



Efeito do tempo de escarificação sobre o Intervalo Hídrico Ótimo em um Latossolo argiloso

Chiselling time effect on the last limiting water range in a clayey Rhodic Eutrudox

Felipe Puff Dapper, Vanderlei Rodrigues da Silva, Felipe Bonini da Luz, Daniel Aquino de Borba, Maxuel Fellipe Nunes Xavier, Gerry Rieth

RESUMO: A modelagem matemática dos atributos físicos do solo pode ser útil para integrar os resultados de vários indicadores de qualidade. O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito manejo sobre o intervalo hídrico ótimo (IHO) em um Latossolo argiloso. O estudo foi realizado em cinco áreas distintas: floresta nativa (FN), solo escarificado (ESC), SPD-3, SPD-10 e SPD-20, correspondendo respectivamente a 3, 10 e 20 anos após a escarificação do solo. Foram coletadas amostras de solo com cilindros metálicos num total de vinte pontos de amostragem em cada manejo do solo em três profundidades: 0 - 5, 10 - 15 e 25 - 30 cm. Foi realizado o ajuste da equação que estima a resistência a penetração em função da umidade e da densidade do solo. A amplitude do IHO foi obtida pela diferença entre os limites superior e inferior da IHO. O manejo ESC alterou a estrutura física do solo, exercendo uma influência positiva sobre o IHO. A amplitude do IHO e a densidade crítica são diretamente influenciadas pelo valor da resistência à penetração considerada crítica. O solo de textura argilosa mantido em plantio direto contínuo por 20 anos não apresentou compactação relativa prejudicial ao desenvolvimento de raízes.

Palavras-chave: Plantio direto. Resistência a penetração. Densidade crítica.

ABSTRACT: Mathematical modeling of soil physical attributes can be useful for integrating the results of various quality indicators. The objective of this study was to evaluate the effect of soil management practices on the breadth of the least limiting water range (LLWR) in a clayey Rhodic Eutrudox. The study was carried out in five distinct areas: native forest (FN), no-tillage four months last chiselling (ESC), SPD-3, SPD-10, and SPD-20, corresponding 3, 10, and 20 years of no-till after soil chiselling, respectively. Soil samples were collected with metallic rings in a total of twenty sampling points in each land use at three depths: 0 - 5, 10 - 15, and 25 - 30 cm. The adjustment of equation that estimate the soil penetration resistance as a function of waater content was carried out. The range of LLWR was obtained by the difference between the upper and lower limits of the LLWR. The CH soil management altered the soil physical structure with a positive influence on the LLWR. The range of the LLWR and critical bulk density are directly influenced by the critical value of soil penetration resistance. Clayey soil maintained under continuous no-tillage for 20 years do not present a degree of soil compaction that is harmful to root development.

Keywords: No-tillage. Soil penetration resistance. Critical bulk density.

Autor correspondente: Felipe Dapper
E-mail: felipe.pdapper@gmail.com

Recebido em: 02/08/2023
Aceito em: 16/04/2024

1 INTRODUÇÃO

A modelagem matemática dos atributos físicos pode ser utilizada para quantificar a qualidade física do solo. Diante disso, destaca-se o método Intervalo Hídrico Ótimo (IHO), que tem recebido grande atenção por permitir a identificação da densidade crítica do solo (TAVANTI *et al.*, 2019). Além disso, o IHO é considerado uma ferramenta útil para quantificar a qualidade física do solo sob diferentes práticas de manejo (BARETA JUNIOR *et al.*, 2022).

Para relaizar o cultivo em áreas de plantio direto o solo é intensamente trafegado durante todo o ciclo de desenvolvimento da cultura (MORAES *et al.*, 2019). As condições de umidade em que o solo se encontra quando é trafegado geralmente favorecem a deformação, assim a alteração da estrutura do solo é praticamente inevitável com a redução do espaço poroso (MORAES *et al.*, 2014). Essas alterações causam restrição no desenvolvimento radicular, o que pode reduzir a produtividade da cultura (RODRIGUES *et al.*, 2017).

O termo compactação refere-se a uma deformação que ocorre no solo com à aplicação de uma carga sobre a superfície, que resulta no aumento da densidade devido à redução do volume ocupado pelo espaço poroso (SUZUKI *et al.*, 2022). Portanto, as plantas apresentam redução no tamanho das raízes, com menor volume de solo explorado para extrair água e nutrientes, ficando mais suscetíveis a períodos de deficiência hídrica (RODRIGUES *et al.*, 2017; MORAES *et al.*, 2018).

As culturas mais suscetíveis têm o crescimento radicular limitado quando a resistência do solo à penetração é superior a 2 MPa, sendo assim, o cultivo é inviável para as áreas sob plantio direto com solo de textura argilosa, uma vez que, estas áreas apresentam resistência do solo à penetração acima de 2 MPa (KAISER *et al.*, 2009). Entretanto, as principais culturas da região sul do Brasil cultivadas em plantio direto são soja, milho e trigo que toleram nível máximo de resistência à penetração igual a 3,5 MPa sem restringir significativamente o crescimento radicular (TAVARES FILHO *et al.*, 2001; MORAES *et al.*, 2014).

