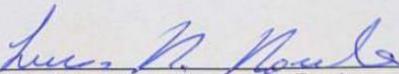
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Douglas Rodrigo Kaiser – UFFS
Orientador



Prof. Dr. Mario Sergio Wolski – UFFS
Avaliador



Eng. Agr. Ms. Lucas Raimundo Rauber – UFSM
Avaliador

Dedico este trabalho a Deus, aos meus
pais Adelaide e Ademar, avó Irma, minha
irmã Andréia e minha namorada
Fernanda.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus pela vida e pela saúde.

A minha família e namorada, que não mediram esforços para me auxiliar ao longo da minha trajetória acadêmica e abdicaram de muitas coisas para tornar possível a minha graduação em Agronomia, sou muito grato por todo apoio e suporte.

À Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS) pela oportunidade, por toda estrutura e suporte fornecidos que possibilitaram a minha formação acadêmica e profissional.

Ao professor e orientador Douglas Rodrigo Kaiser por todos os ensinamentos, apoio e conhecimentos transmitidos durante a minha jornada acadêmica. Pela dedicação e orientações durante a graduação que possibilitaram a realização deste trabalho.

A todos os professores e profissionais aqui não citados que contribuíram para a minha formação acadêmica e construção de conhecimento.

A todos os colegas pela convivência e companheirismo, e aos que de alguma forma contribuíram para o meu crescimento.

Meu muito obrigado a todos, que Deus ilumine a vida de cada um. Até aqui me ajudou o Senhor!

RESUMO

A qualidade física do solo em áreas sob Sistema de Plantio Direto (SPD) é determinante para o sucesso e viabilidade do sistema a longo prazo. Apesar de todos os benefícios já comprovados, têm se observado problemas físicos em diversas áreas que são manejadas sob SPD, provocando preocupações em relação à qualidade física dessas áreas e possível degradação estrutural, principalmente em solos argilosos. Os principais atributos físicos do solo que afetam diretamente o crescimento das plantas são: a disponibilidade de água, aeração e a resistência mecânica do solo à penetração das raízes. O Intervalo hídrico ótimo (IHO) do solo é um indicador de qualidade física do solo que integra os principais parâmetros físicos que afetam o desenvolvimento das plantas, ele corresponde à faixa de água disponível do solo em que não ocorrem restrições por aeração (PA) e nem pela resistência do solo à penetração das raízes (RP), sendo mínimas as limitações impostas ao crescimento das plantas. O objetivo desse trabalho foi determinar o IHO do solo em uma área com Latossolo Vermelho de textura argilosa e manejada sob SPD há mais de 20 anos. Foram coletadas 90 amostras de solo com estrutura preservada, para obter a Densidade do solo (D_s), a umidade volumétrica, resistência à penetração (RP) e determinar o IHO. As amostras foram divididas em 5 grupos com 18 anéis, sendo 9 para a profundidade de 0-10 e 9 para a profundidade de 10-20. Os 5 grupos foram distribuídos na área com o objetivo de gerar variabilidade de D_s . Essa variabilidade foi obtida amostrando locais desde onde ocorre maior tráfego de máquinas até locais que apresentam melhor qualidade estrutural e maior produtividade das culturas. No laboratório foram determinadas as curvas de retenção de água e RP, além da D_s . Para determinar o IHO foram considerados os limites críticos de RP de 2 e 3 MPa. O GC foi determinado pela razão entre a D_s obtida nas amostras e a D_{smax} utilizada para solos com as características da área estudada. Utilizando o valor de 2 MPa como limite de RP, o momento em que o IHO foi nulo e se obteve a D_{sc} , foi na D_s de $1,31 \text{ Mg m}^{-3}$ apresentando GC de 86%, valor considerado baixo para impor limitações às plantas. No limite de 2 MPa, 26,4% das amostras apresentaram $D_s > D_{sc}$, nesses locais as plantas podem encontrar limitações com maior frequência. Para o limite de 3 MPa, a D_{sc} obtida foi de $1,49 \text{ Mg m}^{-3}$ com GC de 97%, nessas condições apenas 5,74% das amostras apresentaram $D_s > D_{sc}$. O limite de 3 MPa foi mais adequado

para determinar as restrições para essas condições de solo. A RP foi a principal limitante do IHO nos dois limites considerados, sendo altamente sensível ao aumento da Ds. O IHO mostrou ser uma ferramenta mais sensível que a AD para determinar as limitações sofridas pelas plantas, sendo mais adequado para avaliar a qualidade física do solo.

Palavras-chave: Qualidade física do solo; Plantio direto; Propriedades físicas do solo; Resistência do solo à penetração.

ABSTRACT

The physical quality of the soil in areas under no-tillage system is crucial for the long-term success and viability of the system. Despite all the benefits already proven, physical problems have been observed in several areas that are managed under NTS, causing concerns regarding the physical quality of these areas and possible structural degradation, mainly in clayey soils. The main physical soil attributes that directly affect plant growth are: water availability, aeration and soil mechanical resistance to root penetration. The Least Limiting Water Range (LLWR) of the soil is an indicator of soil physical quality that integrates the main physical parameters that affect plant development, it corresponds to the range of available soil water in which there are no restrictions by aeration (AP) and nor by soil resistance to root penetration (RP), with minimal limitations imposed on plant growth. The objective of this work was to determine the soil LLWR in an area with an Oxisol under NTS for over 20 years. Ninety samples of soil with preserved structure were collected to obtain the soil density (D_s), volumetric soil moisture, soil penetration resistance and determine the LLWR. The samples were divided into 5 groups with 18 rings, 9 for the depth of 0-10 and 9 for the depth of 10-20. The 5 groups were distributed in the area in order to generate variability of D_s . This variability was obtained by sampling locations from where there is greater machine traffic to locations with better structural quality and higher crop productivity. In the laboratory, water retention and RP curves were determined, in addition to D_s . To determine the LLWR, the RP critical limits of 2 and 3 MPa were considered. The DC was determined by the ratio between the D_s obtained in the samples and the D_{smax} used for soils with the characteristics of the studied area. Using the value of 2 MPa as the RP limit, the moment when the LLWR was null and the D_{sc} was obtained was at the D_s of 1.31 Mg m^{-3} , presenting a GC of 86%, a value considered low to impose limitations on the plants. At the limit of 2 MPa, 26.4% of the samples presented $D_s > D_{sc}$, in these places the plants can find limitations more frequently. For the limit of 3 MPa, the D_{sc} obtained was 1.49 Mg m^{-3} with GC of 97%, under these conditions only 5.74% of the samples presented $D_s > D_{sc}$. The 3 MPa limit was more adequate to determine restrictions for these soil conditions. The RP was the main limiting factor of the LLWR in the two limits considered, being highly sensitive to the increase in D_s . The

LLWR proved to be a more sensitive tool than the AD to determine the limitations suffered by the plants, being more adequate to evaluate the physical quality of the soil.

Keywords: Soil physical quality; No-tillage; Soil physical properties; Soil penetration resistance.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Coletor de Uhland e anéis.....	31
Figura 2 - Fluxograma das coletas a campo.	32
Figura 3 - Coleta das amostras com o coletor de Uhland	32
Figura 4 - Coleta das amostras	33
Figura 5 - Retirada dos anéis	33
Figura 6 - Amostras dentro dos potes	34
Figura 7- Fluxograma de divisão das amostras em laboratório.....	34
Figura 8 - Preparação das amostras em laboratório	35
Figura 9 - Amostras preparadas separadas por grupos	35
Figura 10 - Estufa de ar forçado.....	36
Figura 11 - Balança de precisão.....	37
Figura 12 - Mesa de tensão.....	38
Figura 13 - Câmara de Richards	39
Figura 14 - Penetrômetro automático Falker.....	39
Figura 15 - Avaliações de RP em laboratório.....	41
Figura 16 – Amostras de solo sendo secadas em estufa.....	42
Figura 17 - Pesagem das amostras	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estimadores dos parâmetros para as variáveis físicas do solo determinadas nas amostras com estrutura preservada.	44
Tabela 2 - Estimadores dos parâmetros da regressão linearizada, para a resistência à penetração (RP) em função da umidade volumétrica do solo (θ) e da densidade do solo (Ds): $\log_{10}RP = \log_{10} a + b \log_{10}\theta + c \log_{10}Ds$	45
Tabela 3 - Estimadores dos parâmetros da regressão linear, para a umidade na capacidade de campo (θ) no potencial de - 0,01 MPa em função da densidade do solo (Ds): $\theta_{cc} = 0,20033 + 0,13834 Ds$	46
Tabela 4 - Estimadores dos parâmetros da regressão linear, para a umidade no ponto de murcha permanente (θ) no potencial de -1,5 MPa em função da densidade do solo (Ds): $\theta_{PMP} = - 0,00018 + 0,17931 Ds$	47

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Variação do conteúdo de água no solo na Capacidade de campo(θ_{cc}), Ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), Porosidade de aeração (θ_{PA}) e Resistência do solo à penetração (θ_{RP}) no limite crítico de 2,0 MPa em função da Densidade do solo (Ds). A área em azul corresponde ao Intervalo hídrico ótimo do solo (IHO). A linha superior representa o grau de compactação (GC) em função da Ds.	48
Gráfico 2 - Variação do conteúdo de água no solo na Capacidade de campo(θ_{cc}), Ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), Porosidade de aeração (θ_{PA}) e Resistência do solo à penetração (θ_{RP}) no limite crítico de 3,0 MPa em função da Densidade do solo (Ds). A área em azul corresponde ao Intervalo hídrico ótimo do solo (IHO). A linha superior representa o grau de compactação (GC) em função da Ds.	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AD	Água disponível
CC	Capacidade de campo
CTC	Capacidade de troca de cátions
Ds	Densidade do solo
Dsc	Densidade do solo crítica
GC	Grau de compactação
IHO	Intervalo hídrico ótimo
kPa	Kilopascal
MO	Matéria orgânica
MPa	Megapascal
NLWR	Non Limiting Water Range
LLWR	Least Limiting Water Range
PA	Porosidade de aeração
PMP	Ponto de murcha permanente
PT	Porosidade total
RP	Resistência do solo à penetração
SPD	Sistema de plantio direto

LISTA DE SÍMBOLOS

θ	Teor de umidade
μm	Micrómetro
CO_2	Dióxido de carbono (gás carbônico)
O_2	Oxigênio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	18
2.1	QUALIDADE FÍSICA DO SOLO EM ÁREAS MANEJADAS SOB SISTEMA DE PLANTIO DIRETO.....	18
2.2	POROSIDADE E AERAÇÃO DO SOLO.....	20
2.3	RELAÇÕES ENTRE DENSIDADE DO SOLO (DS) E RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO (RP).....	22
2.4	DINÂMICA DA ÁGUA NO SOLO: RELAÇÕES ENTRE CC E PMP.....	25
2.5	INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO (IHO) COMO PARÂMETRO DE QUALIDADE FÍSICA DO SOLO.....	26
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	30
3.1	LOCAL E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA.....	30
3.2	COLETA DAS AMOSTRAS.....	30
3.3	EQUIPAMENTOS E MÉTODOS DE AVALIAÇÃO.....	36
3.4	CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA (CRA).....	40
3.5	DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO (RP) E CURVA DE RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO (CRP).....	40
3.6	DETERMINAÇÃO DO INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO (IHO).....	43
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	44
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	52
	REFERÊNCIAS.....	54

1 INTRODUÇÃO

Com o crescente aumento da demanda na produção de alimentos a nível mundial, progressivamente faz-se necessário aumentar a capacidade produtiva no setor agrícola, aliada a técnicas de produção mais sustentáveis. O grande obstáculo surge em produzir mais, de maneira a otimizar os meios de produção e conservar os recursos naturais. Em meio a essa preocupação, surgiu a adoção do Sistema de Plantio Direto (SPD), também chamado de plantio direto na palha, que veio para substituir as práticas de cultivo convencionais e técnicas de produção intensivas. A grande diferença do SPD para o convencional não se dá só pela semeadura direto na palha e não revolvimento do solo, mas parte também de outras premissas como um sistema de rotação de culturas bem planejado e cobertura permanente sobre o solo.

