

# Boletim Técnico

# 15

Pesquisa e Desenvolvimento

2025  
ISSN 2674-8177

Madalena Boeni  
Liege Camargo da Costa  
Adriane Luiza Schú  
Lucimara Rodrigues Padilha  
Dinis Deuschle  
Tiago Baratto  
Vinicius Bastos Lago



**Sistemas de manejo e seu potencial  
em recuperar a qualidade física do solo**





GOVERNO DO ESTADO  
**RIO GRANDE DO SUL**  
SECRETARIA DA AGRICULTURA, PECUÁRIA,  
PRODUÇÃO SUSTENTÁVEL E IRRIGAÇÃO

**GOVERNO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL  
SECRETARIA DA AGRICULTURA, PECUÁRIA,  
PRODUÇÃO SUSTENTÁVEL E IRRIGAÇÃO  
DEPARTAMENTO DE DIAGNÓSTICO E PESQUISA  
AGROPECUÁRIA**

## **BOLETIM TÉCNICO: pesquisa e desenvolvimento**

**SISTEMAS DE MANEJO E SEU POTENCIAL EM  
RECUPERAR A QUALIDADE FÍSICA DO SOLO**

Madalena Boeni  
Liege Camargo da Costa  
Adriane Luiza Schú  
Lucimara Rodrigues Padilha  
Dinis Deuschle  
Tiago Baratto  
Vinicius Bastos Lago

Porto Alegre, RS

2025

**Governador do Estado do Rio Grande do Sul:** Eduardo Figueiredo Cavalheiro Leite.

**Secretário da Agricultura, Pecuária, Produção Sustentável e Irrigação:** Edivilson Meurer Brum.

**Departamento de Diagnóstico e Pesquisa Agropecuária**

Rua Gonçalves Dias, 570 – Bairro Menino Deus

Porto Alegre | RS – CEP: 90130-060

Telefone: (51) 3288.8000

<https://www.agricultura.rs.gov.br/ddpa>

**Diretor:** Caio Fábio Stoffel Efrom

**Comissão Editorial:**

Loana Silveira Cardoso; Larissa Bueno Ambrosini; Lia Rosane Rodrigues; Bruno Brito Lisboa; Raquel Paz da Silva; Flávio Nunes.

**Arte:** Rodrigo Nolte Martins

**Catálogo e normalização:** Flávio Nunes

S623 Sistemas de manejo e seu potencial em recuperar a qualidade física do solo / Madalena Boeni ... [et al.]. – Porto Alegre : SEAPI/DDPA, 2025.

35 p. : il. – (Boletim técnico : pesquisa e desenvolvimento, 2675-1348 ; 15)

Continuação de: Boletim Fepagro, 1995-2016.

1. Plantas de cobertura. 2. Descompactação. 3. Cobertura permanente. 4. Resiliência. I. Boeni, Madalena. II. Série.

CDU 631.4/.6

**REFERÊNCIA**

BOENI, Madalena *et al.* **Sistemas de manejo e seu potencial em recuperar a qualidade física do solo.** Porto Alegre: SEAPI/DDPA, 2025. 35 p. (Boletim técnico: pesquisa e desenvolvimento, 15).

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>9</b>
<b>2 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>11</b>
<b>3 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>3.1 Densidade do solo .....</b>	<b>13</b>
<b>3.2 Porosidade do solo.....</b>	<b>16</b>
<b>3.3 Resistência do solo à penetração.....</b>	<b>22</b>
<b>4 CONCLUSÕES.....</b>	<b>29</b>
<b>5 AGRADECIMENTO .....</b>	<b>29</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>30</b>

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Resistência do solo à penetração em 09/2014, em função do manejo de cobertura (a) e de solo (b) e em 12/2015, em função do manejo de cobertura (c) e de solo (d).  
.....27
- Figura 2.** Umidade do solo em 09/2014 (a) e 12/2015 (b). T1: sucessão natural; T2: sucessão escarificado; T3: rotação 1 natural; T4: rotação 1 escarificado; T5: rotação 2 natural; T6: rotação 2 escarificado.....28

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1.** Densidade do solo ( $\text{g cm}^{-3}$ ) em função dos manejos de solo e de cobertura, considerando as quatro camadas, em duas épocas de avaliação..... 15
- Tabela 2.** Macroporosidade do solo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) em função dos manejos de solo e de cobertura, considerando as quatro camadas, em duas épocas de avaliação. .... 17
- Tabela 3.** Microporosidade do solo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) em função dos manejos de solo e de cobertura, considerando as quatro camadas, em duas épocas de avaliação. .... 19
- Tabela 4.** Porosidade total do solo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) em função dos manejos de solo e de cobertura, considerando as quatro camadas, em duas épocas de avaliação. .... 21
- Tabela 5.** Médias de resistência do solo à penetração ( kPa) em função dos manejos de solo e de cobertura, considerando as quatro camadas, em duas épocas de avaliação..... 24

# BOLETIM TÉCNICO: pesquisa e desenvolvimento

## **Sistemas de manejo e seu potencial em recuperar a qualidade física do solo**

Madalena Boeni<sup>1</sup>, Liege Camargo da Costa<sup>2</sup>, Adriane Luiza Schü<sup>3</sup>, Lucimara Rodrigues Padilha<sup>4</sup>, Dinis Deuschle<sup>5</sup>, Tiago Baratto<sup>6</sup>, Vinicius Bastos Lago<sup>7</sup>

---

<sup>1</sup> Pesquisador Agropecuário, Secretaria da Agricultura, Pecuária, Produção Sustentável e Irrigação (SEAPI). E-mail: madalena-boeni@agricultura.rs.gov.br

<sup>2</sup> Pesquisador Agropecuário, Secretaria da Agricultura, Pecuária, Produção Sustentável e Irrigação (SEAPI). E-mail: liegecosta@agricultura.rs.gov.br

<sup>3</sup> Especialista em Infraestrutura, Secretaria da Agricultura, Pecuária, Produção Sustentável e Irrigação (SEAPI). E-mail: adriane-schu@agricultura.rs.gov.br

<sup>4</sup> Tecnóloga em Produção de Grãos, Instituto Federal Farroupilha (IFFar). E-mail: luci.r.padilha@gmail.com

<sup>5</sup> Tecnólogo em Produção de Grãos, Instituto Federal Farroupilha (IFFar). E-mail: deutschdinis@gmail.com

<sup>6</sup> Tecnólogo em Produção de Grãos, Instituto Federal Farroupilha (IFFar). E-mail: tiagobaratto22@gmail.com

<sup>7</sup> Engenheiro agrônomo, Universidade de Cruz Alta (UNICRUZ). E-mail: agro.viniciuslago@gmail.com