A escarificação do solo é uma prática utilizada para aumentar a porosidade e diminuir a densidade, melhorando a qualidade física do solo compactado. No entanto, os efeitos da escarificação se mantêm por prazo relativamente curto, considerando a magnitude de um sistema de plantio direto (DRESCHER *et al.*, 2016). Portanto, é necessário determinar com maior precisão como o manejo pode influenciar a densidade do solo em sistemas de plantio direto de longo prazo, para auxiliar na tomada de decisão sobre utilizar a escarificação para melhorar a qualidade física do solo (SEKI *et al.*, 2015).

A hipótese deste estudo é que áreas cultivadas sob plantio direto por um período de vinte anos não apresentam limites críticos de densidade do solo com níveis prejudiciais às plantas, sendo possível dispensar a escarificação do solo para aumentar a amplitude do Intervalo Hídrico Ótimo (IHO). O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito do manejo do solo sobre o IHO considerando os valores de resistência crítica à penetração iguais a 2,5; 3 e 3,5 MPa em um Latossolo Vermelho argiloso sob diferentes tempos de uso em plantio direto contínuo após a escarificação.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 DESCRIÇÃO DAS ÁREAS AVALIADAS

O estudo foi realizado no ano de 2019 no município de Seberi localizado no estado do Rio Grande do Sul, Brasil, em áreas conduzidas sob sistema de plantio direto com rotação de culturas. As

principais culturas implantadas em cultivo anual são: soja (*Glicine max*) ou milho (*Zea mays*) no verão e trigo (*Triticum aestivum*) ou aveia preta (*Avena strigosa*) no inverno.

O clima local é subtropical úmido (Cfa), segundo a classificação de Köppen. As áreas em que o estudo foi realizado situam-se a uma altitude média de 530 m, com uma temperatura média anual de 19,57°C. A precipitação média anual acumulada é de 1880 mm. O relevo é suavemente ondulado em grandes extensões com declives de 3 e 8%. O solo é classificado como Latossolo Vermelho distrófico de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação com critérios estabelecidos por Santos *et al.*, (2018), correspondendo a um Rhodic Eutradox (SOIL SURVEY STAFF, 2014), apresenta 550 g kg⁻¹ de argila, 330 g kg⁻¹ de silte e 120 g kg⁻¹ de areia.

Este estudo foi realizado por meio de amostras coletadas no mês de junho em cinco áreas mantidas com diferentes manejos: uma área de floresta nativa (FN) constituída por um fragmento de Mata Atlântica e quatro áreas sob diferentes tempos de plantio direto após a escarificação, quatro meses após a escarificação do solo (ESC), três anos de plantio direto após a escarificação (SPD-3), dez anos de plantio direto após a escarificação (SPD-10) e vinte anos de plantio direto após a escarificação (APD-20). Todas as áreas cultivadas têm um período superior a vinte anos de plantio direto, entretanto, foram submetidas a escarificação. As amostras de solo não deformado foram coletadas em anéis metálicos com 50 mm de diâmetro, 50 mm de altura e volume de 100 cm³. As amostras foram coletadas em vinte pontos amostrais em cada área, em três profundidades: 0-5, 10-15 e 25-30 cm, completando um total de 60 amostras em cada área.

2.2 ANÁLISE FÍSICA DO SOLO

Em laboratório, as amostras foram saturadas e submetidas à tensão de 6 kPa em mesa de tensão por 48 horas, após esse período as amostras foram pesadas para determinação da macroporosidade, conforme Teixeira *et al.*, (2018). Para determinar os valores que compõem a resistência à penetração, as amostras foram separadas em quatro grupos com quinze amostras em cada grupo e foram submetidas à secagem controlada ao ar no laboratório. As amostras foram pesadas diariamente, até atingir a massa ideal. O primeiro grupo perdeu 5g de água, o segundo grupo perdeu 10g de água, o terceiro grupo perdeu 15g de água e o quarto grupo perdeu 20g de água. Após a secagem controlada as amostras foram submetidas ao teste de resistência a penetração em um penetrômetro de bancada.

2.3 COMPACTAÇÃO RELATIVA DO SOLO

A densidade máxima foi determinada através de um ensaio uniaxial realizado no consolidômetro automático. Para a determinação da densidade máxima, foram coletadas duas amostras extras em cada área, utilizando cilindros metálicos com 50 mm de diâmetro e 51 mm de altura, nas profundidades de 0-5 cm e 20-25 cm, totalizando 10 amostras extras. Estas amostras foram separadas em cinco grupos com duas amostras em cada grupo, submetidas à secagem controlada ao ar, as amostras do primeiro grupo permaneceram saturadas, as amostras do segundo grupo perderam 5g de água, as amostras do terceiro grupo perderam 10g de água, as amostras do quarto grupo perderam 15g de água e o quinto grupo perdeu 20g de água. Após secagem controlada ao ar, as amostras foram submetidas ao teste uniaxial num consolidômetro para determinar a densidade máxima (Figura 1), aplicando a pressão de 1600 kPa de acordo com Reichert *et al.*, 2009. A densidade máxima é descrita a seguir (Figura 1):