Apresentando benefícios evidentes, meios de produção mais sustentáveis e sistemas de produção economicamente mais viáveis, a adoção das práticas do SPD gradativamente passou a substituir as técnicas convencionais. Dentre os benefícios que o SPD proporciona estão a conservação da temperatura e umidade do solo, redução da erosão, melhora na infiltração e retenção da água no solo, além de apresentar melhor continuidade de poros e condições mais adequadas para o crescimento de plantas. Além disso, os restos culturais fornecem um incremento nos teores de matéria orgânica (MO), oferecem energia para a microbiota do solo, estimulam a ciclagem e disponibilização de nutrientes, contribuem para a qualidade física do solo, de forma que proporcionam maior estabilidade dos agregados e melhora do sistema poroso do solo.

Atualmente o SPD já se encontra bem difundido no Brasil, apresentando sistemas de produção destaque até no cenário mundial. Em 2018 o país já contava com mais de 33 milhões de hectares cultivados sob plantio direto (FEBRAPDP, 2018). A tendência é que a adoção do SPD cresça ainda mais e eventualmente substitua as práticas convencionais. Apesar da grande difusão do SPD e crescentes inovações tecnológicas relacionadas ao manejo, muitas pesquisas retratam resultados preocupantes em relação às práticas adotadas no sistema. Muitas áreas têm apresentado compactação principalmente das camadas mais superficiais além de significativas perdas de solo por erosão.

Estas causas podem estar relacionadas à má condução do sistema, um exemplo é a entrada de máquinas em condições em que o solo se apresenta plástico, favorecendo o processo de compactação. Outro problema é a falta de terraceamento, principalmente em áreas que possuem alta declividade e são mais suscetíveis ao processo erosivo. Além disso, a falta de um sistema de rotação de culturas adequado, de ausência de cobertura permanente do solo, da manutenção de restos culturais e incremento de MO, também aceleram o processo de degradação física do solo. Esses processos de degradação trazem limitações para o desenvolvimento das plantas, e acarretam no aumento da resistência do solo à penetração das raízes. Ainda, causam diminuição do espaço poroso em decorrência do aumento da densidade do solo (Ds), conseqüentemente limitando a disponibilidade de água e o espaço para a atividade do ar, elementos fundamentais para a produção das culturas.

A umidade no solo é um fator essencial para o desenvolvimento e nutrição das plantas, sendo que além de fornecer água também é importante para a absorção de nutrientes pelas raízes, já que a maior parte dos nutrientes são captados via interceptação radicular e por fluxo de massa. Além disso, a umidade do solo influencia diretamente na resistência do solo à penetração das raízes (RP), de forma que quanto maior for a umidade, menor tende a ser a RP, pois com o aumento da umidade ocorre uma diminuição das forças de coesão entre as partículas do solo. Com o aumento da umidade ocorre a ocupação dos poros com água, diminuindo gradativamente o espaço disponível para a aeração das plantas (PA). Portanto, a influência dos fatores físicos diretamente relacionados com as plantas é um processo dinâmico e fortemente controlado pela umidade.

O fator de Água Disponível (AD) é um dos indicadores de qualidade física mais utilizados, inclusive em manejo de sistemas de irrigação. Porém, esse indicador considera que não ocorrem limitações dentro do intervalo da capacidade de campo (CC) e do ponto de murcha permanente (PMP). Observou-se por muitas vezes que áreas manejadas dentro desse intervalo sofreram limitações, demonstrando a necessidade de avaliar mais propriedades para obter resultados mais seguros. Entende-se que o solo e suas relações físico hídricas são um sistema muito dinâmico, sendo que somente a umidade do solo não é um critério adequado ou suficiente para determinar a disponibilidade de água.

Outros indicadores utilizados para avaliar a qualidade física do solo são a densidade do solo (Ds), porosidade e resistência do solo à penetração das raízes

(RP). Estes fatores são muito influenciados pela estrutura do solo e pela umidade, principalmente quando se trata da RP.

Pelo fato de a qualidade física do solo ser muito dependente da sua condição estrutural e do seu teor de água, é muito difícil quantificar e avaliar as propriedades físicas de forma isolada. As propriedades físicas do solo estabelecem uma grande interação entre elas, e muitas vezes um fator influencia no outro. Para compreender melhor a dinâmica que ocorre em meio a estrutura física do solo, é interessante que se faça uma avaliação integradora dos principais fatores que controlam o crescimento e desenvolvimento das plantas, e observar a interação que ocorre entre eles. Uma forma de tentar estabelecer uma avaliação mais representativa, é definir quais os atributos que influenciam de forma mais significativa na produção das culturas. Os atributos físicos do solo que estão diretamente relacionados com o crescimento das plantas são: a disponibilidade de água, aeração e a resistência mecânica à penetração das raízes (LETEY, 1985).

Como uma alternativa multifatorial de avaliação da qualidade física do solo, Letey (1985) propôs um modelo que mais tarde foi aprimorado por Silva *et al.* (1994) e denominado como Intervalo Hídrico Ótimo (IHO). O IHO além de integrar os parâmetros de capacidade de campo (CC) e ponto de murcha permanente (PMP), também inclui outros dois fatores físicos de crescimento as plantas, a porosidade de aeração (PA) e a resistência do solo à penetração (RP). Para formular o IHO, o limite superior considera o teor de água (θ) na capacidade de campo θ_{CC} e a umidade θ_{PA} , que é a umidade para garantir o mínimo de 10% de aeração, ambos dependentes da densidade do solo (D_s). Já o limite inferior do IHO leva em consideração a θ_{PMP} e a umidade θ_{RP} que é considerada limitante para penetração das raízes, ambos também dependentes da densidade do solo (D_s). O menor intervalo determinado entre esses quatro fatores é o IHO, que pode ser expresso em forma de gráfico em função da θ x D_s .

É de grande importância a elaboração de estudos que agreguem conhecimento a respeito do IHO e seus parâmetros em áreas de SPD consolidado, pelo fato de ter poucas pesquisas relacionadas à avaliação dos atributos físicos em sistemas de manejo conservacionistas de longa duração. Além disso, os sistemas de SPD de longo prazo podem apresentar melhores condições para o desenvolvimento das plantas mesmo em valores de D_s e RP maiores, em comparação à sistemas de cultivo convencionais. Isso se deve principalmente melhor qualidade estrutural do solo

e maior capacidade de retenção de água em sistemas SPD, além de fornecerem caminhos alternativos para o crescimento das raízes por apresentar um maior volume e melhor continuidade do sistema poroso do solo.

Diante do que foi exposto, o objetivo deste trabalho foi determinar o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) do solo em uma área sob sistema de plantio direto consolidado há mais de 20 anos, o solo da área é do tipo Latossolo Vermelho de textura argilosa.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 QUALIDADE FÍSICA DO SOLO EM ÁREAS MANEJADAS SOB SISTEMA DE PLANTIO DIRETO

A qualidade física do solo pode ser entendida como a capacidade de o solo desempenhar suas funções com o objetivo de garantir o crescimento e desenvolvimento das plantas de forma satisfatória (TORMENA *et al.*, 1998, p. 574). A estrutura que governa as funções do solo, como a retenção de água, infiltração, resistência do solo à penetração das raízes, matéria orgânica e suscetibilidade à erosão (RABOT *et al.*, 2018, p. 122).

No Brasil ainda se têm poucos estudos referentes à avaliação da qualidade física do solo em sistemas de plantio direto consolidado, com longo tempo de implantação (mais de 20 anos) (BETIOLI, 2012, p. 923). Muitas áreas sob SPD encontram-se em processos de degradação, com índices de compactação que podem vir a limitar a produtividade das culturas. Fato que está fortemente ligado a má condução do sistema e práticas e manejo inadequadas.

Existem alternativas para melhorar a qualidade física do solo em áreas sob SPD que estão em processo de compactação, uma delas é utilizar plantas de cobertura que possuem alto potencial de produção de biomassa e sistema radicular profundo, abundante e agressivo (FRANCHINI *et al.*, 2011).

Um dos pilares do SPD é manter o solo sempre coberto, seja com resíduos e matéria orgânica (MO) remanescentes de alguma cultura ou com cobertura vegetal viva, sendo o cultivo de plantas de cobertura uma prática essencial para um SPD de sucesso. As plantas de cobertura podem trazer diversos benefícios para a estrutura do solo, tais como: incremento de MO, melhora da agregação das partículas do solo, manutenção e aumento do espaço poroso (formação de bioporos), proteção do solo contra agentes externos (chuva, pisoteio, amassamento) e manutenção mais eficiente da umidade e temperatura.

A adição de MO no solo pode trazer diversos benefícios para a sua estrutura e para a produtividade das culturas, de acordo com Bayer e Mielniczuk (1999) ela confere uma melhoria na estrutura do solo, aumento na disponibilidade de nutrientes

para as culturas, aumento na capacidade de troca de cátions (CTC), complexação de alguns elementos com potenciais tóxicos e aumento da atividade microbiana.

Outra premissa do SPD é manter sempre o solo coberto, manter a superfície do solo com cobertura vegetal ajuda a dissipar a energia de compactação e ameniza a desagregação do solo. Aliás, a cobertura vegetal sobre o solo também dissipa energia da chuva, reduzindo perdas por erosão (BARCELOS *et al.*, 1999; SCHÄFER *et al.*, 2001; CASSOL *et al.*, 2004).

Observando o efeito de diferentes preparos e a presença de cobertura sobre o solo, Schäfer *et al.*, (2001) verificaram uma redução significativa nas perdas de solo por erosão através da utilização das plantas de cobertura. Ainda, comparando o Plantio direto com cobertura em relação ao Plantio direto sem cobertura, observaram que o sistema que manteve cobertura sobre o solo apresentou uma redução de 31% nas taxas de perda de água por evaporação.

A manutenção da palhada também estimula a ciclagem de nutrientes e aumenta a sua disponibilidade para as plantas (PAVINATO *et al.*, 1994; AITA *et al.*, 2001), além de manter maior umidade no solo e garantir menor oscilação da temperatura durante o dia (COSTA *et al.*, 2003). Diversificar espécies através da rotação de culturas também é importante para aumentar a diversidade da comunidade microbiana (PEREIRA *et al.* 2007).

Outro aspecto da utilização de plantas de cobertura e de manter a diversidade da fauna do solo, é a formação de bioporos que estes agentes proporcionam para a estrutura. Estes bioporos são extremamente benéficos para a infiltração de água e para o sistema radicular das plantas, principalmente em situações adversas. O sistema poroso do solo sob plantio direto geralmente conduz a água de forma muito mais eficiente quando comparado ao preparo convencional, mesmo com porosidade total (PT) inferior à do preparo convencional (WU *et al.*, 1992), fato que é atribuído a melhor estrutura e continuidade de bioporos.

Estudando um Latossolo Vermelho, Barcelos *et al.* (1999), verificaram que o SPD apresentou maiores taxas de infiltração de água no solo quando comparado a sistemas de preparo convencional. Fato que é atribuído a melhor estabilidade e continuidade de poros, demonstrando a superioridade que a estrutura física do solo pode apresentar sob um SPD manejado de forma correta.

2.2 POROSIDADE E AERAÇÃO DO SOLO

A porosidade é a fração do solo que é ocupada com ar ou água, espaço por onde circula a solução do solo (água, nutrientes) e espaço onde ocorrem as trocas gasosas e movimento do ar. Normalmente, o volume do solo ocupado por ar e água, isto é, a porosidade, divide-se em macroporos (diâmetro maior que 50 μm) e microporos (diâmetro menor que 50 μm) (RICHARDS, 1965).

Os macroporos são os que se esvaziam quando é aplicada uma sucção de 6 kPa (CC), nesse potencial são esvaziados todos os poros com diâmetro maior que 0,05 mm. Para os microporos, são considerados os com diâmetro inferior a 0,05 mm e que são esvaziados no intervalo de pressão entre 6 kPa a 1.500 kPa (PMP) (KLEIN *et al.*, 2002, p. 947). Ou seja, a quantidade de microporos é estimada pela diferença de peso entre a umidade de 6 kPa e o solo seco.

Os macroporos são os principais responsáveis pela infiltração e movimento rápido da água no solo, e também pelo movimento do ar na sua estrutura. Já os microporos estão estreitamente relacionados com a retenção de água no solo, disponibilidade e fluxo de água no solo em condições de solo não saturado.

A densidade e a porosidade estão diretamente relacionadas ao volume do solo, ou seja, são diretamente afetadas pelo processo de compactação. A relação entre a densidade e a porosidade é inversa, ao passo que a porosidade diminui conforme a densidade aumenta, sendo que essa redução geralmente inicia com a diminuição dos macroporos, responsáveis pela infiltração de água e aeração do solo (SUZUKI *et al.*, 2007).