## RESUMO

O manejo dos sistemas de produção determina as condições para a qualidade do solo e desenvolvimento das culturas. O uso de plantas de cobertura contribui para uma agricultura mais produtiva, resiliente e sustentável. O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito de plantas de cobertura associado à escarificação em alguns atributos físicos de um Nitossolo Vermelho. Os tratamentos foram formados por três manejos de culturas (sucessão: soja - trigo; rotação 1: soja - nabo - trigo/soja - aveia preta + ervilhaca e rotação 2: soja - aveia preta + ervilhaca + nabo/milho - crotalária júncea - trigo) e dois manejos de solo (escarificação até 30 cm e condição natural do solo sem escarificação). Foram avaliados, em duas épocas, nas camadas de 0-5; 5-10; 10-20 e 20-40 cm, os seguintes atributos físicos: densidade, macroporosidade, microporosidade, porosidade total e resistência do solo à penetração. A escarificação promoveu a redução da densidade e o aumento da macroporosidade e porosidade total nas camadas de 5-10 e 10-20, nas duas épocas de avaliação. Na resistência do solo à penetração, o efeito do manejo de cobertura foi observado já no primeiro ano, com o sistema mais diversificado (rotação 2) proporcionando condições físicas menos restritivas ao crescimento das plantas, na profundidade de 0 a 20 cm, e a escarificação, a partir de 5 até 40 cm, enquanto que no segundo ano, ambas as rotações foram favoráveis ao crescimento das plantas até 10 cm e a escarificação, a partir de 10 cm. Sistemas mais sustentáveis e resilientes devem ser contínuos e efetivos face à demanda pela produção de alimentos e às mudanças climáticas.

Palavras-chave: Plantas de cobertura. Descompactação. Cobertura permanente. Resiliência.

## **Management systems and their potential to recover soil physical quality**

### **ABSTRACT**

The management of production systems determines the conditions for soil quality and crop development. The use of cover crops contributes to more productive, resilient and sustainable agriculture. The objective of this study was to evaluate the effect of cover crops associated with scarification on some physical attributes of a Red Nitosol. The treatments consisted of three crop managements (succession: soybean - wheat; rotation 1: soybean - turnip - wheat/soybean - black oat + vetch and rotation 2: soybean - black oat + vetch + turnip/corn - sunn hemp - wheat) and two soil managements (scarification up to 30 cm and natural soil condition without scarification). The following physical attributes were evaluated, in two seasons, in the 0-5; 5-10; 10-20 and 20-40 cm layers: density, macroporosity, microporosity, total porosity and soil resistance to penetration. Scarification promoted a reduction in density and an increase in macro and total porosity in layers 5-10 and 10-20, in both evaluation periods. In soil resistance to penetration, the effect of cover management was observed in the first year, with the more diversified system (rotation 2) providing less restrictive physical conditions for plant growth, at a depth of 0 to 20 cm, and scarification, from 5 to 40 cm, while in the second year, both rotations were favorable to plant growth up to 10 cm and scarification, from 10 cm. More sustainable and resilient systems must be continuous and effective in the face of demand for food production and climate change.

**Keywords:** Cover crops. Descompaction. Permanent coverage. Resilience.

## 1 INTRODUÇÃO

A compreensão do impacto do uso e manejo do solo na recuperação e manutenção da sua qualidade e funcionalidade é fundamental para o desenvolvimento de sistemas agrícolas mais produtivos e sustentáveis.

O uso racional dos recursos naturais vem sendo estudado e discutido há décadas em busca de alternativas que possibilitem um manejo mais adequado do solo. Nesta trajetória, a busca pela promoção da qualidade dos solos para além da mitigação da erosão, evidenciou a necessidade de integrar o não revolvimento do solo com a cobertura permanente do solo e a rotação de culturas, constituindo os três princípios fundamentais do Sistema Plantio Direto (SPD). No entanto, apesar da grande experiência com SPD, nos últimos tempos tem-se observado a inexpressiva diversificação de espécies e ineficiente cobertura do solo nos cultivos de grãos no Rio Grande do Sul. Essa simplificação do sistema conduz à redução nos teores de matéria orgânica e, conseqüentemente, a modificações na estrutura e no comportamento físico-hídrico do solo.

A estrutura é considerada uma boa indicadora da qualidade do solo devido a sua sensibilidade às práticas de manejo adotadas (Stefanoski *et al.*, 2013). A qualidade estrutural do solo refere-se ao arranjo espacial das partículas do solo constituindo um ambiente dinâmico, cuja alteração determinará um novo comportamento dos processos que ocorrem no solo (Ferreira, 2010). Solos que apresentam boa estrutura são mais resistentes à erosão e à compactação, apresentando boa aeração e maior capacidade de infiltração e armazenamento de água.

Uma das consequências do manejo inadequado do solo é a compactação, condição em que ocorre aumento de massa por unidade de volume, resultando em aumento na densidade, na resistência à penetração de raízes e na microporosidade relativa, o que contribui para redução linear da porosidade total e da macroporosidade (Beutler *et al.*, 2005), comprometendo a capacidade de infiltração (Secco *et al.*, 2004; Lanzaova *et al.*, 2007), o armazenamento de água do solo e o crescimento de raízes (Derpsch *et al.*, 1991; Dias Junior; Pierce, 1996; Tavares Filho; Tessier, 1998; De Maria; Castro; Dias, 1999; Bertol *et al.*, 2001). Dessa forma, são grandes os prejuízos econômicos, ambientais e sociais. Ao mesmo tempo, são grandes os desafios para a conservação do solo e da água nos atuais sistemas de produção, pois é necessário o entendimento da necessidade de adaptação dos cultivos agrícolas às mudanças e irregularidades climáticas.

A simplificação do SPD, baseada apenas no princípio do não revolvimento do solo e no cultivo de culturas comerciais, pode não ter o mesmo efeito que um conjunto de práticas que caracteriza a aplicação correta do SPD tem de potencializar a proteção do solo e dos cultivos em casos de eventos climáticos extremos, os quais têm previsão de ocorrer com maior frequência e intensidade.

O desafio atual é manejar adequadamente o solo, através de sistemas de produção alicerçados em uma agricultura mais conservacionista e sustentável, que contemple a diversificação de culturas e proporcione elevada produção de biomassa, de forma a manter o solo permanentemente coberto e incrementar os teores de matéria orgânica ao longo do perfil, melhorando assim a estrutura do solo, facilitando o suprimento de água, oxigênio e nutrientes às plantas, além do crescimento e desenvolvimento radicular

(Sanchez *et al.*, 2014), otimizando o uso da terra com redução dos riscos e com produtividades mais favoráveis e estáveis ao longo dos anos.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a influência de níveis crescentes de diversificação de espécies vegetais e da intervenção mecânica por escarificação, na escala de parcelas, sobre atributos físicos de solo.

## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

O experimento foi instalado a campo, no ano agrícola 2013/14, num Nitossolo Vermelho (Santos *et al.*, 2018), na área experimental do Departamento de Diagnóstico e Pesquisa Agropecuária (DDPA), pertencente à Secretaria de Agricultura, Pecuária, Produção Sustentável e Irrigação (SEAPI), no município de Júlio de Castilhos, região central do estado do Rio Grande do Sul, situada a 29,16922529°13'39" S de latitude e 53,696550 O de longitude, a uma altitude de 444 m. A temperatura média anual é de 18,1°C e a pluviosidade média anual de 1677 mm. O clima é do tipo Cfa, subtropical úmido, segundo classificação de Köeppen, com precipitações bem distribuídas durante o ano (Peel; Finlayson; McMahon, 2007).