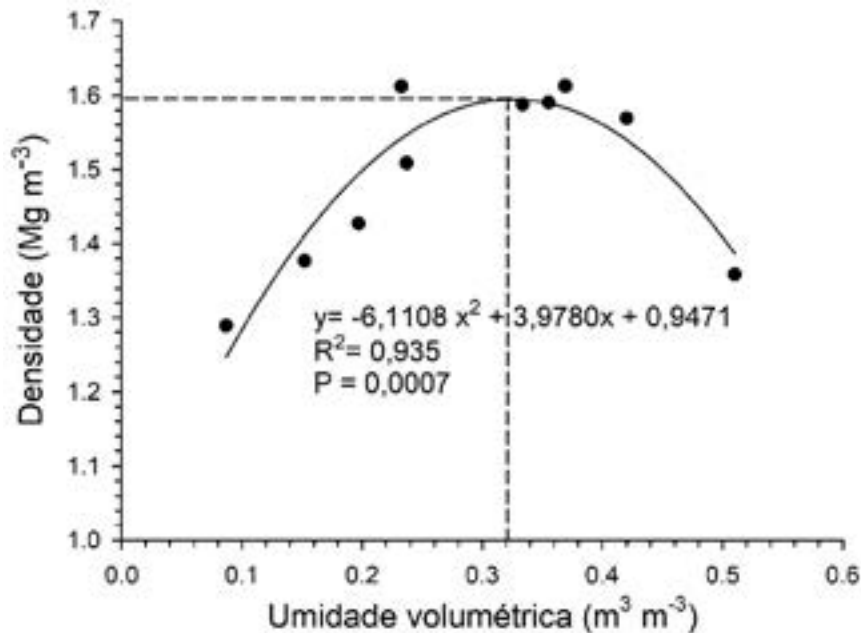


Figura 1. Densidade máxima em função da umidade do solo, determinada pela pressão de 1600 kPa aplicada no teste uniaxial.

A densidade máxima de referência é igual a $1,59 \text{ Mg m}^{-3}$. Foi estimada como uma função do teor de água ótimo para a compactação do solo igual a $0,33 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. O cálculo da compactação relative está descrito a seguir (Equação 1):

2.4 Modelagem matemática do intervalo hídrico ótimo (IHO)

A resistência à penetração (RP) é descrita como uma relação funcional entre a densidade do solo (D_s) e o teor de água do solo (θ), os valores de resistência à penetração observados foram obtidos em um penetrômetro de bancada e ajustados, através de um método quantitativo, ao modelo não linear proposto por Busscher (1990), descrito a seguir (Equação 2):

Em que: RP é a resistência a penetração (MPa); θ é o conteúdo volumétrico de água ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); D_s é a densidade do solo (Mg m^{-3}); “a”, “b” e “c” são os parâmetros empíricos do modelo.

O teor de água (θ) cuja resistência à penetração (RP) do solo apresentou valores 2,5; 3 e 3,5 MPa foi determinado pelo reajuste da equação 2 descrita a seguir (Equação 3):

Os valores do teor de água na capacidade de campo (θ_{CC}) foram obtidos na tensão de 6 kPa em uma mesa de tensão e o ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) foi obtido num psicrômetro WP4 na tensão de 1500 kPa. A porosidade de aeração (θ_{PA}), foi determinada no teor de água do solo com 10 % de espaço poroso preenchido com ar. A amplitude do IHO foi determinada pela diferença entre o limite superior e o limite inferior. O limite superior é determinado pelo teor de água na capacidade de campo (θ_{CC}) ou na porosidade de aeração (θ_{PA}), o que for menor. O limite inferior é determinado pelo teor de água no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) ou do teor de água na resistência crítica à penetração do solo (θ_{RP}), o que for menor.

O ajuste do modelo para resistência à penetração, $RP = a D_s^b \theta^c$ descrito por Busscher (1990), foi realizado para os parâmetros empíricos “a”, “b” e “c” utilizando a função “nls” do pacote *Stats* (R CORE TEAM, 2021). Os parâmetros estimados são descritos a seguir (Tabela 1):

Tabela 1. Parâmetros estimados do modelo de regressão de acordo com Busscher (1990) para a resistência do solo à penetração (RP) em função do teor de água do solo (θ) e da densidade do solo (D_s): $PR = a D_s^b \theta^c$, onde “a”, “b” e “c” são parâmetros empíricos do modelo.

Parâmetros	Estimado	Erro padrão	t	P-valor*	R ²
a	0,581	0,085	6,841	<0,0001	
b	2,935	0,276	10,603	<0,0001	0,73
c	-1,084	0,089	-12,118	<0,0001	

* Significância dos valores estimados dos parâmetros empíricos do modelo.

A equação ajustada, que estima a resistência crítica à penetração (RP) em função da densidade do solo (D_s) e do teor de água (θ) (Equação 2) está descrita a seguir:

A equação para o teor de água (θ), em que o solo atingiu a resistência à penetração (RP) igual a 2,5; 3 e 3,5 MPa (Equação 3) está descrita a seguir:

2.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

O valores de amplitude do Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) para as cinco áreas analisadas (FN, ESC, SPD-3, SPD-10 e SPD-20), considerando três valores de resistência crítica a penetração (2,5; 3 e 3,5 MPa), foram submetidos a análise de variância (Tabela 2), realizada em esquema fatorial 5 x 3 (Manejo x Resistência a Penetração) com o pacote *ExpDes.pt* (R CORE TEAM, 2021). As medias da amplitude do IHO (Figura 4), foram comparadas utilizando o teste Skott-Knott através do Software R com o pacote *ExpDes.pt* (R CORE TEAM, 2021).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 DENSIDADE CRÍTICA E GRAU DE COMPACTAÇÃO DO SOLO

Neste estudo a compactação relativa do solo e a densidade crítica foram utilizados como indicadores físicos de qualidade do solo. Assim, a compactação relativa do solo foi igual a 74, 80, e 90% determinada de acordo com as respectivas densidades críticas de 1,2; 1,3 e 1,38 Mg m⁻³ (Figura 2). Consequentemente, as restrições físicas ao crescimento radicular ocorrem quando a densidade do solo é superior a densidade crítica determinada pelo IHO (SOUZA *et al.* 2022).