O tamanho dos poros determina o potencial da água que é retida neles, ou seja, a sucção necessária para esvaziá-los. Quanto maior o tamanho do poro, menor será a sucção necessária para retirar a água dele, por outro lado, quanto menor for o diâmetro dos poros, maior também será a força de sucção necessária para retirar essa água (CAMARGO; ALLEONI, 1997).

Segundo diversos autores, a compactação diminui a porosidade total, reduzindo principalmente os macroporos. Através de estudos em laboratório avaliando um Latossolo Roxo, Grohmann e Queiroz Neto (1966) verificaram uma redução em torno de 50% do volume de macroporos, e uma redução da porosidade total próxima

de 20%. Com isso, Silva *et al.* (1986) observaram que com o efeito da compactação houve uma transformação de um volume de macroporos em microporos.

Além do volume de macro e microporos, o solo ainda contém mais um parâmetro que rege a produção de plantas, a porosidade de aeração (PA). A porosidade de aeração (PA) é considerada o espaço disponível para a respiração e trocas gasosas das plantas e organismos aeróbios. A PA é dinâmica e varia de acordo com as condições físicas e a oscilação de umidade no solo, ela é estimada pela diferença entre a porosidade total (PT) e a umidade atual do solo, geralmente é atribuído o valor mínimo de 10% de PA para que se tenha um ambiente adequado para o desenvolvimento das plantas.

Na medida em que ocorre o processo de umedecimento do solo a porosidade de aeração é reduzida, pelo fato de que nesse processo a água passa a ocupar volume de macroporos. Com o aumento da umidade, gradativamente a resistência do solo à penetração é reduzida. O inverso também ocorre, à medida que umidade do solo vai diminuindo, a resistência do solo à penetração tende a aumentar (TORMENA *et al.*, 2007).

As plantas e organismos aeróbios necessitam de oxigênio na atmosfera do solo, de forma que consomem o O₂ e liberam CO₂, posteriormente trocando esses gases com a atmosfera externa ao solo. Quando esse processo de troca de gases com o meio externo não se dá de forma satisfatória, ou quando há limitação de aeração na estrutura do solo, ocorrem restrições de crescimento e desenvolvimento das culturas agrícolas.

Para Tormena *et al.* (2002), valores de macroporosidade inferiores a 10-15% já restringem o crescimento e a produtividade da maioria das culturas. Quantidades inferiores a 10% comprometem a difusão de O₂ no solo e limitam a respiração das raízes. Em condições de PA menores que 10%, os processos de difusão de gases são prejudicados, desta forma prejudicando os processos metabólicos e o crescimento do sistema radicular das plantas (LEÃO, 2002).

Há uma grande dificuldade em estabelecer valores críticos de PA, pois além das propriedades físicas (quantidade de água no ambiente, temperatura e compactação do solo), os fatores químicos e biológicos específicos de cada planta vão originar diferentes valores restritivos de PA (SOUZA, 2004).

De modo geral, uma porosidade de aeração mínima de 10% é considerada como condição física do solo favorável para o crescimento e desenvolvimento das

plantas de forma adequada (GRABLE; SIEMER, 1968; GLINSKI; LIPIEC, 1990; XU *et al.*, 1992).

De acordo com Sojka (1992), alguns efeitos que as plantas podem apresentar pela deficiência na difusão de gases são: fechamento dos estômatos, murchamento dos tecidos, necrose das raízes, obstrução do xilema e desbalanço nutricional das plantas.

2.3 RELAÇÕES ENTRE DENSIDADE DO SOLO (DS) E RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO (RP)

O processo de compactação se tornou uma preocupação em áreas manejadas sob SPD, principalmente em solos mais argilosos. Os solos argilosos são mais suscetíveis ao processo de compactação devido ao fato de serem mais plásticos e as partículas de argila possuírem um diâmetro menor, o que facilita o rearranjo da estrutura e favorece o processo de compactação com mais frequência, principalmente em condições de maior umidade.

Quando ocorre um processo de compactação ele aproxima as partículas sólidas, reduzindo o seu espaço poroso, e conseqüentemente aumentando a densidade do solo. A densidade do solo é definida como a relação da massa do solo seco à estufa e do seu volume total, incluindo o espaço poroso do solo. Logo, a densidade é afetada por cultivos e manejos que alteram a sua estrutura, que conseqüentemente alteram o arranjo dos poros.

Na medida em que ocorre o aumento da densidade do solo (Ds), aumenta a resistência mecânica do solo à penetração (RP), geralmente criando restrições para o crescimento radicular das plantas, acarretando na redução do volume de solo explorado para captação de água e nutrientes. Além disso, essas restrições provocam algumas modificações morfológicas nas raízes, como aumento do diâmetro e diminuição do comprimento, fazendo com que elas se tornem tortuosas (SILVA; ROSOLEM, 2002). A compactação influencia diretamente no crescimento e desenvolvimento das plantas, as camadas compactadas do solo restringem o crescimento do seu sistema radicular, diminuem a capacidade de absorção de água e nutrientes, e também a sua disponibilidade no solo.

A resistência do solo à penetração (RP) é muito utilizada como parâmetro para avaliar a qualidade física do solo, é uma boa ferramenta para verificar áreas com sinais de degradação estrutural ou compactação. Quanto maior a RP, maior é a dificuldade encontrada pelas plantas para promover um crescimento adequado do sistema radicular ao longo do perfil (LEÃO, 2002). Com as avaliações de RP é possível obter um indicativo da resistência que o solo oferece para a penetração das raízes, e assim correlacionar com os valores críticos estabelecidos.

As avaliações de RP são realizadas com a utilização de um penetrômetro, os penetrômetros mais utilizados são os estáticos e os dinâmicos. O funcionamento dos penetrômetros estáticos se baseia em uma haste metálica que possui um cone na extremidade, esta haste é conectada um medidor que é composto por uma célula de carga e um registrador analógico ou transdutor de pressão (HERRICK; JONES, 2002, p. 1320). O medidor relaciona a força aplicada pelo operador sobre o equipamento com a área basal do cone, gerando um valor chamado de “índice de cone” que costuma ser registrado em MPa ou kPa (HERRICK; JONES, 2002, p. 1320). Uma das limitações desse aparelho é que a velocidade de penetração da haste no solo deve ser constante, ou seja, os resultados são influenciados pelo manuseio do operador que é responsável por aplicar a força sobre o equipamento.

Por outro lado, os penetrômetros dinâmicos consistem na aplicação de uma quantidade conhecida de força sobre o equipamento. De acordo com Herrick e Jones (2002, p. 1321), é fornecida uma quantidade conhecida de energia cinética ao penetrômetro, que vai fazer com que ele penetre no solo por determinada distância. Esta distância movida vai depender da geometria do cone, da energia cinética que foi aplicada e da RP (HERRICK; JONES, 2002, p.1321). A utilização deste equipamento isenta os resultados da variabilidade do operador e da força aplicada, sendo que esta é controlada.

Na literatura encontra-se a recomendação de diversos valores críticos de RP, o mais amplamente utilizado é o de 2,0 MPa, sendo considerado como valor crítico para o desenvolvimento das plantas. (TAYLOR *et al.* 1966; SILVA *et al.* 1994; TORMENA *et al.* 1998). Porém, as plantas também possuem mecanismos de escape ou de tolerância até certos níveis de RP, além do fato da RP ser muito sensível às oscilações de umidade no solo, que diminuem a RP em maiores conteúdos de água e aumentam na medida com que a umidade do solo diminui. Diante disto, isso é muito difícil estabelecer valores críticos de RP que representem diferentes culturas, e em

diferentes tipos de solos, sendo que a textura do solo também é determinante para essas avaliações.

A avaliação da RP pode levar a erros de interpretação, pois ela é muito dependente da umidade do solo e da distribuição do tamanho de partículas (CANARACHE, 1990; PABIN *et al.*, 1998). Desta forma, um solo seco ou com maior densidade apresenta uma maior RP se comparado a um solo úmido ou menos denso, da mesma forma um solo argiloso apresenta maior resistência do que um solo arenoso para a mesma faixa de umidade.

Outro fator importante é que a determinação da RP não é capaz de identificar rachaduras no solo ou presença de bioporos, que servem como caminho alternativo para o crescimento de raízes. Torres e Saraiva (1999, p. 23) e Ehlers *et al.* (1983) e sugerem valores maiores de RP em solos sob SPD, com o argumento de que um sistema de plantio direto bem manejado pode oferecer um sistema poroso mais estável e com maior continuidade de poros, desta forma não apresentando restrições de crescimento das raízes.

De Maria *et al.* (1999) através de estudos comparando os sistemas de preparo convencional e semeadura direta, observaram maior volume de raízes no sistema de semeadura direta, mesmo este tendo apresentado maiores valores de Ds e RP. Por meio de avaliações realizadas em áreas manejadas sob SPD e sistema convencional com solo de clima temperado, Ehlers *et al.* (1983) sugerem uma variação de 4,6 a 5,1 MPa como valor crítico de RP para SPD.

Avaliando a RP na cultura do trigo, Merroto e Mundstock (1999) relatam que valores acima de 3,5 MPa já causam severas limitações ao desenvolvimento do sistema radicular e da matéria seca da planta do trigo.

Para a cultura da soja em Latossolos roxos, Torres e Saraiva (1999, p. 23) evidenciaram que valores de RP limitantes na faixa de 3,5 a 6,5 MPa são mais adequados para avaliar restrições mecânicas para o crescimento das raízes, com a justificativa de que valores em torno de 2,5 MPa são considerados baixos para gerar limitações físicas. Klein e Camara (2007) também avaliando a cultura da soja em um Latossolo vermelho, observaram que a RP de 2 MPa não apresentou restrições ao desenvolvimento e produtividade da soja.

No geral, o valor de 2 MPa é assumido como o limite crítico de RP, a partir do qual ela afeta o crescimento de plantas e pode causar severas reduções na produção (SILVA *et al.*, 2010).

Nenhum valor assumido como limite crítico de RP é absoluto, as plantas muitas vezes encontram realidades diferentes das que são determinadas através dos penetrômetros. Benghough e Mullins (1990) apresentaram diversos resultados experimentais, relatando que a resistência oferecida pelo solo a um penetrômetro pode ser de duas a oito vezes maior do que a resistência encontrada pelas raízes das plantas. Desta forma, as estimativas do penetrômetro podem superestimar a resistência do solo à penetração, principalmente se estas avaliações forem feitas em condições de baixa umidade do solo.

Embora a determinação da RP seja um parâmetro importante, ele nem sempre será o limitante da produtividade das culturas, as limitações são causadas geralmente pela interação de vários fatores físicos. Dentre os principais fatores estão: o espaço livre para aeração, a quantidade de água que é disponível para as plantas e a resistência mecânica do solo à penetração das raízes (LETEY, 1985; SILVA *et al.*, 1994; SILVA, 2003).

2.4 DINÂMICA DA ÁGUA NO SOLO: RELAÇÕES ENTRE CC E PMP

O solo é um sistema composto por frações sólidas, líquidas e gasosas, e para um desenvolvimento adequado para as plantas é importante que haja um equilíbrio entre esses três fatores. A capacidade do solo em reter água é altamente dependente de sua textura e estrutura, sendo que quanto mais argiloso for o solo, maior será sua capacidade de retenção devido a maior área superficial específica das partículas da argila.

A capacidade de armazenamento de água de um solo está relacionada a sua composição textural, sequência de camadas de propriedades físicas distintas e de sua umidade inicial (REICHARDT *et al.*, 2016).

Porém nem toda água que é retida pelo solo fica disponível para as plantas, isso se deve a drenagem natural que ocorre no perfil após uma precipitação ou atividade de irrigação, e pela alta energia que a água pode ficar retida entre as partículas do solo, ficando indisponível para o sistema radicular das plantas.

A disponibilidade de água para as plantas pode ser compreendida no intervalo entre a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP). A

umidade na CC é entendida como a quantidade de água que fica retida após infiltração da água proveniente de precipitações ou irrigação.

O conceito da CC de um solo pode ser definido como o momento em que o fluxo de drenagem praticamente cessa, onde após uma chuva ou irrigação o excesso foi naturalmente drenado no perfil do solo, esta umidade remanescente é considerada a CC. O teor de água na CC geralmente é atribuído ao potencial de $-0,01$ MPa, que é a tensão mais utilizada para quantificá-la em laboratório.

Na medida em que o conteúdo de água no solo vai diminuindo, ocorre um aumento gradativo do potencial matricial, até o momento em que a energia com que a água é retida pelo solo supera a capacidade da planta de absorver esta água, a partir deste momento inicia o processo de murchamento permanente (PMP).