Os tratamentos consistiram em três manejos de cobertura, de forma a proporcionar situações com níveis crescentes de diversidade de espécies (sucessão: soja - trigo; rotação 1: soja - nabo - trigo/soja - aveia preta + ervilhaca e rotação 2: soja - aveia preta + ervilhaca + nabo/milho - crotalaria júncea - trigo) e dois manejos de solo (escarificação até 30 cm e condição natural do solo sem escarificação). O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso, com três repetições.

A escarificação do solo foi realizada em outubro de 2013, anteriormente à implantação das culturas, utilizando-se subsolador de sete hastes (8 x 41 cm), distanciadas a 30 cm e atuando até 30 cm de profundidade. O cultivo das culturas comerciais e de cobertura de solo, que compõem os sistemas, foi conduzido de forma mecanizada, sob semeadura direta, de acordo com as recomendações técnicas para cada cultura. As espécies de cobertura não receberam adubação.

O experimento constituiu-se por parcelas de 3,5 x 22 m, apropriadas para determinações de perdas de solo e água por escoamento superficial, de acordo com Wischmeier e Smith (1978). As parcelas, com declividade média de 7,8%, foram delimitadas por chapas de metal com 10 cm de altura e enterradas a 5 cm de profundidade.

Os parâmetros físicos de densidade do solo, macroporosidade, microporosidade e porosidade total foram determinados em amostras de solo, com estrutura indeformada, coletadas em um ponto em cada parcela, com auxílio de um anel metálico no centro das camadas de 0-5; 5-10; 10-20 e 20-40 cm, após o manejo do cultivo de inverno nos anos de 2014 e 2015. No laboratório as amostras foram preparadas, saturadas, pesadas e submetidas à tensão de 6 kPa em coluna de areia (Reinert; Reichert, 2006).

A avaliação da resistência do solo à penetração (RP) foi realizada em setembro de 2014 e dezembro de 2015, utilizando-se um penetrômetro da marca Falker, modelo PLG 5300, com medições a cada 1 cm até atingir 40 cm de profundidade, com velocidade de inserção de 2,4 cm/s e índice de cone máximo de 6.800 kPa. A avaliação foi realizada em três pontos de cada parcela experimental. No momento da avaliação coletaram-se amostras de solo para

determinação da umidade gravimétrica a cada 10 cm, até a profundidade de 30 cm, em três pontos em cada parcela.

Os dados foram submetidos à análise de variância e foi testada a interação entre manejo do solo e manejo das culturas. Quando significativo, utilizou-se o teste de Tukey ( $p < 0,05$ ) para comparação das médias.

### **3 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

#### **3.1 Densidade do solo**

Os valores médios da densidade do solo nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm estão mostrados na Tabela 1.

Na camada superficial e abaixo de 20 cm de profundidade não foi constatado efeito dos sistemas de manejo de solo e de cobertura, sendo que a profundidade de atuação das hastes do equipamento utilizado foi até 30 cm. Verificou-se apenas efeito de manejo de solo nas camadas intermediárias de 5-10, em ambas as épocas de avaliação, e de 10-20 cm, apenas na segunda época.

Quando houve intervenção mecânica pela escarificação constatou-se a redução dos valores médios de densidade do solo em relação ao manejo sem escarificação (natural), sendo o seu efeito mais acentuado na camada de 5-10 cm, em ambas as épocas avaliadas. Os maiores valores de densidade no manejo de solo natural ficaram dentro da faixa considerada crítica ao desenvolvimento radicular em solos franco-argilosos (Reichert; Reinert; Braida, 2003).

A área em que o experimento foi instalado apresentava um histórico de manejo de vinte anos preconizando apenas o plantio direto e não o "sistema" plantio direto. Se tivesse sido utilizado o SPD com todas as práticas recomendadas, o

“sistema” deveria estar em fase de manutenção, com elevado acúmulo de palhada em superfície e de matéria orgânica em profundidade e todos os benefícios advindos do seu uso, refletindo-se em um solo bem estruturado. No entanto, sistemas de manejo de solo deixam de ter o efeito esperado quando manejados inadequadamente. Situação esta, que se refletiu na média dos valores de densidade na condição de manejo natural (sem escarificação), onde o solo apresentou uma densidade maior do que na condição de manejo de solo escarificado. Isso indica que o efeito da intervenção mecânica, realizada em outubro de 2013, persistiu por pelo menos dois anos e que o manejo de cobertura, mesmo com diferentes associações de espécies e elevado aporte de biomassa, não se manifestou no atributo densidade do solo em curto prazo, após longo período em área sem cultivo de rotação de culturas.

A escarificação, no sentido de mitigar a compactação, tem efeito efêmero (Prazeres *et al.*, 2020; Sustakowski *et al.*, 2020) e depende dos processos em andamento, apesar de ser uma das práticas mais utilizadas para remediar a compactação do solo. No entanto, para minimizar problemas de compactação do solo de maneira prolongada, pode se tornar uma alternativa mais eficiente quando associada ao uso de plantas de cobertura (Spliethoff *et al.*, 2019; Rampim *et al.*, 2020).

**Tabela 1.** Densidade do solo ( $\text{g cm}^{-3}$ ) em função dos manejos de solo e de cobertura, considerando as quatro camadas, em duas épocas de avaliação.

Manejo de cobertura	Ano					
	2014			2015		
	Manejo de solo			Manejo de solo		
	Natural	Escarificado	Média	Natural	Escarificado	Média
	Camada de 0-5 cm			Camada de 0-5 cm		
Sucessão	1,30	1,22	1,26 <sup>ns</sup>	1,21	1,26	1,23 <sup>ns</sup>
Rotação 1	1,18	1,17	1,18	1,18	1,27	1,22
Rotação 2	1,23	1,28	1,25	1,13	1,07	1,10
Média	1,24 <sup>ns</sup>	1,22		1,17 <sup>ns</sup>	1,20	
CV <sup>1</sup> (%)	16,87			10,48		
	Camada de 5-10 cm			Camada de 5-10 cm		
Sucessão	1,56	1,45	1,50 <sup>ns</sup>	1,45	1,39	1,42 <sup>ns</sup>
Rotação 1	1,47	1,25	1,36	1,47	1,35	1,41
Rotação 2	1,58	1,46	1,52	1,46	1,28	1,37
Média	1,54a	1,39b		1,46a	1,34b	
CV <sup>1</sup> (%)	8,88			6,43		
	Camada de 10-20 cm			Camada de 10-20 cm		
Sucessão	1,50	1,39	1,44 <sup>ns</sup>	1,53	1,34	1,43 <sup>ns</sup>
Rotação 1	1,48	1,47	1,47	1,48	1,35	1,42
Rotação 2	1,50	1,43	1,46	1,44	1,47	1,46
Média	1,49 <sup>ns</sup>	1,43		1,48a	1,39b	
CV <sup>1</sup> (%)	5,35			5,85		
	Camada de 20-40 cm			Camada de 20-40 cm		
Sucessão	1,31	1,35	1,33 <sup>ns</sup>	1,35	1,37	1,36 <sup>ns</sup>
Rotação 1	1,36	1,33	1,34	1,31	1,33	1,32
Rotação 2	1,47	1,41	1,44	1,37	1,39	1,38
Média	1,38 <sup>ns</sup>	1,36		1,34 <sup>ns</sup>	1,37	
CV <sup>1</sup> (%)	6,28			4,65		

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e antecedidas pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $P < 0,05$ ). <sup>ns</sup>Não significativo ao nível de 5% de probabilidade. <sup>1</sup>Coefficiente de variação.