A amplitude do IHO é influenciada pelo aumento da resistência penetração (RP) de 2,5 MPa para 3 MPa e 3,5 MPa, em que acontece o aumento do valor da densidade crítica do solo de 1,2 para 1,3 e 1,38 Mg m⁻³ respectivamente, determinados pelo IHO (Figura 2). As práticas de manejo adotadas no plantio direto exercem influência sobre a densidade do solo e consequentemente sobre a amplitude do IHO, desta forma, valores de densidade menores do que a densidade crítica não oferecem restrições físicas ao desenvolvimento radicular (KAHLON; CHAWLA, 2017).

A resistência à penetração igual a 3,5 MPa, na qual, a densidade crítica é igual a 1,38 Mg m⁻³, corresponde a compactação relativa do solo igual a 86% (Figura 2C) o que não afeta a produtividade do milho cultivado sob plantio direto (BARETA JUNIOR *et al.*, 2022). Resultado semelhante foi encontrado

para a cultura da soja, conduzida sob plantio direto em solo de textura argilosa, o valor de resistência à penetração igual a 3,5 MPa não causou restrições ao desenvolvimento radicular da cultura (MORAES *et al.*, 2014).

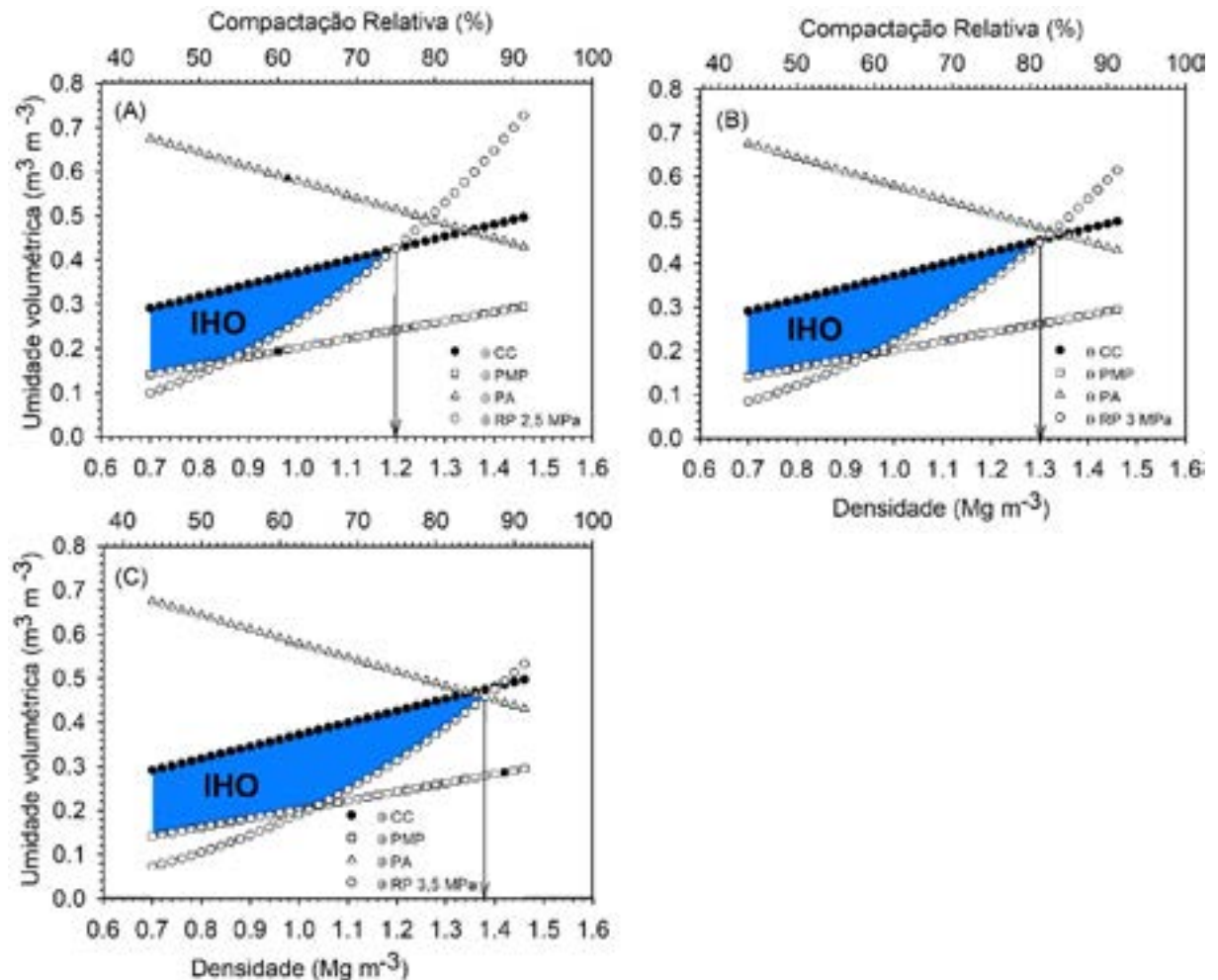


Figura 2. Variação do Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) representada pela cor azul na área sombreada em função da resistência do solo à penetração (θ_{RP}) 2,5 (A); 3 (B) e 3,5 MPa (C). Capacidade (θ_{CC}), Ponto de Murcha Permanente (θ_{PMP}), Porosidade de Aeração (θ_{PA}), as setas verticais indicam o valor da densidade crítica do solo.

O Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) é determinada pelos valores de densidade e umidade, em que, o solo apresenta os valores de resistência à penetração de 2,5; 3 e 3,5 MPa mostrando que, para um mesmo manejo a amplitude do IHO aumenta com a maior resistência à penetração tolerada pela cultura (Figura 3). Assim, quanto maior o valor da resistência à penetração tolerada pelo crescimento radicular, maior será a amplitude do Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) (KAISER *et al.*, 2009).

Para a densidade crítica do solo igual a 1,38 $Mg m^{-3}$ com resistência à penetração 3,5 MPa (Figura 3) a compactação relativa é igual a 86% (Figura 3), mostrando que, para valores de densidade do solo superiores a 1,38 $Mg m^{-3}$ o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) é igual a zero (Figura 3). Resultados semelhantes para solo de textura argilosa são descritos por Silva *et al.* (2014), mostrando que a compactação relativa do solo para a máxima produtividade da soja é igual a 85%.

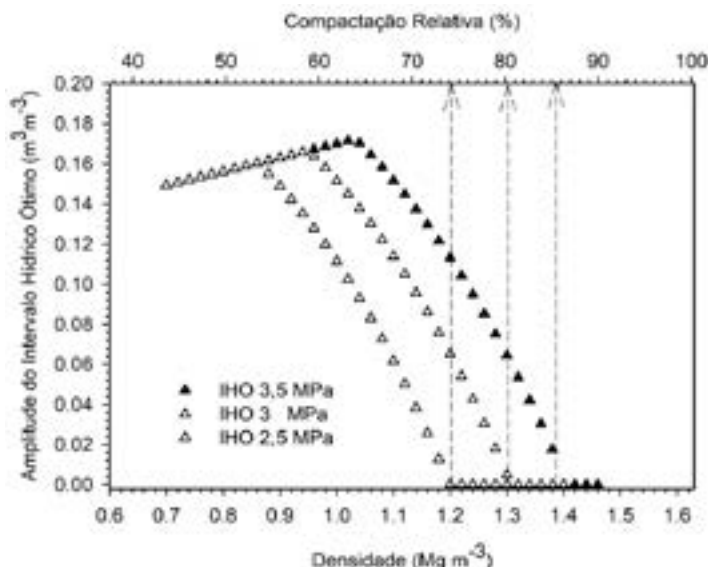


Figura 3. Amplitude do Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) em função da resistência à penetração (RP) igual a 2,5; 3 e 3,5 MPa, com a respectiva compactação relativa.

A compactação relativa do solo igual a 86%, apresentada para a densidade crítica de 1,38 Mg m⁻³ determinada pela resistência à penetração (RP) igual a 3,5 MPa, indicada pelo Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) está de acordo com a literatura, mostrando que solos de textura argilosa com compactação relativa superior a 86% reduzem o rendimento das culturas (REICHERT *et al.*, 2009; BARETA JUNIOR *et al.*, 2022). Portanto, nas condições em que a densidade do solo é superior ao valor crítico, as restrições provocadas ao crescimento do sistema radicular, reduzem o rendimento das culturas (RODRIGUES *et al.*, 2017).

3.2 AMPLITUDE DO INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO (IHO)

A análise de variância mostra que existe diferença estatística entre os manejos avaliados (Tabela 2), considerando que a amplitude do IHO é diferente nas áreas estudadas, para os valores de resistência à penetração iguais a 2,5; 3 e 3,5 MPa. Assim, a análise qualitativa complementar com teste de comparação de médias Skott-Knott, foi realizada para identificar as diferenças entre os tratamentos avaliados (Figura 4).

Tabela 2. Análise de variância mostrando fonte de variação (FV), grau de liberdade (GL), soma de quadrados (SQ), quadrado médio do erro (QM), valor de F calculado (F) e P-valor, para amplitude do Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) em cinco áreas com diferentes tempos de uso após a escarificação (Manejos), para resistência à penetração (RP) igual a 2,5; 3 e 3,5 MPa.

FV	GL	SQ	QM	F	P-valor
Manejos	4	0,4773	0,1193	90,63*	<0,0001
RP	1	0,4636	0,4636	352,065*	<0,0001
Interação: Manejos x RP	4	0,0238	0,0059	4,518*	<0,0012
Resíduos	862	1,1350	0,0013	-	-

*Significância pelo teste F ($p < 0,01$)

A qualidade física do solo pode ser determinada com maior acurácia pela amplitude do Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) em que, é possível identificar as alterações causadas pelo manejo em áreas de plantio direto (Figura 4). Todas as áreas submetidas ao plantio direto (SPD-3, SPD-10 e SPD20) apresentaram

amplitude do IHO superior a zero, entretanto o diagnóstico de compactação se confirma somente, quando a amplitude do IHO é igual a zero (FASHI *et al.* 2017).