O conceito de PMP foi elaborado por Briggs e Shantz (1912, p. 21), e definido como o nível mínimo de umidade abaixo do qual uma planta em condições normais de crescimento, apresenta perda de turgescência das folhas, situação da qual não se recuperam mesmo sendo postas em ambiente escuro e com atmosfera saturada. Sendo assim, essa condição é considerada irreversível, e considerado o limite mínimo de água no solo para garantir o desenvolvimento das plantas. Esse limite é muito bem correlacionado com o potencial de água no solo de $1,5$ MPa (SILVA, 2010).

Em uma pesquisa realizada por Savage *et al.* (1996) foi constatado que o PMP pode ocorrer em potenciais menores que $1,5$ MPa, porém esse limite é considerado seguro para estabelecer o limite inferior de água no solo para as plantas.

Através desses dois parâmetros, Viehmeyer e Hendrickson (1927) definiram a água disponível (AD) como a quantidade de água existente entre a CC e o PMP.

O conceito de AD na zona radicular do solo entre os potenciais de $-0,01$ MPa (CC) e $-1,5$ MPa (PMP), tem sido utilizado para estratégias de manejo do solo (CASSEL; NIELSEN, 1986).

2.5 INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO (IHO) COMO PARÂMETRO DE QUALIDADE FÍSICA DO SOLO

O conceito de AD é amplamente utilizado e aceito principalmente para manejo de irrigação. Porém, nem toda a água que fica armazenada entre a CC e o PMP necessariamente fica disponível para as plantas.

Uma forma de aperfeiçoar os métodos de avaliação das propriedades físicas do solo relacionadas com a dinâmica da água, seria incrementar mais parâmetros e assim verificar as possíveis relações entre eles. Para propor uma única variável que expresse as interações entre os atributos físicos e o crescimento das plantas, Letey (1985) apresentou o conceito de faixa de umidade não limitante, sendo descrito como “Non Limiting Water Range” (NLWR). O conceito de NLWR considera que em determinada faixa de umidade do solo não existem limitações hídricas para o crescimento das raízes, nem por aeração ou resistência à penetração.

Considerando que o crescimento das raízes pode variar de acordo com os potenciais de água e as limitações físicas impostas, Silva *et al.* (1994) aprimoraram esse conceito para “Least Limiting Water Range” (LLWR). O conceito de LLWR considera que o crescimento das raízes dentro dos limites é menos restrito (porém pode sofrer limitações), enquanto fora dos limites as restrições aumentam.

Desta forma, Silva *et al.* (1994) sugeriram o LLWR como índice para avaliar a qualidade física do solo, com base nos conceitos apresentados por Letey (1985). Esse modelo foi traduzido para a língua portuguesa por Tormena *et al.* (1998), sendo configurado como Intervalo Hídrico Ótimo (IHO). Porém, mantendo a mesma essência, sendo definido como a faixa de umidade do solo em que as limitações ao desenvolvimento das plantas são mínimas.

Além de considerar a CC e o PMP, o IHO inclui também como fatores de limitações a resistência do solo à penetração das raízes (RP) e a porosidade de aeração do solo (PA).

Portanto, o IHO é definido como a faixa de umidade em que a disponibilidade de água para as plantas é ótima, quando não está tão fortemente retida de forma que ela limite o desenvolvimento das plantas e sem que haja um excesso de RP, além de não apresentar limitações significativas pela PA.

Para formular o IHO é considerado o teor de água (θ), estabelecendo como limite superior θ_{cc} e a umidade $\theta_{10\%}$, que é a umidade para garantir o mínimo de 10% de aeração, ambos dependentes da densidade do solo (Ds). Já o limite inferior do IHO leva em consideração θ_{PMP} e a umidade θ_{RP} que é considerada limitante para penetração das raízes, ambos também dependentes da Ds. O menor intervalo determinado entre esses quatro fatores é o IHO, que pode ser expresso em forma de gráfico de θ x Ds.

Betioli *et al.* (2012), avaliando um Latossolo vermelho sob SPD, verificaram que o IHO tende a diminuir com o aumento da Ds. Segundo Kay (1990), quanto menor o IHO, maior será a probabilidade de ocorrência de limitações físicas para o crescimento das raízes no solo. Diante disso, sistemas de produção ou condições de manejo que apresentam um menor valor de IHO, tendem a expor as plantas a situações de stress por falta ou excesso de água no solo com maior frequência (TORMENA *et al.*, 1998).

De acordo com Cavalieri *et al.* (2006, p. 139), o IHO melhora o conceito de água disponível (AD) entre a CC e o PMP, porque ele considera também as limitações da PA e da RP. Em situações adequadas de manejo onde há uma boa qualidade estrutural do solo, o IHO vai ser igual a AD. Porém, quando há degradação estrutural o IHO vai ter a PA como seu limite superior e a RP como limite inferior, situação na qual o solo já apresenta sérias limitações ao crescimento das plantas.

Com base em avaliações na cultura do Feijoeiro em um Latossolo vermelho submetido à diferentes níveis de compactação, Kaiser *et al.* (2009) verificaram que a compactação reduziu a amplitude do IHO e que a PA e a RP foram os principais limitantes nesse solo em altos níveis de compactação. Ainda, observaram que as raízes do feijoeiro não se desenvolveram e o IHO ficou nulo quando foi considerada a RP de 3 MPa.

Em áreas que apresentam algum tipo de degradação física, ou áreas de SPD com indícios de compactação, o parâmetro de RP acaba sendo o limite inferior do IHO e o principal limitante da produtividade das culturas. Quanto maior o teor de argila no solo, maior será a suscetibilidade ao processo de compactação, maiores as chances de limitações por RP. Este fato foi observado por Fidalski *et al.* (2013), que utilizaram o IHO para avaliar a qualidade física de um Latossolo vermelho, e evidenciaram que a RP foi o maior limitante do IHO em todas as camadas avaliadas. Resultados semelhantes foram observados por Moreira *et al.* (2014), que avaliando também um Latossolo vermelho sob SPD, verificaram que a RP foi o limite inferior em quase todas as faixas de Ds avaliadas.

Pelo fato de em grande parte das amostras o conteúdo de água no solo (AD) ser superior ao IHO, Silva *et al.* (1994) destacam que o IHO é uma ferramenta mais sensível que o conceito de AD. Desta forma o IHO pode representar melhor as condições que as plantas encontram no solo, principalmente por considerar mais variáveis.

A densidade do solo crítica (Dsc) é encontrada quando o valor da densidade em que o limite superior do IHO se iguala ao inferior, sendo que o valor do IHO se torna igual a zero (SILVA *et al.*, 1994). Em situações que os valores apresentados de densidade do solo (Ds) são maiores que a Dsc, é um alerta de que as plantas estão sendo expostas a altas restrições físicas para o seu crescimento.

Quanto maior a frequência de $Ds > Dsc$, maior será a frequência com que as plantas estarão sujeitas a estresses físicos, causando sérias limitações para o crescimento e produtividade das culturas.

Compreender qual a propriedade do solo que está limitando o crescimento das plantas é importante e possibilita adotar práticas de manejo com o objetivo de aumentar o IHO (SILVA, 2003). Quando o limite superior for a PA e o inferior for a RP, as técnicas de manejo adotadas possuem uma maior influência sobre a amplitude do IHO, podendo aumentá-lo ou diminuí-lo de acordo com as práticas adotadas. Por outro lado, quando o limite superior for a CC e o limite inferior o PMP, as técnicas de manejo não terão tanta influência sobre a amplitude do IHO. Porém, é extremamente importante poder contar com essas informações e conhecer os limites, ferramenta muito útil para tomadas de decisão em relação a intervalos de irrigação e ações de manejo na área.

Uma das dificuldades para a ampla utilização do IHO, é a definição dos limites críticos de PA e RP, devido à alta variabilidade de solos, climas e espécies de plantas (SILVA, 2003). Isso se deve ao fato de que essa variabilidade apresentará interações específicas e cada cultura pode apresentar respostas diferentes de acordo com as condições físicas impostas.

Outro fator que dificulta a definição de limites críticos é a falta de pesquisas relacionadas ao IHO, principalmente em áreas com SPD consolidado. Há uma grande carência de informações referentes a utilização do IHO em diferentes tipos de solos, e em variadas culturas. Essa condição poderia ser transformada com a elaboração de mais pesquisas utilizando o IHO, e em maior diversidade de cenários.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 LOCAL E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

Este trabalho foi realizado no Laboratório de Pedologia e Física do solo da Universidade Federal da Fronteira Sul – UFFS, campus Cerro Largo.

A área onde foram realizadas as coletas está localizada na propriedade do Sr. Bronildo Wenzel, no município de Cerro Largo – RS. A área situa-se em: latitude Sul de 28° 8' 44", longitude Oeste de 54° 45' 44" e com altitude de 248 m.

O solo da área é classificado como Latossolo Vermelho de textura argilosa (EMBRAPA, 1999), a composição granulométrica apresenta 617,4 g kg⁻¹ de argila; 260 g kg⁻¹ de silte e 122,6 g kg⁻¹ de areia na camada de 0 a 20 cm. Além disso, os teores médios de matéria orgânica da área estudada são de 20,5 g/kg.

O manejo da propriedade consiste em Sistema de Plantio Direto consolidado, de forma que a área está a mais de 20 anos sem sofrer revolvimento do solo e sendo cultivada com culturas anuais em sistema de rotação de culturas. Os principais cultivos se dão através de soja e milho no verão e trigo e canola no inverno, sendo realizada a rotação de culturas a cada safra, além da utilização de plantas de cobertura no vazio outonal. No momento da coleta das amostras a área estava sob cultivo de soja que se encontrava em período vegetativo e havia sido semeada após a colheita do trigo.

De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é classificado como Cfa – Subtropical úmido ou temperado úmido, sendo caracterizado por verões quentes e por ser úmido durante todo o ano (KÖPPEN, 1931). Nesse clima as temperaturas costumam ser superiores a 22°C no verão e com ocorrência de mais de 30 mm de chuva nos meses secos.

3.2 COLETA DAS AMOSTRAS

As coletas foram realizadas no mês de dezembro de 2022 quando o estado enfrentava um período de estiagem, porém as amostras de solo foram coletadas após uma chuva de 34 mm em condições de solo friável.

Foram coletadas 90 amostras de solo com estrutura preservada na área, com o objetivo de avaliar locais com variabilidade de densidade do solo (Ds). As coletas foram realizadas com a utilização de um coletor do tipo Uhland, e os respectivos anéis com 7,1 cm de altura e 7 cm de diâmetro.

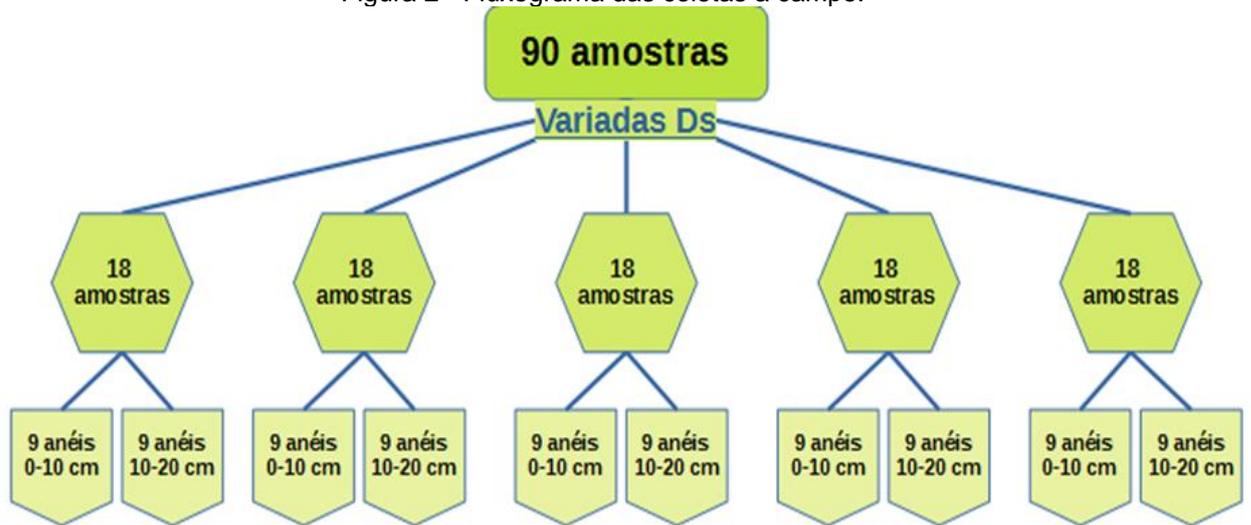
Figura 1 - Coletor de Uhland e anéis



Fonte: Autor, 2022.