Sabe-se que as plantas apresentam capacidade diferenciada de desenvolverem seu sistema radicular em ambientes com solo compactado. Quando o ambiente proporciona uma camada compactada em superfície, ocorrem limitações no desenvolvimento inicial da maioria das plantas, restringindo a germinação das sementes e a implantação das culturas. Na condição de presença de camada compactada em subsuperfície, há limitações no desenvolvimento do sistema radicular (Gomes Junior; Barbosa; Melo, 2023), com possibilidade de reduções na produtividade das culturas, principalmente quando da ocorrência de déficit hídrico nos estágios fenológicos críticos. Em anos com distribuição normal no padrão das chuvas, as consequências da compactação podem passar despercebidas.

### **3.2 Porosidade do solo**

As variáveis macroporosidade e porosidade total foram afetadas pelo manejo de solo (Tabelas 2 e 4), enquanto que a microporosidade, de forma geral, permaneceu inalterada (Tabela 3).

O sistema de manejo de solo escarificado promoveu aumento nos valores de macroporosidade, na segunda época de avaliação, e porosidade total do solo, em ambas épocas, quando comparado ao manejo de solo natural, na camada de 5-10 cm. Na camada de 10-20 cm houve aumento destes parâmetros apenas na primeira época de avaliação (Tabelas 2 e 4). Resultados semelhantes foram encontrados por Tormena *et al.* (2002) pelo aumento no volume de macroporos em preparo convencional e mínimo, devido ao revolvimento do solo.

**Tabela 2.** Macroporosidade do solo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) em função dos manejos de solo e de cobertura, considerando as quatro camadas, em duas épocas de avaliação.

Manejo de cobertura	Ano					
	2014			2015		
	Manejo de solo			Manejo de solo		
	Natural	Escarificado	Média	Natural	Escarificado	Média
	Camada de 0-5 cm			Camada de 0-5 cm		
Sucessão	0,23	0,25	0,24 <sup>ns</sup>	0,21	0,17	0,19 <sup>ns</sup>
Rotação 1	0,24	0,26	0,25	0,22	0,17	0,19
Rotação 2	0,24	0,23	0,24	0,20	0,26	0,23
Média	0,24 <sup>ns</sup>	0,24		0,21 <sup>ns</sup>	0,20	
CV <sup>1</sup> (%)	31,30			27,79		
	Camada de 5-10 cm			Camada de 5-10 cm		
Sucessão	0,11	0,16	0,14 <sup>ns</sup>	0,09	0,14	0,11 <sup>ns</sup>
Rotação 1	0,17	0,21	0,19	0,09	0,15	0,12
Rotação 2	0,12	0,14	0,13	0,11	0,17	0,14
Média	0,13 <sup>ns</sup>	0,17		0,10 <sup>b</sup>	0,16 <sup>a</sup>	
CV <sup>1</sup> (%)	37,85			32,12		
	Camada de 10-20 cm			Camada de 10-20 cm		
Sucessão	0,14	0,21	0,17 <sup>ns</sup>	0,08	0,16	0,12 <sup>ns</sup>
Rotação 1	0,14	0,17	0,16	0,09	0,13	0,11
Rotação 2	0,13	0,16	0,14	0,09	0,08	0,09
Média	0,14 <sup>b</sup>	0,18 <sup>a</sup>		0,09 <sup>ns</sup>	0,13	
CV <sup>1</sup> (%)	17,61			37,96		
	Camada de 20-40 cm			Camada de 20-40 cm		
Sucessão	0,18	0,17	0,17 <sup>a</sup>	0,11	0,10	0,11 <sup>ns</sup>
Rotação 1	0,15	0,19	0,17 <sup>ab</sup>	0,12	0,09	0,10
Rotação 2	0,14	0,14	0,14 <sup>b</sup>	0,10	0,11	0,10
Média	0,15 <sup>ns</sup>	0,17		0,11 <sup>ns</sup>	0,10	
CV <sup>1</sup> (%)	12,37			17,91		

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e antecedidas pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $P < 0,05$ ). <sup>ns</sup>Não significativo ao nível de 5% de probabilidade. <sup>1</sup>Coefficiente de variação.

A macroporosidade é uma medida diretamente relacionada com a difusão de oxigênio no solo para as raízes (Grable; Siemer, 1968), a qual determina a capacidade de aeração do solo (Thomasson, 1978; Erickson, 1982).

Valores de porosidade de aeração abaixo de 10-15% (0,10 a 0,15 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>) são, geralmente, adotados como restritivos para o crescimento e produtividade da maioria das culturas, apesar da dependência da espécie de planta e da atividade biológica do solo (Thomasson, 1978). Além da aeração, o aumento dos macroporos também está diretamente relacionado com a melhoria da infiltração de água no solo (Schiavo; Colodro, 2012) e esse aumento nos macroporos pode ser obtido pela escarificação eventual (Silva Junior *et al.*, 2010). Girardello *et al.* (2017) testaram diferentes escarificadores e obtiveram aumento na infiltração de água no solo até valor quatro vezes superior do que na área não escarificada, porém constataram que este efeito foi temporário, prevalecendo por apenas sete meses após o preparo.

A variável microporosidade apresentou diferença para o fator manejo de cobertura na camada de 10-20 cm, na primeira época de avaliação, com um valor cerca de 10% maior para a rotação 2 em relação à rotação 1 e à sucessão de culturas.

**Tabela 3.** Microporosidade do solo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) em função dos manejos de solo e de cobertura, considerando as quatro camadas, em duas épocas de avaliação.