O manejo com escarificação do solo (ESC), apresentou valor de amplitude do IHO muito semelhante a Floresta Nativa (FN) (Figura 4). O solo escarificado (ESC) apresenta macroporosidade e densidade muito semelhantes à Floresta nativa (FN) (LIMA *et al.*, 2020). No entanto, com o aumento do tempo após a escarificação acontece o aumento da densidade e diminuição da macroporosidade, com isso, acontece a redução da amplitude do IHO (SUZUKI *et al.*, 2022).

Os efeitos da escarificação do solo permanecem por menos de três anos, demonstrado pelas diferença estatísticas entre os manejos ESC e SPD-3 (Figura 4). Segundo Drescher *et al.* (2016), em Latossolo de textura argilosa com 549 g kg^{-1} de argila, os efeitos da escarificação se mantêm por dezoito meses, contudo após esse período a densidade não atinge valores prejudiciais ao crescimento das raízes. Apesar do efeito da escarificação não ser permanente, em cultivos com plantio direto, é possível manter a condição física do solo favorável ao crescimento radicular, utilizando a rotação de culturas para possibilitar a manutenção da porosidade do solo (MORAES *et al.*, 2019).

A amplitude do IHO diminuiu em função do tempo após a escarificação para os manejos conduzidos em plantio direto (SPD-3, SPD-10 e SPD-20) em relação ao manejo escarificado (ESC), porém, a compactação relativa do solo não atingiu o nível prejudicial, o que pode ser observado pela amplitude da IHO com valores positivos para os manejos SPD-3; SPD-10 e SPD-20 (Figura 4). O nível da compactação relativa prejudicial ao crescimento radicular é determinado pelo valor crítico da densidade, assim, a produtividade da cultura é comprometida, apenas quando IHO é igual a zero (FAUSTINO; MARCIANO, 2021).

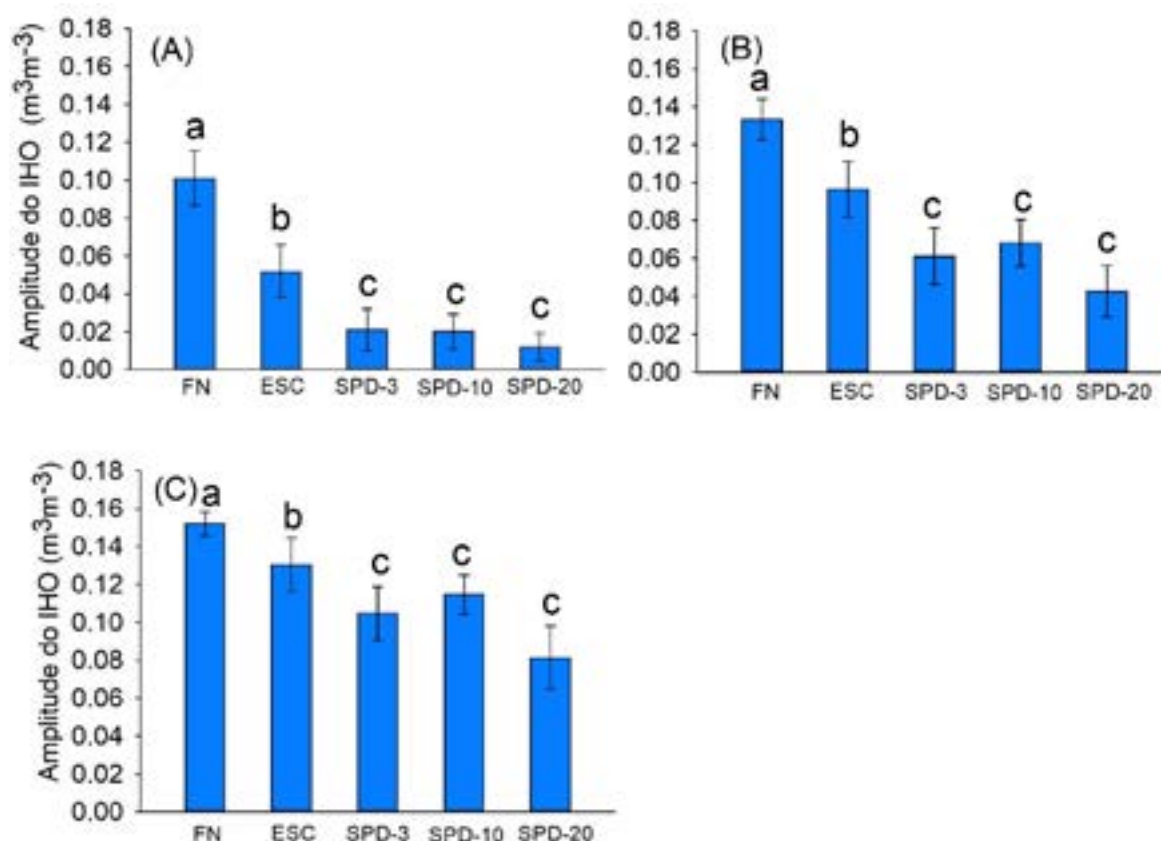


Figura 4. Valores médios para a amplitude do Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) na profundidade de 0 a 30 cm determinados pela resistência à penetração (RP) igual a 2,5 MPa (A), 3 MPa (B) e 3,5 MPa (C). Amplitude do IHO nas colunas e erro padrão nas linhas verticais, Floresta nativa (FN) constituída por um fragmento de Mata Atlântica, quatro meses após escarificação (ESC), SPD-3; SPD-10 e SPD-20, respectivamente 3; 10 e 20 anos de plantio direto após escarificação do solo. As médias representadas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de significância pelo teste de Scott-Knott.

