

Propriedades físico-hídricas de um Latossolo argiloso cultivado com sucessão trigo e plantas de cobertura por três anos

Rosicler Alonso Backes¹, Suelen Matiasso Fachi², Rodrigo Pivoto Mulazzani³, Daniel Boeno⁴, Juliano Ferreira Dutra⁵, Jackson Luis dos Santos Schmitz⁶, Paulo Ivonir Gubiani^{7*}.

DOI: <https://doi.org/10.35699/2447-6218.2024.48962>

Resumo

A descompactação biológica evita a escarificação ou subsolagem, como consequente desestruturação do solo e oxidação de carbono. Porém, a descompactação com plantas de cobertura parece ser sítio-específica, ou seja, dependente de interações biológicas com fatores abióticos dos locais avaliados. Neste estudo, investigamos quais mudanças em atributos físico-hídricos de um Latossolo em plantio direto seriam detectadas após três anos de cultivo de plantas de cobertura de verão em sucessão com trigo, com o objetivo de identificar espécies com maior capacidade de promover descompactação biológica. Os tratamentos consistiram em *Crotalaria Spectabilis*, *Cajanus cajan*, *Canavalia ensiformes* e vegetação espontânea. No terceiro ano, amostras de solo com estrutura preservada foram coletadas nas camadas de 0-0,1; 0,1-0,2; 0,2-0,3 e 0,3-0,4 m para avaliar densidade do solo, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, condutividade hidráulica, permeabilidade do solo ao ar e taxa de infiltração estável. O teste não paramétrico de Kruskal-Wallis indicou que houve efeito das plantas de cobertura na micro e na macroporosidade da camada 0,1-0,2 m e na microporosidade da camada de 0,3-0,4 m. Para as demais variáveis, a análise estatística não detectou efeito dos tratamentos a 10 % de probabilidade de erro, mas observou-se alteração de todas elas no sentido da melhoria na qualidade estrutural do solo. O aumento na macroporosidade, especialmente no tratamento com *Canavalia ensiforme*, é um indício de maior bioporosidade criada pelas raízes das plantas de cobertura. Ainda que outros indicadores de compactação não tenham sido afetados, o aumento da quantidade de poros grandes na camada usualmente mais compactada sem a necessidade de mobilizar mecanicamente o solo é uma vantagem da utilização das plantas de cobertura.

Palavras-chave: qualidade física do solo; descompactação biológica; infiltração de água.

¹Universidade Estadual do Rio Grande do Sul - UERGS. São Luiz Gonzaga. Rio Grande do Sul. Brasil.
<https://orcid.org/0000-0002-9954-2293>

²Universidade Federal de Santa Maria - UFSM. Santa Maria, Rio Grande do Sul. Brasil.
<https://orcid.org/0000-0002-0568-171X>

³Universidade Federal de Santa Maria - UFSM. Santa Maria, Rio Grande do Sul. Brasil.
<https://orcid.org/0000-0003-1714-0280>

⁴Universidade Tecnológica do Uruguai, Durazno. Durazno, Uruguai.
<https://orcid.org/0000-0003-1253-9436>

⁵Universidade Estadual do Rio Grande do Sul - UERGS. São Luiz Gonzaga. Rio Grande do Sul. Brasil.
<https://orcid.org/0009-0009-7448-7855>

⁶Universidade Estadual do Rio Grande do Sul - UERGS. São Luiz Gonzaga. Rio Grande do Sul. Brasil.
<https://orcid.org/0009-0001-7831-817X>

⁷Universidade Federal de Santa Maria - UFSM. Santa Maria, Rio Grande do Sul. Brasil.
<https://orcid.org/0000-0002-8840-3976>

*Autor para correspondência: paulo.gubiani@ufsm.br

Recebido para publicação em 30 de novembro de 2023. Aceito para publicação 26 de janeiro de 2024.
e-ISSN: 2447-6218



Caderno de Ciências Agrárias está licenciado
com uma **Licença Creative Commons**
Atribuição - Não Comercial 4.0 Internacional

Changes in physical properties of a clay Oxisol cultivated with wheat-cover crops succession