Manejo de cobertura	Ano					
	2014			2015		
	Manejo de solo			Manejo de solo		
	Natural	Escarificado	Média	Natural	Escarificado	Média
	Camada de 0-5 cm			Camada de 0-5 cm		
Sucessão	0,31	0,32	0,31 <sup>ns</sup>	0,31	0,32	0,32 <sup>ns</sup>
Rotação 1	0,32	0,30	0,31	0,32	0,33	0,32
Rotação 2	0,32	0,32	0,32	0,33	0,30	0,31
Média	0,32 <sup>ns</sup>	0,31		0,32 <sup>ns</sup>	0,32	
CV <sup>1</sup> (%)	10,49			7,27		
	Camada de 5-10 cm			Camada de 5-10 cm		
Sucessão	0,32	0,33	0,32 <sup>ns</sup>	0,34	0,33	0,34 <sup>ns</sup>
Rotação 1	0,32	0,34	0,33	0,34	0,32	0,33
Rotação 2	0,35	0,34	0,35	0,34	0,33	0,33
Média	0,33 <sup>ns</sup>	0,33		0,34 <sup>ns</sup>	0,33	
CV <sup>1</sup> (%)	12,91			7,80		
	Camada de 10-20 cm			Camada de 10-20 cm		
Sucessão	0,31	0,31	0,31b	0,34	0,31	0,33 <sup>ns</sup>
Rotação 1	0,31	0,32	0,31b	0,35	0,32	0,34
Rotação 2	0,35	0,33	0,34a	0,34	0,34	0,34
Média	0,32 <sup>ns</sup>	0,32		0,34 <sup>ns</sup>	0,33	
CV <sup>1</sup> (%)	3,28			4,98		
	Camada de 20-40 cm			Camada de 20-40 cm		
Sucessão	0,33	0,34	0,34 <sup>ns</sup>	0,36	0,36	0,36 <sup>ns</sup>
Rotação 1	0,34	0,32	0,33	0,35	0,35	0,35
Rotação 2	0,35	0,34	0,35	0,35	0,35	0,35
Média	0,34 <sup>ns</sup>	0,33		0,35 <sup>ns</sup>	0,35	
CV <sup>1</sup> (%)	4,46			4,70		

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e antecedidas pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $P < 0,05$ ). <sup>ns</sup>Não significativo ao nível de 5% de probabilidade. <sup>1</sup>Coefficiente de variação.

Os menores valores de macroporosidade (Tabela 2) e de porosidade total (Tabela 4) e os maiores de densidade do solo (Tabela 1), observados nas camadas subsuperficiais sob manejo de solo natural, refletem o manejo anterior da área em que se preconizava o plantio direto e não o “sistema” plantio direto. O modelo usado preconizava apenas uma das práticas de manejo conservacionista, a semeadura direta, negligenciando a rotação de culturas e, conseqüentemente, obtendo reduzida produção de fitomassa ao longo do ano e insuficiente cobertura de solo. O plantio direto, nesse padrão, além de reduzir a porosidade total, muda a distribuição do tamanho de poros, com redução dos poros de maior tamanho (Tormena *et al.*, 2002).

Sendo a estrutura do solo heterogênea, tanto espacial como temporalmente, devido aos efeitos do meio ambiente, manejo de solo e desenvolvimento da planta, no presente estudo, a escarificação agiu no sentido de mitigar a compactação, pela redução da densidade do solo e aumento do volume de macroporos e porosidade total nas camadas subsuperficiais. Tais parâmetros físicos não variaram em função do manejo de cobertura estudado, até dois anos após o início do experimento. Isso sugere que avaliações de médio-longo prazo são necessárias face às mudanças dinâmicas na qualidade do solo e que os sistemas de produção, implantados, sejam contínuos e efetivos de forma a atingir os resultados esperados e a suprir a demanda pela produção de alimentos e de resiliência às mudanças climáticas.

**Tabela 4.** Porosidade total do solo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) em função dos manejos de solo e de cobertura, considerando as quatro camadas, em duas épocas de avaliação.

Manejo de cobertura	Ano					
	2014			2015		
	Manejo de solo			Manejo de solo		
	Natural	Escarificado	Média	Natural	Escarificado	Média
	Camada de 0-5 cm			Camada de 0-5 cm		
Sucessão	0,54	0,45	0,50 <sup>ns</sup>	0,52	0,50	0,51 <sup>ns</sup>
Rotação 1	0,56	0,55	0,56	0,54	0,49	0,52
Rotação 2	0,56	0,54	0,55	0,53	0,55	0,54
Média	0,55 <sup>ns</sup>	0,52		0,53 <sup>ns</sup>	0,51	
CV <sup>1</sup> (%)	20,15			6,92		
	Camada de 5-10 cm			Camada de 5-10 cm		
Sucessão	0,44	0,49	0,46 <sup>ns</sup>	0,43	0,47	0,45 <sup>ns</sup>
Rotação 1	0,49	0,55	0,52	0,43	0,48	0,45
Rotação 2	0,47	0,48	0,48	0,45	0,50	0,47
Média	0,47b	0,51a		0,43b	0,48a	
CV <sup>1</sup> (%)	7,95			6,76		
	Camada de 10-20 cm			Camada de 10-20 cm		
Sucessão	0,45	0,52	0,48 <sup>ns</sup>	0,42	0,48	0,45 <sup>ns</sup>
Rotação 1	0,45	0,48	0,47	0,43	0,46	0,44
Rotação 2	0,48	0,49	0,49	0,44	0,43	0,43
Média	0,46b	0,50a		0,43 <sup>ns</sup>	0,45	
CV <sup>1</sup> (%)	5,99			7,14		
	Camada de 20-40 cm			Camada de 20-40 cm		
Sucessão	0,51	0,51	0,51 <sup>ns</sup>	0,47	0,46	0,47 <sup>ns</sup>
Rotação 1	0,49	0,51	0,50	0,47	0,44	0,46
Rotação 2	0,49	0,48	0,49	0,45	0,46	0,46
Média	0,50 <sup>ns</sup>	0,50		0,46 <sup>ns</sup>	0,45	
CV <sup>1</sup> (%)	3,98			5,19		

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e antecedidas pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $P < 0,05$ ). <sup>ns</sup>Não significativo ao nível de 5% de probabilidade. <sup>1</sup>Coefficiente de variação.

### 3.3 Resistência do solo à penetração

Os valores médios da RP nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm, em cada época de avaliação, estão mostrados na Tabela 5. A avaliação da RP, foi realizada tomando-se a média dos valores de resistência em kPa a cada 5 cm, até a profundidade de 40 cm. A umidade gravimétrica do solo foi determinada a cada 10 cm até 30 cm de profundidade (Figura 2).

De maneira geral, considera-se valores em torno de 2000 kPa como a faixa crítica de resistência do solo com redução no crescimento radicular (Taylor; Robertson; Parker, 1966; Blainski *et al.*, 2008), sendo que em muitos casos pode afetar a produtividade das culturas.

Observando-se a primeira época de avaliação, que compreende onze meses após o início do experimento, nota-se que os valores médios de RP na camada superficial, encontrados em função dos sistemas de manejo estudados, foram inferiores a 2000 kPa (Tabela 5). Além disso, foi possível verificar diferença significativa ( $p < 0,05$ ) entre os manejos de cobertura, com o menor e mais favorável valor de RP registrado na área com a rotação 2, sendo 3,1 vezes menor em relação à média da sucessão e rotação 1 (camada de 0-5 cm), 2,3 vezes na camada de 5-10 cm e de 1,7 vezes na camada de 10-20 cm.