Os manejos SPD-3, SPD-10 e SPD-20 não apresentaram diferença estatística entre si com relação à amplitude do IHO, mostrando que as propriedades físicas do solo são pouco alteradas a partir do terceiro ano após a realização da escarificação (Figura 4). A escarificação é uma boa prática para a recuperação de solos compactados, no entanto, solos de textura argilosa apresentam uma rápida reconsolidação, em que a densidade aumenta e a macroporosidade diminui em um período inferior a dois anos (NUNES *et al.*, 2014). Apesar da reconsolidação após a escarificação do solo, em cultivos sob plantio direto com rotação de culturas a compactação não atinge níveis prejudiciais ao crescimento radicular (SALES *et al.*, 2016).

A escarificação do solo (ESC) foi eficiente para aumentar a amplitude do IHO, que apresentou valores semelhantes ao solo da Floresta Nativa (FN) para resistência à penetração de 2,5; 3 e 3,5 MPa (Figura 4). A compactação do solo prejudica o desenvolvimento das raízes (PEIXOTO *et al.*, 2019). Sendo assim, quando o solo apresenta amplitude do IHO igual a zero, a intervenção mecânica com escarificação deve ser utilizada, uma vez que, nesta condição o solo apresenta baixa macroporosidade e a densidade é superior a densidade crítica, através da escarificação é possível recuperar a qualidade física do solo (PRAZERES *et al.*, 2020).

O cultivo sob plantio direto por mais de dez anos favorece positivamente as propriedades físicas do solo, embora possam apresentar densidade maior do que os solos escarificados, os solos manejados sob plantio direto não atingem o nível de compactação relativa prejudicial ao desenvolvimento das plantas (BLANCO-CANQUI; RUIS, 2018). O plantio direto contínuo mantém a estrutura do solo, o que ajuda a manter a qualidade física favorecendo o desenvolvimento das raízes (MORAES *et al.*, 2017).

4 CONCLUSÃO

Os valores de densidade crítica, a partir dos quais a amplitude do Intervalo Hídrico Ótimo é nula para a resistência à penetração (PR) igual a 2,5; 3 e 3,5 MPa são respectivamente 1,20 Mg m⁻³, 1,30 Mg m⁻³ e 1,38 Mg m⁻³ e a compactação relativa é respectivamente 75%, 81% e 86%.

Os resultados encontrados para os manejos conduzidos sob plantio direto, estão em acordo com a hipótese deste estudo, mostrando que amplitude do Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) não apresentou valor igual a zero para os diferentes manejos do solo. Portanto, os manejos analisados não apresentaram restrição ao crescimento radicular.

O plantio direto contínuo diminui, significativamente, a amplitude do IHO para os valores de resistência a penetração iguais a 2,5; 3 e 3,5 MPa em solos de textura argilosa. Os efeitos da escarificação do solo permanecem por tempo inferior a três anos, entretanto o solo não apresentou nível de compactação prejudicial, uma vez que mesmo após 20 anos de plantio direto contínuo (SPD-20) o solo manteve a qualidade física permitindo o desenvolvimento radicular com amplitude do IHO superior a zero.

Para áreas cultivadas sob plantio direto contínuo por 20 anos ou menos a prática da escarificação do solo pode ser dispensada, uma vez que, as condições físicas indicadas pela amplitude do IHO e compactação relativa não apresentaram limitações para o desenvolvimento radicular. Assim, solos de textura argilosa manejados em sistema plantio direto proporcionam condições favoráveis ao desenvolvimento das raízes, sem provocar a redução da produtividade.

Assim, novos estudos utilizando o IHO como indicador da densidade crítica devem ser realizados para quantificar a redução do volume de raízes, promovida pelos diferentes níveis de compactação do solo. Além disso, é necessário relacionar a produtividade das culturas cultivadas em solos escarificados com solos mantidos sob plantio direto contínuo por mais de 10 anos, a fim de identificar possíveis deficiências de manejo que provocam nível de compactação prejudicial ao desenvolvimento das culturas.