Para coletar as 90 amostras de solo, elas foram divididas em 5 grupos com 18 anéis cada, estes grupos caracterizaram diferentes áreas dentro da propriedade com o objetivo de obter variabilidade na densidade do solo (Ds). Cada grupo continha 18 anéis, de forma que 9 foram coletados na camada 0-10 cm e 9 na camada 10-20 cm.

Figura 2 - Fluxograma das coletas a campo.



Fonte: Autor, 2022.

Todas as amostras foram coletadas com estrutura preservada do solo, acondicionadas em potes plásticos e posteriormente levadas para o laboratório.

Figura 3 - Coleta das amostras com o coletor de Uhland



Fonte: Autor, 2022.

Figura 4 - Coleta das amostras



Fonte: Autor, 2022.

Figura 5 - Retirada dos anéis



Fonte: Autor, 2022.

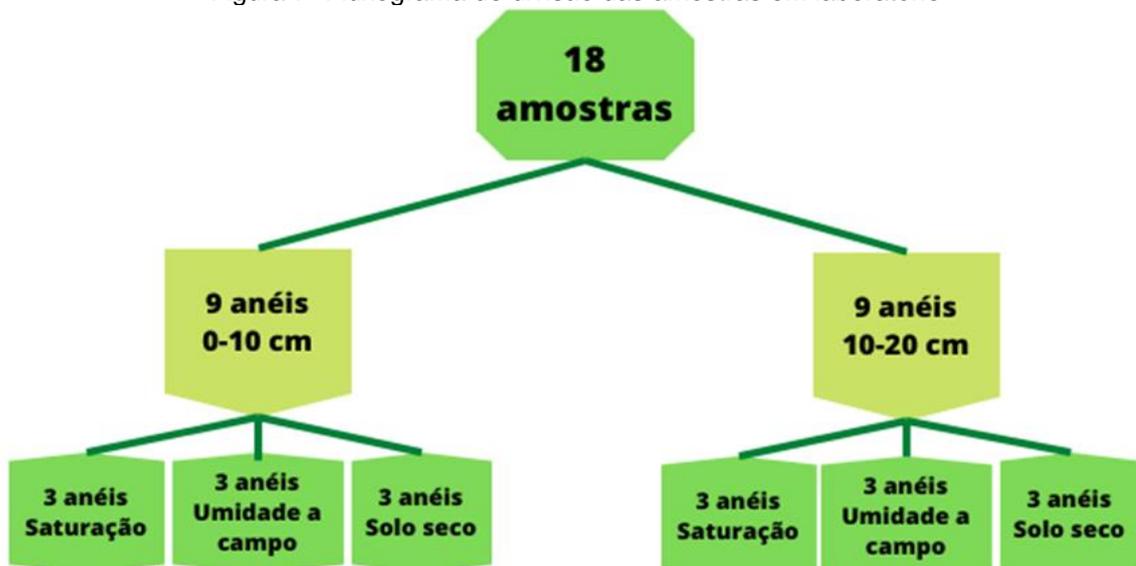
Figura 6 - Amostras dentro dos potes



Fonte: Autor, 2022.

No laboratório, todas as 90 amostras foram preparadas e depois as 18 amostras dos respectivos grupos foram separadas pelas profundidades de coleta, sendo 9 anéis de 0-10 cm e 9 anéis de 10-20 cm. Desses 9 anéis: 3 foram submetidos ao processo de saturação; 3 foram deixados dentro dos potes plásticos para avaliar a umidade do solo à campo; e as 3 amostras restantes foram deixadas expostas ao ar para secagem natural, representando umidade próxima ao PMP. Essa subdivisão foi necessária para obter a variabilidade adequada de D_s e umidade nas amostras para posterior ajuste dos modelos do IHO.

Figura 7- Fluxograma de divisão das amostras em laboratório



Fonte: Autor, 2022.

Figura 8 - Preparação das amostras em laboratório



Fonte: Autor, 2022.

Figura 9 - Amostras preparadas separadas por grupos



Fonte: Autor, 2022.

3.3 EQUIPAMENTOS E MÉTODOS DE AVALIAÇÃO

Textura do solo: para caracterizar o solo da área, a textura foi obtida por dispersão física e química para manter as frações argila e silte em suspensão. Sendo a fração areia separada por peneiramento e a fração de argila e de silte pela sedimentação, de acordo com a Embrapa (2011).

Umidade gravimétrica (Ug): determinada utilizando uma balança de precisão e uma estufa de circulação de ar forçada, para determinação foi considerado a massa da amostra úmida e a massa da amostra após secagem na estufa a 105°C, de acordo com o método da Embrapa (2011).

Figura 10 - Estufa de ar forçado



Fonte: Autor, 2022.

Umidade volumétrica (Uv ou θ): determinada utilizando as amostras com estrutura preservada através de anéis com volume conhecido, uma balança de precisão e uma estufa de circulação de ar forçada. A Uv foi obtida pela relação entre o volume de água e o volume de solo, pesando a amostra úmida e após secagem na estufa a 105 °C, conforme metodologia da Embrapa (2011).

Figura 11 - Balança de precisão



Fonte: Autor, 2022.

Densidade do solo (D_s): para determinar a densidade do solo foi utilizado o método do cilindro volumétrico com a utilização de cilindros (anéis) de volume conhecido, assim foi considerada a massa e o volume das amostras de solo com estrutura indeformada, de acordo com a Embrapa (2011).

Densidade de partículas (D_p): a densidade de partículas foi obtida através do método do balão volumétrico. Utilizou-se um balão volumétrico com solo seco de massa e volume conhecido, e preenchido com um líquido (álcool) de volume conhecido, assim sendo feita a pesagem e calculado o volume de álcool gasto, obtendo a D_p de acordo com a metodologia descrita por Embrapa (2011).

Porosidade total (P_t): a porosidade foi obtida através da relação entre a D_s e a D_p , conforme a metodologia descrita pela Embrapa (2011).

Figura 12 - Mesa de tensão



Fonte: Autor, 2022.

Porosidade de aeração: para a porosidade de aeração foi considerado o limite crítico mínimo de 10 %, equivalente a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (GRABLE E SIEMER, 1968). Para definição do limite superior do IHO, o valor de θ_{PA} foi obtido de acordo com a seguinte equação:

$$\theta_{PA} = (1 - (D_s/D_p)) - 0,10$$

De forma que:

θ_{PA} = umidade volumétrica do solo quando a porosidade de aeração é de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$;

D_p – densidade de partículas (Mg m^{-3});

D_s – densidade do solo.

Capacidade de campo (CC): para a determinação da CC foi utilizada a mesa de tensão, considerando a CC a umidade da amostra no potencial de 10 kPa, de acordo com a metodologia descrita pela Embrapa (2011).

Ponto de murcha permanente (PMP): com o objetivo de obter o PMP das amostras foi utilizada uma Câmara de Richards, para definir o PMP foi considerada a umidade das amostras no potencial de 1500 kPa, conforme Embrapa (2011).

Figura 13 - Câmara de Richards



Fonte: Autor, 2022.

Resistência do solo à penetração (RP): a avaliação da RP foi realizada com a utilização de um penetrômetro automático da marca Falker, modelo Solo Track PLG 5300. Foi utilizado a ponta de cone do tipo 3, com diâmetro de 7,94 mm e ângulo de 30°. Foi realizada uma leitura por amostra de solo, totalizando 90 leituras.

Figura 14 - Penetrômetro automático Falker



Fonte: Autor, 2022.

Grau de compactação: para estimar o grau de compactação, foi utilizada a seguinte fórmula:

$$GC = (D_s/D_{s_{max}}) \times 100$$

GC: Grau de compactação;

D_s: densidade do solo obtida;

D_{s_{max}}: densidade máxima do solo.

A D_{s_{max}} foi obtida através do ajuste dos dados em uma equação de regressão linear proposta por Klein (2008), obtendo a D_{s_{max}} através dos teores de argila e MO do solo. Foi utilizada a seguinte função:

$$D_{s_{máx}} = 2,03133855 - 0,00320878 \text{ MO} - 0,00076508 \text{ argila}$$

O valor de D_{s_{max}} obtido para o solo estudado foi de 1,53 Mg m⁻³, considerando a camada de 0-20 cm.

3.4 CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA (CRA)

Para gerar a curva de retenção de água (CRA), foi utilizado o banco de dados gerado a partir de estudos já realizados na área anteriormente. Os dados haviam sido obtidos na mesa de tensão nos potenciais de 1, 6 e 10 kPa para determinar a CC, e na Câmara de Richards nas tensões de 33, 100, 500 e 1500 kPa para estimar o PMP (RICHARDS E WEAVER, 1943).

3.5 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO (RP) E CURVA DE RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO (CRP)

Para avaliar a resistência do solo à penetração (RP) foram utilizadas as 90 amostras com estrutura preservada que foram coletadas a campo. Separou-se as 90 amostras em 5 grupos de 18 anéis com o objetivo de buscar variabilidade da densidade do solo dentro da propriedade. Os 18 anéis de cada grupo foram ainda separados em 3 subgrupos com 6 anéis cada, desta forma buscando gerar variabilidade de umidade nas amostras.

Para gerar a CRP, em cada amostra foram selecionados os valores de RP equivalentes à profundidade de 2 até 5 cm.

Todas as amostras de cada grupo, após submetidas a diferentes condições de umidade, passaram por avaliação da RP e posteriormente foram pesadas e levadas para a estufa para obtenção da umidade e Ds.

Figura 15 - Avaliações de RP em laboratório



Fonte: Autor, 2022.

Figura 16 – Amostras de solo sendo secadas em estufa



Fonte: Autor, 2022.

Figura 17 - Pesagem das amostras



Fonte: Autor, 2022.

A CRP foi obtida a partir do ajuste da RP em função do conteúdo de água no solo (θ) e da D_s , seguindo o modelo proposto por Busscher (1990) e de acordo com

os procedimentos descritos por Silva *et. al* (1994), após a CRP foi ajustada no programa estatístico SAS (SAS, 2002).

Para determinar o IHO foram utilizados os valores de 2,0 e 3,0 MPa como limites de RP. Foi obtida uma densidade do solo crítica (Dsc) para cada curva de resistência do solo à penetração (CRP), que poderá ser utilizada como uma referência para manejo de solos com condições similares e para culturas agrícolas de acordo com as suas susceptibilidades.

3.6 DETERMINAÇÃO DO INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO (IHO)

O IHO foi estimado para cada valor de Ds, sendo avaliado como a diferença entre o limite superior e inferior. O limite superior é o menor valor de umidade considerando a θ_{CC} e a θ_{PA} . Já o limite inferior é o maior valor de umidade observado na θ_{RP} ou θ_{PMP} .

O IHO foi determinado de acordo com a metodologia descrita por Silva *et. al* (1994). Para os limites superiores considerou-se: o conteúdo de água retido em tensão de 10 kPa para a θ_{CC} e para a θ_{PA} foi considerado limitante o conteúdo de água no solo de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (GRABLE E SIEMER, 1968). Para os limites inferiores considerou-se: o conteúdo de água no potencial de 1500 kPa para a θ_{PMP} (RICHARDS E WEAVER) e o valor de água em que a θ_{RP} atinge os limites de 2,0 ou 3,0 MPa.

Para o limite superior do IHO, foi adicionada uma linha que considera apenas a PA como limite superior, pelo fato de que a relação da CC com Ds não ter influência sobre as restrições enquanto houver espaço suficiente para a aeração das plantas. Além disso, as plantas absorvem água já em teores de água acima da CC.

Neste trabalho foi adicionado o GC na linha superior do IHO, para verificar alguma correlação deste parâmetro com o comportamento da Ds no IHO, além de servir como base interpretativa adicional.

Após determinar os limites superiores e inferiores do IHO, foi determinada a densidade do solo crítica (Dsc). A Dsc é a densidade em que o IHO se iguala a zero, de forma que o limite superior se iguala numericamente ao inferior (SILVA, *et al.*, 1994). O IHO foi representado graficamente pela área que se encontra entre as funções das umidades críticas, dentro dos limites superiores (θ_{CC} e θ_{PA}) e inferiores (θ_{PMP} e θ_{RP}).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A $D_{s_{max}}$ obtida para o solo estudado foi de $1,53 \text{ Mg m}^{-3}$. Secco (2003) obteve o valor de $1,54 \text{ Mg m}^{-3}$, avaliando um Latossolo Vermelho com 61% de argila e 29% de silte, teores similares aos da área avaliada ne.