Abstract

Biological decompaction avoids the disadvantages of scarification or subsoiling, such as soil disruption and carbon oxidation. However, decompaction with cover crops appears to be site-specific, that is, dependent on biological interactions with abiotic factors in the evaluated locations. In this study, we investigated which changes in the physical properties of an Oxisol in no tillage would be detected after three years of growing summer cover crops in succession with wheat, with the aim of identifying species with greater capacity to promote biological decompaction. The treatments consisted of *Crotalaria Spectabilis*, *Cajanus cajan*, *Canavalia ensiformes*, and spontaneous vegetation. In the third year, soil samples with undisturbed structure were collected in layers 0-0.1, 0.1-0.2, 0.2-0.3 and 0.3-0.4 m to evaluate soil bulk density, total porosity, macroporosity, microporosity, hydraulic conductivity, soil air permeability and steady infiltration rate. The non-parametric Kruskal-Wallis test indicated that there was an effect of cover crops on the micro and macroporosity of the 0.1-0.2 m layer and on the microporosity of the 0.3-0.4 m layer. For the other variables, the statistical analysis did not detect an effect of the treatments at a 10% probability of error, but changes were observed in all of them towards an improvement in the structural quality of the soil. The increase in macroporosity, mostly in the treatment with *Canavalia ensiforme*, is an indication of greater bioporosity created by cover crop roots. Even though other compaction indicators were not affected, the increase in large pores in the usually most compacted layer without the use mechanical mobilization is an advantage of using cover crops.

Keywords: soil physical quality; biological decompaction; water infiltration.

Introdução

Com a expansão da área de Plantio Direto (PD) no Brasil (33,06 milhões de hectares (FEBRAPDP, 2018)) cresceu também a preocupação com a compactação do solo (Reichert et al., 2007). Aumento da resistência mecânica do solo e decréscimo na capacidade de fluxo de ar e água são consequências observadas em experimentos com tráfego excessivo de máquinas agrícolas ou pisoteio animal, e prejuízos no crescimento de raízes e no dossel são os impactos biológicos da compactação mais frequentemente relatados (Reichert et al., 2007; Reinert et al., 2008; Moraes et al., 2020). Porém, o impacto negativo no crescimento das plantas causado por compactação pode não resultar em prejuízo na produtividade de grãos se a chuva ao longo do ciclo for distribuída de modo a atender a demanda hídrica das plantas e não causar deficiência de aeração na rizosfera (Gubiani et al., 2013a; Mulazzani et al., 2022). Porém, em cenário climático de aumento na frequência de períodos de falta e excesso de chuvas, as plantas sentirão a deficiência hídrica e de aeração de maneira mais intensa em solos compactados, nos quais haverá risco maior de prejuízos na produtividade.

Quando o estado de compactação supera limites que prejudicam o crescimento de raízes, a descompactação é necessária. A escarificação ou subsolagem promovem descompactação imediata, mas a massa de solo desestruturada fica mais suscetível à erosão (Deuschle, et al., 2019), aumentam a oxidação de carbono e sua emissão para atmosfera (Sá et al., 2015), além de nem sempre aumentarem a produtividade das culturas e, por vezes, reduzi-la (Gubiani et al., 2013a; Reichert et al., 2009). Por isso, a descompactação biológica tem sido sugerida e estudada como alternativa à descompactação mecânica (Flávio Neto et al., 2015).

A intensificação do uso de plantas estimula a macrofauna e seus processos de bioturbação (Zhang et al., 2022; Torppa et al., 2022), como escavação de galerias, transporte de partículas minerais para a superfície e de resíduos orgânicos em profundidade, o que retroalimenta o crescimento de raízes e a atividade de fungos e bactérias que se alimentam dos exudatos e raízes em decomposição. A permanência desse conjunto de processos ao longo dos anos propaga, em profundidade, uma frente de descompactação biológica e regeneração da estrutura do solo. Ao contrário, a escarificação produz descompactação rápida, mas com benefícios de curta duração (Drescher et al., 2016; Nicoloso et al., 2008).

Sistemas de produção que combinam uma cultura para produção de grãos no verão (geralmente soja, esporadicamente milho) com cereais de inverno (trigo ou pastagens de aveia/zevém) ou pousio são composições típicas de inúmeras áreas agrícolas do sul do Brasil. A capacidade de descompactação biológica desse tipo de sistema pode não ser suficiente para superar a resistência mecânica do solo e promover descompactação efetiva. Por isso, a introdução de plantas de cobertura mais rústicas e com sistema radicular mais vigoroso é necessária para aumentar o potencial de descompactação biológica.