REFERÊNCIAS

- BARETA JUNIOR, E. *et al.* Critical limits of soil physical attributes for corn and black oat in a Xanthic Hapludox. **Revista Ciência Agronômica**, v. 53, 2022. DOI: <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20220003>
- BLANCO-CANQUI, H; RUIS S. J. No-tillage and soil physical environment. **Geoderma**, v.326, p.164-200, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.03.011>
- BUSSCHER, W. J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. **TRANSACTIONS of the ASAE**, v.33, n.2, p.519-524, 1990. DOI: <https://doi.org/10.13031/2013.31360>
- DRESCHER, M. S. *et al.* Duração das alterações em propriedades físico-hídricas de Latossolo argiloso decorrentes da escarificação mecânica. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v.51, n.2, p.159-168, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000200008>
- FASHI, F. H.; MANOUCHEHR, G.; SHARIFI, F. Least limiting water range for different soil management practices in dryland farming in Iran. **Archives of agronomy and soil science**, v. 63, n. 13, p. 1814–1822, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1080/03650340.2017.1308688>
- FAUSTINO, L. L.; MARCIANO, C. R. Intervalo Hídrico Ótimo e Valores Críticos de Densidade como Indicadores de Recuperação de um Solo sob Sistemas Florestais e Pasto. **Ciência Florestal**, v. 31, n. 2, p. 658-682, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509833474>
- KAISER, D. R. *et al.* Intervalo hídrico ótimo no perfil explorado pelas raízes de feijoeiro em um Latossolo sob diferentes níveis de compactação. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, v.33, n.4, p. 845-856,2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000400009>
- KAHLON, M. S.; CHAWLA, K. Effect of tillage practices on least limiting water range in Northwest India. **International Agrophysics**, v.31, n.2, p.183-194, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1515/intag-2016-0051>
- LIMA, C. L. R. *et al.* Least Limiting Water Range And Degree of Compactness of Soils Under No-Tillage. **Bioscience Journal**, v. 31, n. 4, p. 1071-1080, 2015. DOI: <https://doi.org/10.14393/BJ-v31n4a2015-26218>
- LIMA, R. P. *et al.* Least limiting water and matric potential ranges of agricultural soils with calculated physical restriction thresholds. **Agricultural Water Management**, v.240, p.1-9, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106299>
- MORAES, M. T. *et al.* Mechanical and hydric stress effects on maize root system development at different soil compaction levels. **Frontiers in Plant Science**, v.10, n.1358, 2019. DOI: [doi: 10.3389/fpls.2019.01358](https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01358)
- MORAES, M. T. *et al.* Critical limits of soil penetration resistance in a rhodic Eutrudox. **Revista Brasileira Ciência Solo**, v.38, n.1, p.288-298, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000100029>
- MORAES, M. T. *et al.* Mechanistic framework to link root growth models with weather and soil physical properties, including example applications to soybean growth in Brazil. **Plant Soil**, v.428, n.1, p.67-92, 2018. DOI: [10.1007/s11104-018-3656-z](https://doi.org/10.1007/s11104-018-3656-z)
- MORAES, M. T. *et al.* Age-hardening phenomena in an oxisol from the subtropical region of Brazil. **Soil and Tillage Research**, v.170, p.27-37, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.03.002>

NUNES, M. N. *et al.* Persistência dos efeitos da escarificação sobre a compactação de Nitossolo sob plantio direto em região subtropical úmida. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.49, n.7, p.531-539, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2014000700005>

PEIXOTO, D. S. *et al.* Diagnosing, ameliorating, and monitoring soil compaction in no-till brazilian soils. **Agrosystems Geosciences & Environment**, v. 2, n. 1, p. 1-14, 2019. DOI: <https://doi.org/10.2134/age2018.09.0035>

PRAZERES, M. *et al.* Scarification in no-tillage: soil physics and plant development. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 19, n. 2, p. 151-160, 2020. DOI: <https://doi.org/10.18188/sap.v19i2.23439>

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, (2021). Available in: <<https://www.R-project.org>> . Accessed on February 10, 2023.

REICHERT, J. M. *et al.* Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil Tillage Research**, v.102, n.2, p.242-254, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.07.002>

RODRIGUES, T. R. *et al.* Water availability to soybean crop as a function of the least limiting water range and evapotranspiration. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 47, n. 2, p. 161-167, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-40632016v4743746>

SALES, R. P. *et al.* Qualidade física de um latossolo sob plantio direto e preparo convencional no semiárido. **Revista Ciência Agronômica**, v.47, n.3, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20160052>

SANTOS, H.G. *et al.* Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Embrapa: Brasília, 2018. Disponível em: [https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/199517/1/SiBCS 2018 ISBN 9788570358004.pdf](https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/199517/1/SiBCS%202018%20ISBN%209788570358004.pdf)

SEKI, A. S. *et al.* Efeitos de práticas de descompactação do solo em área sob sistema plantio direto. **Revista Ciência Agronômica**, v. 46, n. 3, p. 460-468, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20150027>

TAVARES FILHO, J. *et al.* Resistência do solo à penetração e desenvolvimento do sistema radicular do milho (zea mays) sob diferentes sistemas de manejo em um latossolo roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 3, p.725-730, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832001000300022>

SILVA, F. R.; ALBUQUERQUE, J. A.; COSTA, A. Crescimento inicial da cultura da soja com diferentes graus de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, n.6, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000600008>

SOIL SURVEY STAFF. Keys to soil taxonomy. 12.ed. Washington, DC, USDA-Natural Resources Conservation, 2014. 265p.

SOUZA, C. M. A. *et al.* Least limiting water range in Oxisol under two conservation tillage systems in sugarcane farming. **Revista Ceres**, v.69, n.5, p.586-593, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/0034-737X202269050012>

SUZUKI, L. E. A. S. *et al.* Medium-Term No-Tillage, Additional Compaction, and Chiselling as Affecting Clayey Subtropical Soil Physical Properties and Yield of Corn, Soybean and Wheat Crops. **Sustainability**, v.14, n.9717, 2022. DOI: [10.3390/su14159717](https://doi.org/10.3390/su14159717)

TAVANTI, R. F. R. *et al.* Pedofunctions applied to the least limiting water range to estimate soil water content at specific potentials. **Engenharia Agrícola**, v. 39, n. 4, p. 444-456, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v39n4p444-456/2019>

TEIXEIRA, P. C. *et al.* Manual de Métodos de Análise de solo. **Embrapa**, 3. ed., 2018