A distribuição estatística e os valores dos atributos físicos avaliados para a determinação do IHO, estão representados na Tabela 1. O alto coeficiente de variação da RP é atribuído a amplitude de variação natural da D_s , além do gradiente de umidade em que as amostras foram submetidas.

Essa variação da D_s é atribuída também à variabilidade que foi buscada durante a realização das coletas. O menor valor de densidade encontrado foi de $1,1 \text{ Mg m}^{-3}$ indicando um GC de 71%, e a maior densidade obtida foi de $1,49 \text{ Mg m}^{-3}$ com um GC de 96%.

A maior RP obtida foi de 6,77 MPa, valor similar aos obtidos por Tormena *et al.* (2007) avaliando um Latossolo Vermelho distroférico. Os altos índices de RP são atribuídos às amostras coletadas em locais onde entram as máquinas na propriedade, onde ficam estacionadas e também em linhas de passagem do trator dentro da propriedade. Além disso, nestes locais os maiores valores de RP foram obtidos na camada de 10-20 cm, indicando problemas físicos e compactação subsuperficial causada pelo intenso tráfego de máquinas.

Tabela 1 - Estimadores dos parâmetros para as variáveis físicas do solo determinadas nas amostras com estrutura preservada.

Variável	Média	Desvio-padrão	Mínimo	Máximo	CV
RP	2,764	1,578	0,310	6,770	57,11
D_s	1,275	0,085	1,110	1,490	6,670
θ	0,322	0,090	0,170	0,550	28,00

RP = Resistência do solo à penetração (MPa);

θ = Umidade volumétrica do solo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$);

D_s = densidade do solo (Mg m^{-3}); CV = coeficiente de variação (%); n = 90.

$R^2 = 0,7$.

Em contraste, a menor RP medida foi de 0,31 MPa, os menores valores de RP estão relacionados a locais dentro da propriedade que possuem uma qualidade física muito boa, com solo bem estruturado, maior quantidade de MO e geralmente apresentam maior produtividade das plantas cultivadas.

Tabela 2 - Estimadores dos parâmetros da regressão linearizada, para a resistência à penetração (RP) em função da umidade volumétrica do solo (θ) e da densidade do solo (Ds): $\log_{10}RP = \log_{10} a + b \log_{10}\theta + c \log_{10}Ds$.

	Parâmetro	Erro - padrão	Probabilidade ⁽¹⁾
a	-0,8910	0,1051	0,0001
b	-1,4656	0,1448	0,0001
c	4,8675	0,6332	0,0001

(1) Probabilidade de erro para os valores estimados dos parâmetros.

Através das estimativas dos coeficientes apresentados na Tabela 2, foi então determinada a curva de resistência à penetração. Para obter a CRP foi utilizado uma equação de ajuste através de modelo linearizado, representado na Equação 1 juntamente com as resoluções.

(Equação 1)

$$\log_{10}RP = \log_{10} a + b \log_{10}\theta + c \log_{10}Ds$$

$$RP = 10^{(-0,89104 - 1,46568 \log_{10} \theta + 4,86753 \log_{10} Ds)}$$

$$RP = \frac{10^{-0,89104}}{10^{1,465668 \log \theta} \times 10^{-4,86753 \log Ds}}$$

$$RP = 10^{-0,89104} \times \theta^{-1,46568} \times Ds^{4,86753}$$

$$RP = 0,128516 Ds^{4,86753} \times \theta^{-1,46568}$$

Para determinar o conteúdo de água em que a RP atingiu 2,0 MPa e 3,0 MPa, foi utilizada a Equação 2, que foi reformulada a partir da Equação 1.

(Equação 2)

$$\theta = (RP / (0,128516 Ds^{4,86753}))^{1/1,46568}$$

Para estimar a umidade na capacidade de campo foi utilizada a Equação 3, através dos parâmetros da regressão linear representados na Tabela 3.

(Equação 3)

$$\theta_{CC} = 0,20033 + 0,13834 Ds$$

O modelo linear gerado para estimar os parâmetros de umidade na CC explicou 33% da variabilidade do conteúdo de água e demais coeficientes obtidos, sendo considerado um ajuste não totalmente satisfatório. Porém, a CC não tem tanta significância no modelo gerado pelo fato de ela não ser considerada como limitante do crescimento das plantas. Os parâmetros gerados estão representados na Tabela 3.

Tabela 3 - Estimadores dos parâmetros da regressão linear, para a umidade na capacidade de campo (θ) no potencial de - 0,01 MPa em função da densidade do solo (Ds): $\theta_{CC} = 0,20033 + 0,13834 Ds$.

	Parâmetro	Erro - padrão	Probabilidade ⁽¹⁾
a	0,20033	0,08059	0,0287
b	0,13834	0,05706	0,0321

(1) Probabilidade de erro para os valores estimados dos parâmetros.
 $R^2 = 0,33$; $CV = 6,54\%$.

Para estimar a variação de umidade no PMP foi utilizada a Equação 4, formulada através dos coeficientes gerados na Tabela 4.

(Equação 4)

$$\theta_{PMP} = - 0,00018 + 0,17931 Ds$$

O modelo linear gerado para a umidade no PMP foi capaz de explicar 97% da variabilidade das amostras. Os coeficientes estão descritos na Tabela 4.

Tabela 4 - Estimadores dos parâmetros da regressão linear, para a umidade no ponto de murcha permanente (θ) no potencial de -1,5 MPa em função da densidade do solo (D_s): $\theta_{PMP} = - 0,00018 + 0,17931 D_s$

	Parâmetro	Erro - padrão	Probabilidade ⁽¹⁾
a	-0,00018	0,00653	0,9771
b	0,17931	0,00471	0,0001

(1) Probabilidade de erro para os valores estimados dos parâmetros.
 $R^2 = 0,97$; $CV = 1,11$ %.

O Gráfico 1 apresenta a distribuição do IHO para o solo estudado, determinando a RP de 2 MPa como limite crítico.

A área em azul escuro representa o IHO determinado usualmente com a CC como limite superior, a área em azul claro representa o IHO considerando apenas a PA como limite superior. Considerar apenas a PA como limite superior se justifica pelo fato de que a umidade CC não ser limitante para as plantas, a umidade acima da CC só irá gerar limitações quando esse aumento do teor de água não disponibilizar espaço suficiente (10%) para a difusão de gases.

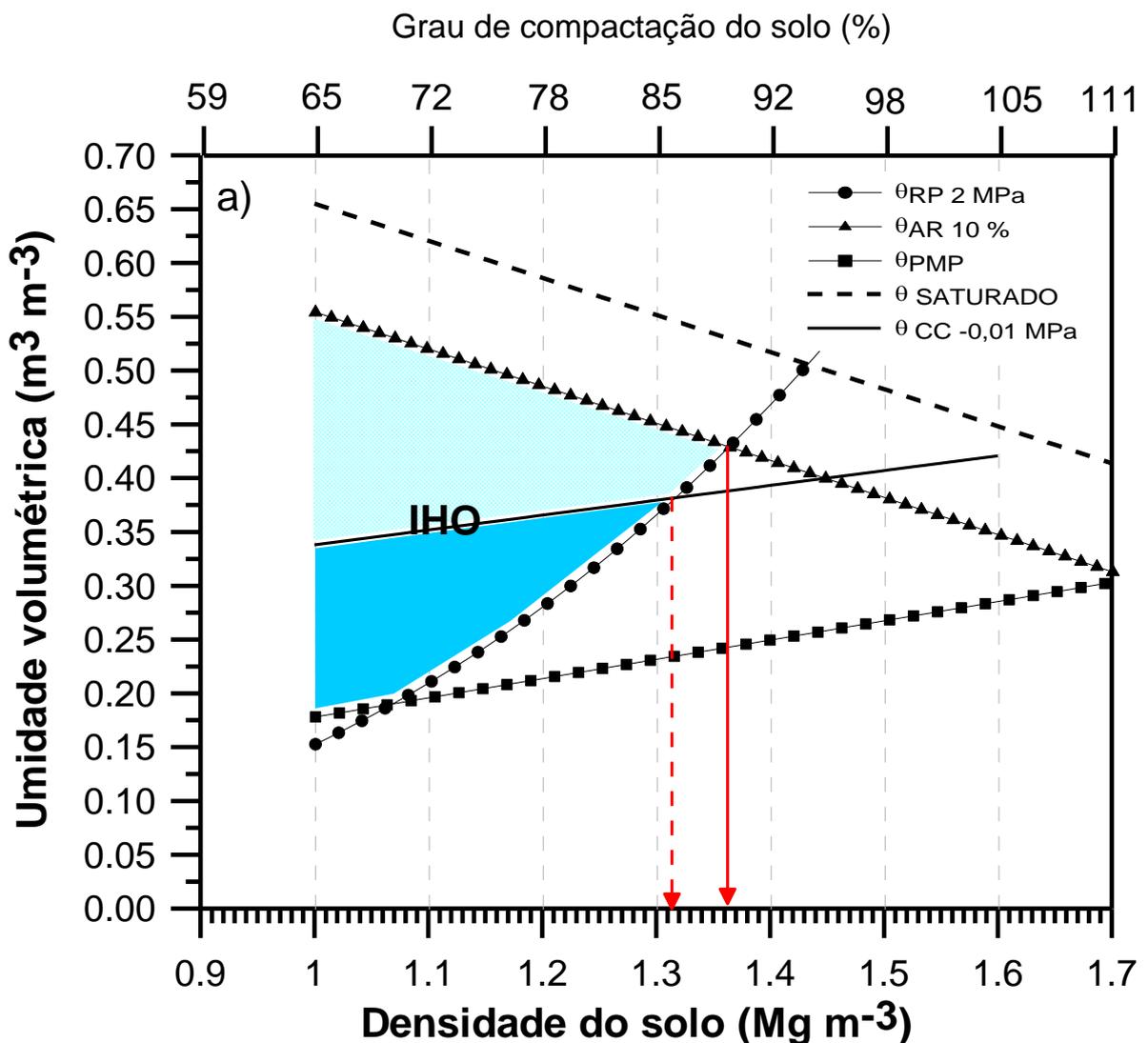
Considerando a CC como limite superior, o momento em que o IHO se torna nulo foi na densidade de $1,31 \text{ Mg m}^{-3}$, sendo essa a D_{sc} para essas condições. Nessa situação 26,4% das amostras apresentaram $D_s > D_{sc}$. Valor similar foi encontrado por Reichert *et al.* (2003) que verificaram valores de D_{sc} entre 1,25 e $1,3 \text{ Mg m}^{-3}$, avaliando solos com mais de 60% de argila e com RP limitante de 2 MPa.

O GC nessa D_{sc} seria de 86%, valor considerado baixo para gerar limitações ao desenvolvimento das plantas. Além disso, essas condições podem favorecer o desenvolvimento ao invés de serem limitantes. Suzuki *et al.* (2007) determinaram que o GC ótimo para o desenvolvimento da soja é 86% para um Latossolo, sendo que algumas culturas são favorecidas com um grau de compactação intermediário.

Se considerada apenas a PA como limite superior nessas condições, a D_{sc} obtida se torna $1,36 \text{ Mg m}^{-3}$ e o GC passa a ser de 89%. Determinando apenas a PA como limite superior a quantidade de amostras com $D_s > D_{sc}$ passaria a ser 13,8%. Em ambos os casos a RP foi o limite inferior do IHO, passando a ser o limite inferior a partir da D_s de $1,05 \text{ Mg m}^{-3}$. Neste caso, a RP foi o limite inferior do IHO em 100% das amostras, se caracterizando altamente sensível ao aumento da D_s .

Porém, em muitos casos a RP de 2 MPa não é suficiente para causar limitações para as plantas, definir a RP de 2 MPa como limitante pode superestimar as condições restritivas. Avaliando a cultura da soja, Klein et al. (2007) verificaram que a RP de 2 MPa não mostrou impedimentos à produtividade da soja. Torres & Saraiva (1999) também sugeriram valores de RP maiores que 2 MPa para avaliar limitações às plantas.