Na segunda época de avaliação, os valores menos restritivos ao crescimento radicular foram observados na rotação 1 e 2, nas camadas superficiais. Na média das duas coberturas, o valor de RP foi 2 vezes menor que na sucessão soja-trigo na camada de 0-5 cm e 1,5 vezes na camada de 5-10 cm. Na camada de 10-20 cm não houve efeito de manejo de cobertura e na maior profundidade (20-40 cm) as rotações

não diferiram entre elas e a sucessão também não diferiu da rotação 1, porém, o efeito da rotação 2 reduziu o valor de RP em 19% em relação à sucessão.

A habilidade das raízes penetrarem no perfil diminui quando a densidade e a resistência do solo aumentam. Na primeira avaliação, com cultivo de sucessão soja-trigo, na condição natural de manejo de solo, na média das repetições de 5-10 cm de profundidade, a RP média atingiu o valor de 4139,5 kPa (Tabela 5 e Figura 1a), com 16% de umidade (Figura 2 a), enquanto que na condição de solo escarificado chegou a 2632,5 kPa. Já, a RP na rotação 2 variou de 1575,2 kPa no manejo natural para 1154,1 kPa no escarificado (Tabela 5 e Figura 1a), ambos inferiores ao valor considerado crítico. Esse efeito de manejo de solo resultou em um valor médio de RP 30% menor no manejo escarificado em relação ao natural. O mesmo se repetiu na camada de 10-20, enquanto que na camada mais profunda essa diferença caiu para 17%.

Na segunda avaliação (aproximadamente 2 anos após o início do experimento), o efeito da escarificação persistiu nas camadas de 10-20 e 20-40 cm, com RP 26 e 15% inferiores ao manejo de solo natural, respectivamente (Tabela 5). O efeito do manejo de solo observado na camada mais profunda, em ambas as épocas de avaliação, pode ser resultante do alcance de atuação das hastes do escarificador que atingiu 30 cm de profundidade.

**Tabela 5.** Médias de resistência do solo à penetração (kPa) em função dos manejos de solo e de cobertura, considerando as quatro camadas, em duas épocas de avaliação.

Manejo de cobertura	Ano					
	2014			2015		
	Manejo de solo			Manejo de solo		
	Natural	Escarificado	Média	Natural	Escarificado	Média
	Camada de 0-5 cm			Camada de 0-5 cm		
Sucessão	1709,7	1051,9	1380,8a	781,9	1244,9	1013,4a
Rotação 1	1296,3	1481,1	1388,7a	507,6	426,1	466,8b
Rotação 2	441,5	436,7	439,1b	558,2	479,7	519,0b
Média	1149,2 <sup>ns</sup>	989,9		615,9 <sup>ns</sup>	716,9	
CV <sup>1</sup> (%)	39,08			38,05		
	Camada de 5-10 cm			Camada de 5-10 cm		
Sucessão	4139,5	2632,5	3386,0a	1549,3	1578,6	1564,0a
Rotação 1	3320,9	2609,2	2965,0a	1327,4	852,4	1089,9b
Rotação 2	1575,2	1154,1	1364,6b	1015,7	917,3	966,5b
Média	3011,9a	2131,9b		1297,5 <sup>ns</sup>	1116,1	
CV <sup>1</sup> (%)	26,51			19,40		
	Camada de 10-20 cm			Camada de 10-20 cm		
Sucessão	3080,1	2115,4	2597,8a	1663,6	1372,6	1518,1 <sup>ns</sup>
Rotação 1	3182,1	2294,3	2738,2a	1526,0	981,2	1253,6
Rotação 2	1824,2	1286,0	1555,1b	1472,1	1112,8	1292,5
Média	2695,5a	1898,6b		1553,9a	1155,5b	
CV <sup>1</sup> (%)	20,69			13,68		
	Camada de 20-40 cm			Camada de 20-40 cm		
Sucessão	2542,4	2168,6	2355,5 <sup>ns</sup>	2115,7	1791,4	1953,5a
Rotação 1	2483,2	1940,8	2212,0	1763,1	1576,5	1669,8ab
Rotação 2	2077,3	1782,5	1929,9	1824,8	1461,0	1642,9b
Média	2367,6a	1964,0b		1901,2a	1609,6b	
CV <sup>1</sup> (%)	15,57			11,01		

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e antecedidas pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $P < 0,05$ ). <sup>ns</sup>Não significativo ao nível de 5% de probabilidade. <sup>1</sup>Coefficiente de variação.

Os resultados obtidos indicam que a intervenção mecânica em solo manejado sob plantio direto, mediante a prática de escarificação, apresenta potencial para mitigar a compactação, principalmente quando aliada a um sistema de rotação de culturas desejável do ponto de vista conservacionista de solo, de forma a manter o sistema radicular ativo e vigoroso por maior parte do tempo, se desenvolvendo em maior volume de solo e, conseqüentemente, explorando melhor o perfil do solo. Assim, a incorporação de biomassa radicular e o acúmulo de matéria orgânica em profundidade acentuarão os efeitos benéficos ao longo do tempo (Salton; Tomazi, 2014).

No entanto, a longevidade dos efeitos da escarificação é muito variável, desde poucos meses (Camara; Klein, 2005; Nicoloso *et al.*, 2008; Ralisch *et al.*, 2001; Reichert *et al.*, 2009; Piccin; Amado; Fiorin, 2020) até alguns anos (Rosa *et al.*, 2008), dependendo do tipo de solo sob influência do clima e do uso de máquinas agrícolas (Busscher; Bauer; Frederick, 2002) e das práticas culturais predominantes (Busscher *et al.*, 1995).

O comportamento da RP para cada época de avaliação e dentro de cada manejo (de cobertura e de solo), nas profundidades de 0 a 40 cm, é demonstrado graficamente na Figura 1, ilustrando as variações em profundidade no perfil. Os resultados de umidade do solo no momento da coleta em cada época de avaliação são apresentados na Figura 2.

As variações observadas na Figura 1a demonstram que já no primeiro ano após o início do experimento, o manejo com a rotação 2, composta por uma diversidade maior de culturas ao longo do ano (soja - aveia preta + ervilhaca + nabo/milho - crotalária júncea - trigo) teve a maior eficiência entre os três manejos de cobertura testados, não

ultrapassando 2000 kPa ao longo do perfil. Isso mostra que o cultivo de espécies de cobertura, leguminosas, gramíneas e crucífera, em rotação com as culturas comerciais, soja, trigo e também milho, mantém o solo permanentemente coberto e com raízes em desenvolvimento, influenciando positivamente a qualidade física do solo. O efeito positivo da rotação 2 persistiu no segundo ano de cultivo e a rotação 1 (soja - nabo - trigo/soja - aveia preta + ervilhaca) apresentou comportamento semelhante (Figura 1c).