Vários estudos à campo já relataram que plantas de cobertura promovem mudanças em propriedades físicas do solo indicando descompactação (Calonego et al., 2017; Pott et al., 2023), mas outros estudos não perceberam tais mudanças (por exemplo: Reinert et al., 2008; Costa et al., 2011). A divergência de resultados se deve ao fato de que o potencial de descompactação biológica decorre não apenas das diferenças intrínse-

cas das espécies vegetais no que se refere à capacidade de penetrar camadas compactadas, mas das inúmeras interações biológicas com fatores abióticos internos e externos ao solo (resistência mecânica do solo, regime térmico e hídrico, pragas, doenças, nutrição, número de cultivos, etc.), os quais variam entre os experimentos e entre anos em um mesmo experimento. Por ser difícil de controlar experimentalmente essa complexidade, a transposição de resultados de uma região climática e de um solo específico para outros locais com clima e solo diferentes carrega inúmeras incertezas. Por isso, a repetição de experimentos em cada combinação edafoclimática e sistema produtivo específicos acaba sendo necessária para que as informações produzidas possam ser recomendadas no mesmo sistema edafoclimático-produtivo com maior confiabilidade.

Neste estudo, nós avaliamos a hipótese de que o cultivo por três anos de três espécies de plantas de cobertura de verão, em sucessão com trigo, alteram os atributos físico-hídricos de um Latossolo Vermelho Distroférico típico em plantio direto na região Noroeste do estado do Rio Grande do Sul. O objetivo do trabalho foi identificar espécies vegetais com maior capacidade de promover descompactação biológica.

Material e métodos

O estudo foi conduzido na área experimental da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, em São Luiz Gonzaga, no Noroeste do estado do Rio Grande do Sul (-28,402093°, -54,931103°, altitude de 221 m). O clima local é do tipo Cfa - (subtropical úmido com verão quente) - com precipitação anual média de 1.800 mm (Alvares et al., 2013). O solo na área experimental é um Latossolo Vermelho Distroférico típico (Santos et al., 2018), com 6 % de areia, 37 % de silte e 57 % de argila na camada de 0-0,20 m. A área onde o experimento foi instalado foi cultivada em plantio convencional até 2008 quando passou a ser cultivada em plantio direto. Durante todo o período anterior à implantação do experimento, a área foi cultivada com a sequência soja na primavera/verão e pousio no outono/inverno. Em setembro de 2018, amostras de solo da camada de 0-0,20 m foram coletadas em vários pontos na área experimental para formação de amostra composta, nas qual determinou-se o pH (5,7), matéria orgânica (2 %), CTC pH_7 (14,1 $cmol_c dm^{-3}$), Ca (6,9 $cmol_c dm^{-3}$); Mg (3,3 $cmol_c dm^{-3}$), K (0,056 $cmol_c dm^{-3}$), P (3,0 $mg dm^{-3}$), saturação por bases 73 % e por Al 0 %.

Implantação e condução do experimento

O experimento iniciou em novembro de 2018 e foi conduzido até agosto de 2021, com a implantação de plantas de cobertura (tratamentos) em novembro de 2018, 2019 e 2020, seguidas da cultura do trigo implan-

tada em maio de 2019 e 2020. Os tratamentos foram constituídos por três espécies de plantas de cobertura de verão (Figura 1) e um controle: GD - Guandú (*Canavalia cajan*; 100 kg de sementes ha^{-1}); FP - Feijão de porco (*Canavalia ensiformes*; 50 kg de sementes ha^{-1}); CS - Crotalária (*Crotalaria spectabilis*; 20 kg de sementes ha^{-1}); CO - Controle (ausência das plantas de cobertura; crescimento de espécies espontâneas como *Brachiaria plantaginea*, *Lolium perene*, *Cenchrus echinatus*, *Bidens pilosa*, *Sida rhombifolia* e *Brassica rapa L.*).

Os tratamentos foram distribuídos em delineamento inteiramente casualizado com três repetições, em parcelas de 2 x 5 m. As sementes de Crotalária e Guandú foram plantadas com semeadora, em linhas espaçadas de 0,40 m. O feijão de Feijão de porco foi semeado manualmente em covas abertas com enxada em linhas espaçadas de 0,40 m. As sementes utilizadas foram adquiridas de fornecedor credenciado no Sistema Nacional de Sementes e Mudanças do Ministério da Agricultura e Abastecimento. Nenhum tipo de fertilizante foi usado para as plantas de cobertura, e o controle de plantas daninhas foi realizado com capina manual. Na fase de floração (em março de cada ano), as plantas de cobertura foram roçadas e deixadas na superfície para decomposição (Figura 1).