Gráfico 1 - Variação do conteúdo de água no solo na Capacidade de campo (θ_{cc}), Ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), Porosidade de aeração (θ_{PA}) e Resistência do solo à penetração (θ_{RP}) no limite crítico de 2,0 MPa em função da Densidade do solo (D_s). A área em azul corresponde ao Intervalo hídrico ótimo do solo (IHO). A linha superior representa o grau de compactação (GC) em função da D_s .



O IHO mostrou ser um indicador mais preciso nesses limites, se for considerado apenas o cálculo de AD para essas condições, ele seria subestimaria as restrições físicas nessa área em 100% das amostras, pois o PMP foi limitante apenas até a densidade de $1,05 \text{ Mg m}^{-3}$. Mesmo com condições de umidade superiores ao PMP, a RP passa a ser o principal limitante em densidades superiores a $1,05 \text{ Mg m}^{-3}$.

No Gráfico 2 está representado o IHO considerando como limite crítico a RP de 3 MPa, a área hachurada em azul escuro define o IHO considerando a CC e a PA como limite superior, na área azul clara está a representação do IHO definindo apenas a PA como limite superior.

A RP substitui o PMP e começa a ser o limite inferior a partir da Ds de $1,2 \text{ Mg m}^{-3}$, o momento em que o IHO se tornou igual a zero foi na Ds de $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$, sendo essa a Dsc crítica para essas condições. Valor similar ao obtido por Kaiser *et al.* (2009), que encontraram a Dsc de $1,49 \text{ Mg m}^{-3}$ avaliando um Latossolo Vermelho com RP limite de 3 MPa. Também considerando a RP limite de 3 MPa, Rauber (2017) obteve Dsc de $1,42 \text{ Mg m}^{-3}$ em área de Latossolo Vermelho manejada sob SPD.

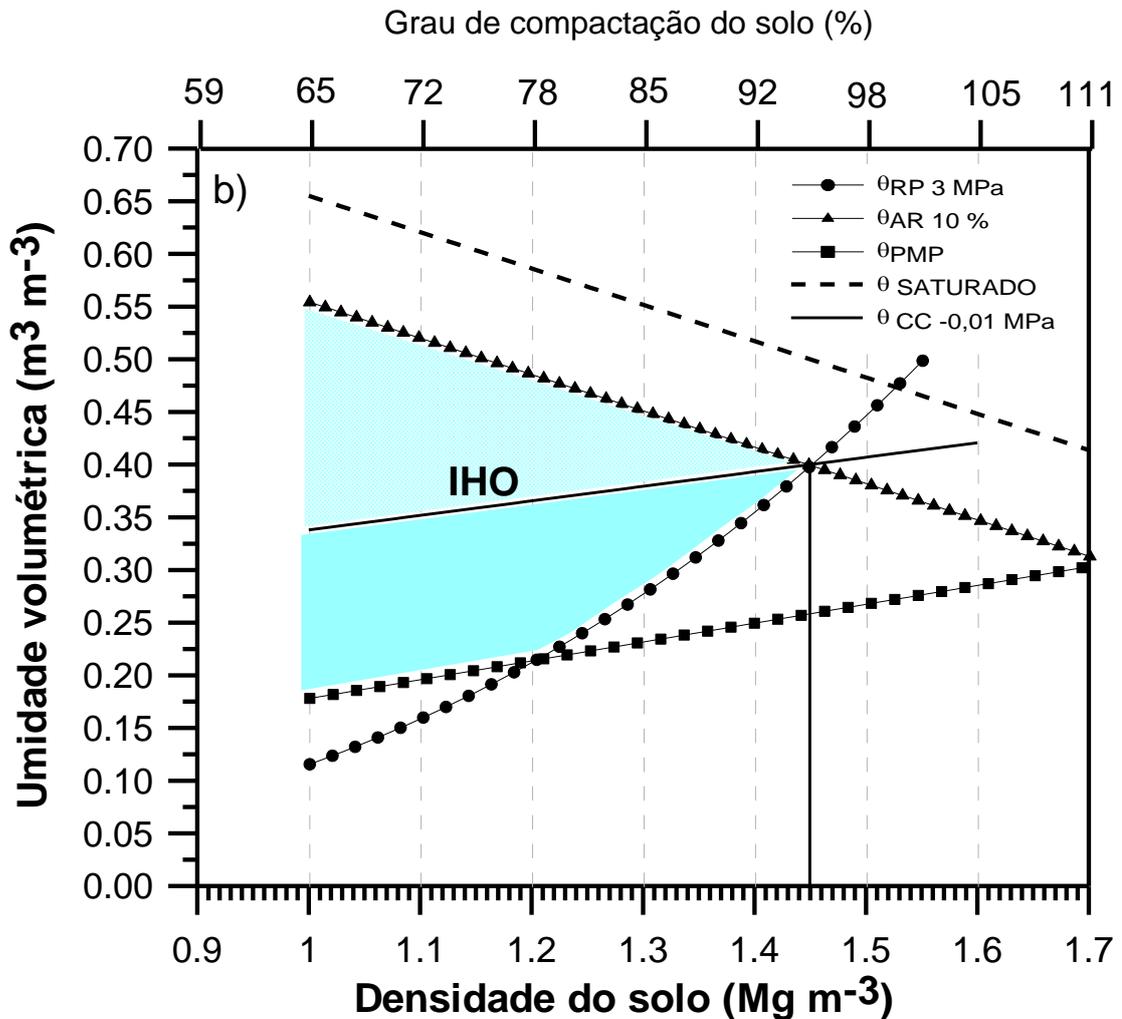
No momento em que é obtida a Dsc nesse modelo, o GC é de 94%, sendo um valor mais restritivo para gerar limitações para as plantas. Considerando a RP de 3 MPa como limite inferior, apenas 5,74% das amostras apresentam $D_s > D_{sc}$, valor mais condizente com a quantidade de amostras coletadas em locais menos favoráveis para o desenvolvimento das culturas.

Porém, valores de RP de 3 MPa nem sempre geram limitações para as plantas, principalmente em áreas manejadas sob sistema de plantio direto com um sistema de manejo consolidado. Ehlers (1983) sugere que para áreas manejadas sob SPD os valores de RP que começam a gerar limitações se encontram entre 4,6 e 5,1 MPa. Torres & Saraiva sugerem valores na faixa de 3,5 a 6,5 MPa para cultura da soja em Latossolos vermelhos argilosos.

Betioli *et al.* (2012) estudando um Latossolo muito argiloso, sugerem que valores de RP na faixa de 3,5 até 4,6 MPa indicam ainda uma boa qualidade física do solo em áreas manejadas sob SPD.

Aumentando o limite de RP para 3 MPa houve uma maior amplitude do IHO, caracterizando condições menos restritivas dentro da área. Da mesma forma que o modelo anterior, o IHO se mostrou um indicador mais sensível que a AD. O cálculo de AD seria eficaz para estimar a disponibilidade de água apenas em densidades inferiores a $1,20 \text{ Mg m}^{-3}$, ou seja, subestimaria as restrições em 82,8% das amostras.

Gráfico 2 - Variação do conteúdo de água no solo na Capacidade de campo (θ_{cc}), Ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), Porosidade de aeração (θ_{PA}) e Resistência do solo à penetração (θ_{RP}) no limite crítico de 3,0 MPa em função da Densidade do solo (D_s). A área em azul corresponde ao Intervalo hídrico ótimo do solo (IHO). A linha superior representa o grau de compactação (GC) em função da D_s .



Fonte: Autor, 2022.

A utilização de apenas a PA como limite superior pode ser mais viável para fins de avaliação do IHO. A CC não causa necessariamente limitações ao desenvolvimento das plantas, teores de umidade acima da CC só irão gerar restrições se não houver volume de PA suficiente.

Além disso, o cruzamento do limite inferior com o superior quando a PA não é limitante, pode definir a D_{sc} em condições de densidades ainda relativamente baixas, que não costumam ser restritivas para as plantas. A exemplo do primeiro modelo de IHO gerado neste trabalho, utilizando a RP limitante de 2 MP observa-se que a CC se

torna o limite superior já na densidade de $1,31 \text{ Mg m}^{-3}$ e GC de 86%, condições que podem inclusive ser benéficas para o desenvolvimento das plantas, ao invés de causarem limitações.

Este fato costuma ocorrer com maior frequência quando são utilizados limites de RP mais baixos. Por esse motivo, é importante levar em consideração os limites de RP e a Ds. Diante disto, Silva e Kay (1994), afirmam que o valor de Ds em que a PA substituiu a CC no limite superior, deve ser levado em consideração para determinar o IHO.

Avaliando um Latossolo vermelho, Silva et. al (2002) observaram que a PA se tornou o limite superior apenas em densidades acima de $1,4 \text{ Mg m}^{-3}$. Geralmente os valores de Dsc obtidas quando a PA é o limite superior e a RP o limite inferior, são mais condizentes com a ocorrência de algum tipo de limitação para as plantas.

Nas duas condições de RP, observou-se um aumento na retenção de água com o aumento da Ds. Fato que é justificado pela redistribuição de poros com o aumento da Ds, reduzindo o número de macroporos e aumentando o volume de microporos que são responsáveis pelo armazenamento de água.

Por outro lado, o IHO foi negativamente correlacionado com o aumento da Ds, principalmente pela influência da CRP. A RP foi o principal limitante do IHO, resultado que corrobora com os obtidos por Tormena *et al.* (1998) e Kaiser *et al.* (2009). A RP é altamente sensível ao aumento da Ds e variações de umidade no solo, por esse motivo que a RP é o maior limitante nas avaliações de IHO.

Considerando que a Ds média obtida na realização das coletas foi de $1,275 \text{ Mg m}^{-3}$, em ambas avaliações o valor médio da Ds da área se encontra abaixo dos valores de Dsc determinados nos modelos.

É importante conhecer qual a propriedade do solo que tem o maior impacto nas limitações para o crescimento das plantas, e desta forma adotar práticas de manejo que possam vir a aumentar o IHO e proporcionar um ambiente mais favorável para o desenvolvimento das culturas. Quando a θ_{PA} se apresentar como limite superior ou a θ_{RP} definir o limite inferior, essas práticas de manejo podem ampliar o IHO.

Considerando que neste trabalho e nas condições estabelecidas o principal limitante foi a RP, práticas de manejo para melhorar a qualidade estrutural do solo podem ter um impacto positivo sobre o desenvolvimento das plantas e aumentar o IHO.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A determinação do IHO para avaliar a qualidade física do solo na área estudada foi satisfatória e a área apresentou estar em boas condições físicas. Porém, em ambos os casos a RP foi o limite inferior do IHO, sendo o parâmetro mais sensível e o que sofre mais influência pelo aumento da Ds e umidade do solo. Pelo fato de o maior limitante ser a RP, podem ser adotadas práticas de manejo para tentar aumentar o IHO nessa área e proporcionar melhores condições físicas para as plantas.

O IHO se mostrou uma ferramenta mais sensível que a AD para determinar a disponibilidade de água e condições restritivas fornecidas para as plantas, desta forma pode ser um indicador mais preciso para avaliar a qualidade física do solo, principalmente por integrar mais fatores de restrição.

Nos dois modelos a Dsc obtida foi inferior as que são encontradas na literatura para esse tipo de solo (1,53 e 1,54 Mg m⁻³). A Dsc média obtida através das amostras foi inferior à gerada pelos modelos, indicando que a área em questão está com uma boa qualidade física do solo.

A utilização do GC como parâmetro adicional neste trabalho foi satisfatória, pois foi possível relacionar os parâmetros utilizados no IHO com os níveis de compactação para o solo estudado. A adição do GC nos modelos do IHO deve ser considerada, pois ele serve como base extra para a interpretação dos resultados.

Com base no GC observado e valores restritivos de Ds encontrados na literatura para este tipo de solo, há indicativos de que a RP de 2 MPa não demonstra ser um limite adequado para avaliar a qualidade física do solo. Principalmente em áreas sob SPD pelo fato da maior presença de bioporos nesse sistema e uma melhor continuidade do sistema poroso, favorecendo o movimento e retenção da água no solo. O GC obtido nesse limite foi de 86%, considerado ainda um teor de compactação favorável para a maioria das culturas.

O limite de RP de 3 MPa foi mais adequado para avaliar as limitações nessas condições de solo, gerando um GC de 97% na Dsc. A quantidade de amostras com Ds>Dsc foi de 5,74% nesses limites, número de amostras condizente ao coletado em áreas com sinais de degradação física do solo.

Pode ser discutido considerar apenas a PA como limite superior do IHO, pois a CC não necessariamente gera limitações em condições de PA maior ou igual a 10%.