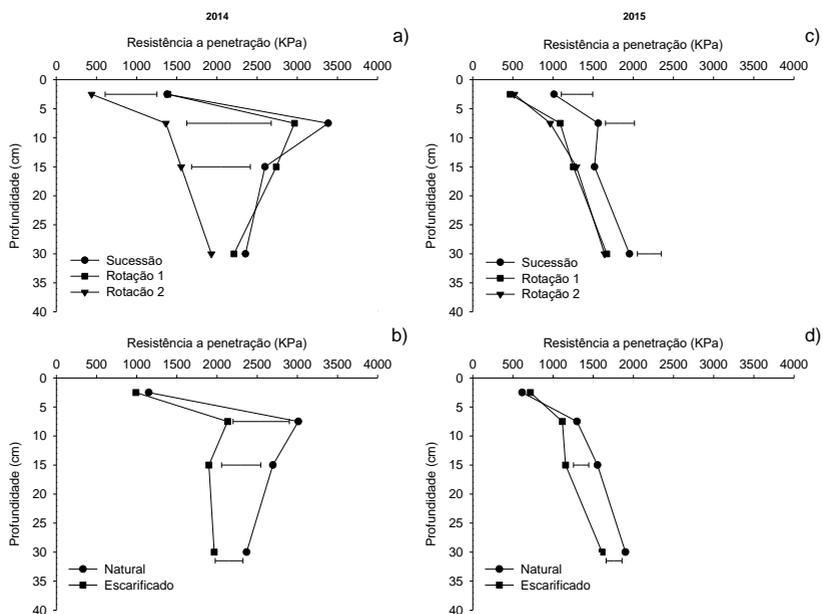
Os maiores valores de RP foram observados no manejo com sucessão de culturas, e esse fato está relacionado ao cultivo contínuo do binômio soja-trigo, com período de pousio no outono-inverno, sem cobertura vegetal ou com plantas invasoras se desenvolvendo e alimentando o banco de sementes, servindo apenas como hospedeiras de pragas e doenças.

Segundo Reichert, Suzuki e Reinert (2007), a compactação em áreas agrícolas ocorre, geralmente, nos primeiros 20 cm da camada de solo, dependendo do tipo de cultivo e do manejo do solo. Os manejos, tanto de cobertura quanto de solo, tiveram efeito mais pronunciado nos primeiros 20 cm de profundidade. A Figura 1b demonstra o efeito da escarificação em mitigar a compactação, o qual se manteve no segundo ano de cultivo (Figura 1d), porém, de forma menos pronunciada.

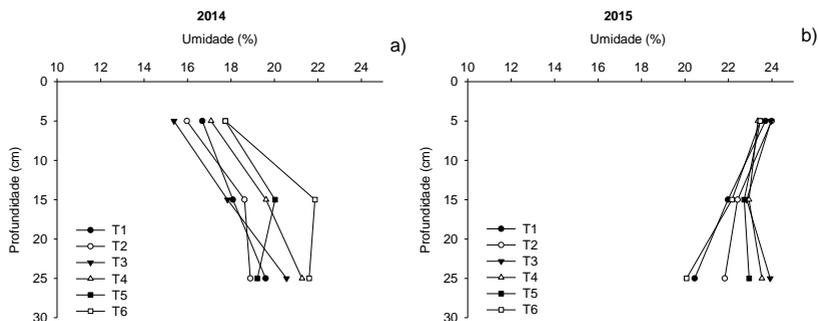
A RP, além da dependência de fatores intrínsecos como textura, estrutura e mineralogia, é altamente dependente da umidade do solo. De acordo com Libardi (2018), em solos com umidade muito baixa, a água encontra-se retida com maior tensão nos poros, e a essa tensão somam-se as forças existentes entre seus sólidos, fazendo

com que em solos com menores teores de umidade a RP seja maior.

Na segunda época de avaliação, os valores de RP tanto para o manejo de cobertura (Figura 1c) quanto de solo (Figura 1d) ficaram abaixo do valor crítico ao crescimento radicular em todo o perfil de solo avaliado e, em parte, podem ser explicados pela condição de umidade em que o solo se encontrava no momento da avaliação (Figura 2b).



**Figura 1.** Resistência do solo à penetração em 09/2014, em função do manejo de cobertura (a) e de solo (b) e em 12/2015, em função do manejo de cobertura (c) e de solo (d).



**Figura 2.** Umidade do solo em 09/2014 (a) e 12/2015 (b). T1: sucessão natural; T2: sucessão escarificado; T3: rotação 1 natural; T4: rotação 1 escarificado; T5: rotação 2 natural; T6: rotação 2 escarificado.

A rotação de culturas é um dos pilares do SPD e o uso de plantas de cobertura de solo no planejamento dos sistemas de rotação possibilita a produção de biomassa em maior quantidade e melhor qualidade, desenvolvimento radicular diferenciado, explorando diferentes camadas do perfil de solo, com diferentes graus de compactação, além de inúmeras propriedades emergentes e uma intensificação mais sustentável do sistema de produção.

## **4 CONCLUSÕES**

O manejo de solo escarificado agiu no sentido de mitigar a compactação, pela redução da densidade do solo e resistência do solo à penetração, aumento da macroporosidade e porosidade total, até o segundo ano após a escarificação, em um Nitossolo vermelho cultivado por vinte anos sob plantio direto.

O manejo de cobertura com a maior diversidade de culturas (rotação 2) foi eficiente em melhorar o atributo físico resistência do solo à penetração, já no primeiro ano de adoção, em um Nitossolo vermelho cultivado por vinte anos sem rotação de culturas.

O uso de plantas de cobertura em rotação bem como seus benefícios ligados às propriedades físicas do solo demonstrou ser uma alternativa sustentável e, seu potencial, considerando-se o uso contínuo, tende a aumentar a eficiência do uso do solo e a qualidade do sistema de produção agrícola, com redução dos riscos inerentes às mudanças climáticas, enquanto que a prática mecânica da escarificação, embora tenha contribuído para mitigar a compactação, se utilizada de forma isolada, pode ter efeito transitório.

## **5 AGRADECIMENTO**

Os autores agradecem o apoio financeiro concedido pelo Projeto MAIS AGUA executado pela FEPAGRO (Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária), à FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos) e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico).

## REFERÊNCIAS

BERTOL, I. *et al.* Propriedades físicas de um Cambissolo Húmico afetadas pelo tipo de manejo do solo. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 58, n. 3, p. 555-560, 2001.

BEUTLER, A. N. *et al.* Densidade relativa ótima de Latossolos Vermelhos para a produtividade de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 29, p. 843-849, 2005.

BLAINSKI, E. *et al.* Quantificação da degradação física do solo por meio da curva de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, p. 975-983, 2008.

BUSSCHER, W. J. *et al.* Residual effects of slit tillage and subsoiling in a hardpan soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 35, n. 3, p. 115-123, 1995.

BUSSCHER, W. J.; BAUER, P. J.; FREDERICK, J. R. Recomposition of a coastal loamy sand after deep tillage as a function of subsequent cumulative rainfall. **Soil and Tillage Research**, v. 68, n. 1, p. 49-57, 2002.

CAMARA, R. K.; KLEIN, V. A. Escarificação em plantio direto como técnica de conservação do solo e da água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 29, n. 5, p. 789-796, 2005.

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**, Viçosa, MG, v. 23, p. 703-709, 1999.

DERPSCH, R. *et al.* **Controle da erosão no Paraná, Brasil: sistemas de cobertura do solo, plantio direto e preparo**

conservacionista do solo. Eschborn: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit, 1991.

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

ERICKSON, A. E. Tillage effects on soil aeration. *In*: UNGER, P. W.; VAN DOREN, D. M.; WHISLER, F. D.; SKIDMORE, E. L. (ed.). **Predicting tillage effects on soil physical properties and processes**. Madison: ASA, 1982. cap. 6, p. 91-104.

FERREIRA, M. M. Caracterização física do solo. *In*: LIER, Q. de J. van (ed.). **Física do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. p. 1-27.

GIRARDELLO, V. C. *et al.* Resistência do solo à penetração e desenvolvimento radicular da soja sob sistema plantio direto com tráfego controlado de máquinas agrícolas. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 18, n. 2, p. 86-96, 2017.

GOMES JUNIOR, W. L.; BARBOSA, F. T.; MELO, H. F. Desenvolvimento radicular e da parte aérea de cultivos de inverno em solos com diferentes texturas e graus de compactação. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 54, e20218314, 2023.

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 Science Society of America Proceedings**, Madison, Wis., v. 32, n. 2, p. 180-186, 1968.

LANZANOVA, M. E. *et al.* Atributos físicos do solo em sistema de integração lavoura-pecuária sob plantio direto. **Revista**

**Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, p. 1131-1140, 2007.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. 3. ed. Piracicaba, SP: Edusp, 2018.

NICOLOSO, R. D. S. *et al.* Eficiência da escarificação mecânica e biológica na melhoria dos atributos físicos de um Latossolo muito argiloso e no incremento do rendimento de soja. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, MG, v. 32, p. 1723-1734, 2008.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, Katlenburg-Lindau, v. 11, n. 5, p. 1633-1644, 2007.

PICCIN, M.; AMADO, T. J. C.; FIORIN, J. E. A. Estratégias de manejo para melhoria da camada de enraizamento profunda de um Latossolo. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v. 43, n. 2, p. 174-183, 2020.

PRAZERES, M. S. *et al.* Scarification in no-tillage: soil physics and plant development. **Scientia Agraria Paranaensis**, Marechal Cândido Rondon, v. 19, n. 2, p. 151-160, 2020.

RALISCH, R. *et al.* Avaliação em um solo argiloso sob plantio direto de uma escarificação na evolução da resistência do solo à penetração. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2001. 1 CD-ROM.

RAMPIM, L. *et al.* Influência do manejo mecânico e da adubação verde nos atributos físicos de Latossolo. **Research, Society and Development**, Vargem Grande Paulista, v. 9, n. 5, e173953258, 2020.

REICHERT, J. M. *et al.* Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 102, n. 2, p. 242-254, 2009.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência & Ambiente**, Santa Maria, v. 27, p. 29-48, 2003.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. *In*: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. (org.). **Tópicos em ciência do solo**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. v. 5, p. 49-134.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Coluna de areia para medir a retenção de água no solo-protótipos e testes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 36, p. 1931-1935, 2006.

ROSA, D. P. *et al.* Relação entre solo e haste sulcadora de semeadora em Latossolo escarificado em diferentes épocas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Porto Alegre, v. 43, n. 3, p. 395-400, 2008.

SALTON, J. C.; TOMAZI, M. **Sistema radicular de plantas e qualidade do solo**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2014. 5 p. (Comunicado técnico, 198).

SANCHEZ, E. *et al.* Propriedades físicas do solo e produtividade de soja em sucessão a plantas de cobertura de inverno. **Magistra**, Cruz das Almas, v. 26, n. 3, p. 262-271, 2014.

SANTOS, H. G. dos *et al.* **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SCHIAVO, J. A.; COLODRO, G. Agregação e resistência à penetração de um Latossolo vermelho sob sistema de integração lavoura-pecuária. **Bragantia**, Campinas, v. 71, n. 3, p. 406-412, 2012.

SECCO, D. *et al.* Produtividade de soja e propriedades físicas de um Latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, p. 797-804, 2004.

SEYFERTH, G. A colonização em Santa Catarina: hábitos alimentares e etnicidade. *In*: MENASCHE, R. (org.). **Saberes e sabores na colônia**: alimentação e cultura como abordagem para o estudo do rural. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2015. p. 133-160.

SILVA JUNIOR, C. A. *et al.* Alterações nos atributos físicos de um Latossolo vermelho sob diferentes métodos de preparo para o plantio da cana-de-açúcar. **Revista Agrarian**, Dourados, v. 3, n. 8, p. 111-118, 2010.

SPLIETHOFF, J.; RAMPIM, L.; POTT, C. A. Performance of cover and corn plants in different mechanical and biological management associations. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 14, n. 4, p. 1-9, 2019.

STEFANOSKI, D. C. *et al.* Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 12, p. 1301-1309, 2013.

SUSTAKOWSKI, M. C. *et al.* Ferralsol porosity and density after mechanical scarification and crop rotation systems.

**Journal of Agricultural Science**, Richmond Hill, v. 12, n. 10, p. 316-323, 2020.

TAVARES FILHO, J.; TESSIER, D. Influence des pratiques culturales sur le comportement et les propriétés de sols du Paraná (Brésil). **Etude et Gestion des Sols**, Thiverval-Grignon, v. 5, p. 61-71, 1998.

TAYLOR, H. M., ROBERTSON, G. M., PARKER, J. J. Soil strength root penetration relations for medium to coarse textured soil materials. **Soil Science**, New York, v. 102, p.18-22, 1966.

THOMASSON, A. J. Towards an objective classification of soil structure. **Journal of Soil Science**, Derby, v. 29, p. 38-46, 1978.

TORMENA, C. A. *et al.* Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 59, n. 4, p. 795-801, 2002.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses**: a guide to conservation planning. Washington, DC: USDA, 1978. (Agriculture handbook, 537).



GOVERNO DO ESTADO  
**RIO GRANDE DO SUL**  
SECRETARIA DA AGRICULTURA, PECUÁRIA,  
PRODUÇÃO SUSTENTÁVEL E IRRIGAÇÃO

**Secretaria de Agricultura, Pecuária, Produção Sustentável e Irrigação**  
**Departamento de Diagnóstico e Pesquisa Agropecuária**

Avenida Getúlio Vargas, 1384 - Menino Deus  
CEP 90150-004 - Porto Alegre - RS  
Fone: (51) 3288-8000

[www.agricultura.rs.gov.br/ddpa](http://www.agricultura.rs.gov.br/ddpa)