As plantas não sofrem limitações quando a umidade está acima da CC, desde que haja espaço suficiente para a aeração. Além disso, a planta absorve água em umidades superiores que a CC, essa umidade adicional pode até ser benéfica desde que não restrinja a PA. Desta forma, apenas a PA realmente restringe o desenvolvimento das culturas. Considerar apenas a PA como limite superior pode proporcionar maior amplitude do IHO principalmente em limites de RP menores, e desta forma apresentar resultados mais condizentes com as condições que são encontradas pelas plantas.

REFERÊNCIAS

- AITA, C.; BASSO, C.J.; CERETTA, C.A.; GONÇALVES, C.N. & ROS, C.O. **Plantas de cobertura de solo como fonte de nitrogênio ao milho.** Revista Brasileira de Ciência do Solo - RBCS, v. 25, p.157-165, 2001.
- BARCELOS, A. A.; CASSOL, E. A. & DENARDIN, J. E. **Infiltração de água em um Latossolo Vermelho-Escuro sob condições de chuva intensa em diferentes sistemas de manejo.** Revista Brasileira de Ciência do Solo - RBCS, v. 23, p. 35-43, 1999.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**, v. 2, p. 7-18, 1999.
- BENGHOUGH, A. G. & MULLINS, C. E. **Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses.** Journal of Soil Science, v. 41, p. 341-358, 1990.
- BETIOLI, E. J.; MOREIRA, W. H.; TORMENA, C. A.; FERREIRA, C. J. B.; SILVA, A. P. DA; GIAROLA, N. F. B. **Intervalo hídrico ótimo e grau de compactação de um Latossolo vermelho após 30 anos sob plantio direto.** Revista Brasileira de Ciência do Solo - RBCS, v. 36, p. 971-982, 2012.
- BLAINSKI, E.; TORMENA, C. A.; GUIMARÃES, R. M. L. & NANNI, M. R. **Qualidade física de um Latossolo sob plantio direto influenciada pela cobertura do solo.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 36, p. 79-87, 2012.
- BRIGGS, L. J.; SHANTZ, H. L. **The wilting coefficient for different plants and its indirect determination.** Washington DC: Department of Agriculture, Bureau of Plants Industries, 83 p., 1912.
- CAMARGO, O. A. & ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas.** Piracicaba, Degaspari, 132 p., 1997.
- CANARACHE, A. **Penetr - a generalized semi-empirical model estimating soil resistance to penetration.** Soil Till. Res., 16:51-70, 1990.
- CASSEL, D. K.; NIELSEN D. R. **Field capacity and available water capacity.** In: KLUTE, A., ed. Methods of soil analysis. 2 ed. Madison, ASA-SSSA, 1986. p. 901-926.
- CASSOL, E. A.; CANTALICE, J. R. B.; REICHERT, J. M. & MONDARDO, A. **Escoamento superficial e desagregação do solo em entr essulcos em solo franco argilo arenoso com resíduos vegetais.** Pesq. Agropec. Bras., v. 39, p. 685-690, 2004.
- CAVALIERI, K. M. V.; TORMENA, C. A.; VIDIGAL FILHO, P. S.; GONÇALVES, A. C. A.; COSTA, A. C. DA. **Efeito de sistemas de preparo nas propriedades físicas de**

um Latossolo Vermelho distroférico. Revista Brasileira de Ciência do Solo - RBCS, v. 30, p. 137-147, 2006.

COSTA, F. S.; ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; FONTOUR A, S. M.V. & WOBETO, C. **Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas: plantio direto e preparo convencional.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 27, p. 527-535, 2003.

DE MARIA, I. C.; CASTRO, O. M. & DIAS, H. S. **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, p. 703-709, 1999.

EHLERS, W.; KOPKE, U.; HESSE, F. & BOHM, W. **Penetration resistance and root growth of oats in the tilled an untilled loess soil.** Soil. Till. Res., v. 3, p. 261-275, 1983.

FEBRAPDP. Evolução sob Plantio Direto – 1972 a 2018. **Área sob Plantio Direto.** Disponível em: <https://febrapdp.org.br/area-de-pd>. Acesso em: 06 jul. 2022.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C. A.; ALVES, S. J. **Intervalo hídrico ótimo de um Latossolo vermelho distrófico, após o primeiro período de pastejo contínuo de *Brachiaria ruziziensis*, em sistema integração Lavoura-Pecuária.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 37, p. 775-783, 2013.

FRANCHINI, J. C.; COSTA, J. M. DA; DEBIASI, H.; TORRES, E. **Importância da rotação de culturas para a produção agrícola sustentável no Paraná.** Londrina – PR. Embrapa Soja, 2011.

GLINSKI, J. & LIPIEC, J. **Soil physical conditions and plant roots.** Boca Raton, CRC Press, 1990. 248p.

GRABLE, A. R. & SIEMER, E. G. **Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots.** Soil Sci. Soc. Am. J., v. 32, p. 180-186, 1968.

GROHMANN, F; QUEIROZ NETO, J. P. **Efeito da compactação artificial de dois solos limo-argilosos sobre a penetração de raízes de arroz.** Bragantina, v. 25, n.38, p. 421-431. Campinas, dez. 1966.

HERRICK, J. E.; JONES, T. L. **A dynamic cone penetrometer for measuring soil penetration resistance.** Soil Science Society of American Journal, v. 66, p. 1320-1324, 2002.

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, v. 33, p. 845-855, 2009.

KAY, B. D. **Rates of changes of soil structure under different cropping systems.** Adv. Soil Sci., v. 12, p. 1-51, 1990.

KLEIN, V. A.; CAMARA, R. K. **Rendimento da soja e Intervalo hídrico ótimo em Latossolo vermelho sob plantio direto escarificado.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 31, p. 221-227, 2007.

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.

KÖPPEN, W. **Grundriss der Klimakunde: outline of climate science.** Walter de Gruyter, p. 388, Berlin, 1931.

LEÃO, T. P. **Intervalo hídrico ótimo em diferentes sistemas de pastejo e manejo da pastagem.** 2002. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Universidade de São Paulo, Piracicaba, dez. 2002.

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

MARCOLIN, D. C.; KLEIN, V. A. **Determinação da densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima.** Acta Scientiarum. Agronomy. Maringá, v.33, n.2, p. 349-354, 2011.

MEROTTO, A.; MUNDSTOCK, C. M. **Wheat root growth as affected by soil strength.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa-MG, v.23, p.197-202, 1999.

MOREIRA, F. R.; DECHEN, S. C. F.; SILVA, A. P.; FIGUEIREDO, G. C.; DE MARIA, I. C.; PESSONI, P. T. **Intervalo hídrico ótimo em um Latossolo vermelho cultivado em sistema de semeadura direta por 25 anos.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 38, p.118-127, 2014.

PABIN, J.; LIPIEC, J.; WLODEK, S.; BISKUPSKI, A. & KAUS, A. **Critical soil bulk density and strength for pea seedling root growth as related to other soil factors.** Soil Till. Res., 46:203-208, 1998.

PAVINATO, A.; AITA, C.; CERETTA, C.A. & BEVILÁQUA, G.P. **Resíduos culturais de espécies de inverno e o rendimento de grãos de milho no sistema de cultivo mínimo.** Pesq. Agropec. Bras., Brasília, v.29, n.9, p.1:427-432, set. 1994.

PEREIRA, A. A.; HUNGRIA, M.; FRANCHINI, J. C.; KASCHUK, G.; CHUEIRE, L. M.O.; CAMPO, R. J.; TORRES, E. **Variações qualitativas e quantitativas na microbiota do solo e na fixação biológica do nitrogênio sob diferentes manejos com soja.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 31, n. 6, p.1397-1412, 2007.

RABOT, E.; WIESMEIER, M.; SCHLÜTER, S.; VOGEL, J. H. **Soil structure as an indicator of soil functions: A review.** Geoderma, v. 314; pg 122-137; 2018.

RAUBER, L. R. **Avaliação da qualidade física do solo em sistema integrado de produção agropecuária leiteiro.** Trabalho de conclusão de curso, Curso de Agronomia, Universidade Federal da Fronteira Sul, Cerro Largo, 2017.

REICHARDT, K., TIMM, L. C. **Água e Sustentabilidade no Sistema Solo-planta-atmosfera.** Disponível em: Minha Biblioteca, Editora Manole, 2016.

- REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. & BRAIDA, J.A. **Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas.** Ci. Amb., 27:29-48, 2003.
- RICHARDS, L. A. **Physical conditions of water in soil.** In: BLACK, C. A.; EVANS, D. D.; WHITE, J. L.; ENSMINGE, L. E. & CLARK, F. E. ed. Methods of soil analysis – Physical and mineralogical properties, including statistics of measurements and sampling. Madison, ASA/SSSA, 1965. p.128-152.
- RICHARDS, L. A., WEAVER, L. R. **Fifteen-atmosphere percentage as related to the permanent wilting point.** Soil Sci. 56, 331–339, 1943.
- SAVAGE, M. J.; RITCHIE, J. T.; LAND, W. L.; DUGAS, W. A. **Lower limit of soil water availability.** Agron. J., v. 88, p. 644-651, 1996.
- SCHÄFER, M. J.; REICHERT, J. M.; REINERT, D.J. & CASSOL, E. A. **Erosão em entressulcos em diferentes preparos e estados de consolidação do solo.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 25, p. 431-441, 2001.
- SECCO, D. **Estados de compactação e suas implicações no comportamento mecânico e na produtividade de culturas em dois Latossolos sob plantio direto.** Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.
- SILVA, V. R. DA. **Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação.** 2003. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.
- SILVA, A. P. DA; KAY, B. D.; PERFECT, E. **Characterization of the least limiting water range.** Soil Science Society of American Journal, v. 58, p. 1775-1781, 1994.
- SILVA, A. P. DA; TORMENA, C. A.; DIAS JUNIOR, M, SOUZA.; IMHOFF, S.; KLEIN, V. A. **Indicadores da qualidade física do solo.** Física do solo, cap. VII, pg. 241-280. SCBS, 2010.
- SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L.; CAMARGO, O. A. **Influência da compactação nas propriedades físicas de dois Latossolos.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v.10, n.1, p.91-95, 1986.
- SILVA, R. H.; ROSOLEM, C. A. **Crescimento radicular de soja em razão da sucessão de cultivos e da compactação do solo.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 37, p. 855-860. 2002.
- SOJKA, R. E. **Stomatal closure in oxygen-stressed plants.** Soil Science Society of America Journal, v.154, p.269-280, out. 1992
- SOUZA, M. S. **Caracterização do Intervalo hídrico ótimo de três solos da região norte fluminense.** Dissertação (Mestrado em produção vegetal) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes – RJ, abr. 2004.

SUZUKI, L. E. A. S.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. & LIMA, C. L. R. **Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo.** Pesq. Agropec. Bras., v.42, p. 1159-1167, 2007.

TAYLOR, H. M.; ROBERSON, G. M. & PARKER JR, J. J. **Soil strength-root penetration relations to medium to coarse textured soil materials.** Soil Science, v. 102, p. 18-22, 1966.

TORRES, E.; SARAIVA, O. F. **Camadas de impedimento do solo em sistemas agrícolas com a soja.** Londrina, Embrapa Soja, 1999. 58p. (Circular Técnica, 23).

TORMENA, C. A.; ARAÚJO, M. A.; FIDALSKI, J. & COSTA, J. M. **Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférico sob sistemas de plantio direto.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 31, p. 211-219, 2007.

TORMENA, C. A.; BARBOSA, M. C.; COSTA, A. C. S.; GONÇALVES, A. C. A. **Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo.** Scientia Agricola v. 59, n.4, p.795-801, out/dez, 2002.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L.; **Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo roxo sob plantio direto.** Revista Brasileira de Ciência do Solo - RBCS, v. 22, p. 573-581, 1998.

VIEHMEYER, F. J. & HENDRICKSON, A. H. **Soil moisture conditions in relation to plant growth.** Plant Physiol., v. 2, p. 71-78, 1927.

WU, L.; SWAN, J. B.; PAULSON, W. H., RANDALL, G. W. **Tillage effects on measured soil hydraulic properties.** Soil Till. Res., v. 25, p. 17-33, out. 1992.

XU, X.; NIEBER, J. L. & GUPTA, S. C. **Compaction effects on the gas diffusion coefficients in soil.** Soil Sci. Soc., Am. J., v. 56, p. 1743-1750, 1992.