No mês de maio de 2019 e 2020, sem necessidade de dessecação prévia, a cultivar de trigo ORS 1403, ciclo precoce, foi implantada com densidade de 300 plantas/ m^2 e espaçamento entrelinhas de 0,17 m. A adubação mineral de base (280 kg da fórmula comercial NPK 07-37-06) e de cobertura (100 kg de ureia) para o trigo foi realizada com base na análise de solo e nas recomendações do Manual de Calagem e Adubação do RS/SC (CQFS-RS/SC, 2016). Para o controle de doenças foi utilizado o fungicida Tebuconazole (0,75 litros do produto comercial por hectare) e as plantas daninhas foram controladas com capina manual. As semeaduras mecanizadas foram realizadas com um trator Ford 6610 85 CV e semeadora KF 513 H - 13 linhas.

Avaliação de propriedades físico-hídricas

Em maio de 2019, cinco meses após a implantação do experimento, a resistência do solo à penetração (RP) foi medida com um penetrômetro modelo PenetroLOG-1020, cujo cone de 129 mm^2 e ângulo de 30° foi inserido no solo a uma velocidade de 0,01 $m s^{-1}$. A RP foi medida em um ponto em cada a parcela e registrada a cada 0,01 m de profundidade. A medição foi realizada três dias após precipitação de 60 mm, condição de conteúdo de água no solo em torno da capacidade de campo. A determinação da RP após o primeiro ciclo das plantas de cobertura foi realizada para caracterizar a resistência mecânica do solo da área experimental. Não foi possível realizar a mediação da RP antes da implantação do experimento.

Figura 1 – Aspectos gerais dos cultivos na área experimental, manejo das plantas de cobertura e seus resíduos.



Em novembro de 2021, três anos após a implantação do experimento, duplicatas de amostras de solo com estrutura preservada foram coletadas com anéis metálicos (0,04 m de altura e 0,057 m de diâmetro) nas camadas 0-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,30 e 0,30-0,40 m em todas as parcelas, totalizando 96 amostras. Em uma bandeja contendo as amostras, o nível da água foi elevado gradativamente até próximo da borda superior dos anéis no intuito de promover a saturação do solo. Após 48 h, as amostras foram pesadas e submetidas a uma sequência de suções de 0,6 e 1 m em coluna de areia (Reinert e Reichert, 2006) e 10 m em câmaras de pressão (Richards, 1965). Em cada sucção, as amostras foram (i) pesadas para determinação do conteúdo volumétrico de água; (ii) transferidas para um permeâmetro de ar de carga constante para determinação da permeabilidade ao ar (K_a), conforme descrito em Mentges et al. (2016). Na sequência, as amostras foram submetidas à tensão subsequente na coluna de areia ou câmara de pressão. Depois

de passar pela tensão de 10 m e pela determinação da K_a , as amostras foram ressaturadas para a determinação da condutividade hidráulica de solo saturado (K_s) em um permeâmetro de carga constante (Donagemma et al., 2011). Após a determinação da K_s , as amostras foram secas em estufa a 105 °C por 48 horas. A densidade do solo (D_S), porosidade total (PT), microporosidade (MI) (determinada à sucção de 0,6 m) e a macroporosidade (MA) (diferença entre PT e MI) foram calculadas seguindo metodologia descrita em Donagemma et al. (2011).

Também em novembro de 2021, um teste de infiltração com duplo anel concêntrico (0,20 m de diâmetro do anel interno e 0,40 m de diâmetro do anel externo) foi realizado em cada parcela experimental. Os anéis foram inseridos até uma profundidade de 0,10 m. As medidas foram realizadas seguindo a metodologia descrita por Reynolds et al. (2002). Uma carga hidráulica constante de 0,05m foi mantida em ambos os anéis, aplicando o

princípio Marriott em um reservatório de abastecimento de água. A água infiltrada foi registrada em intervalos de aproximadamente 10 minutos no início dos testes, seguidos de intervalos maiores à medida que a taxa de infiltração diminuía. A duração de cada teste foi entre 2,7 e 3 h, e eles foram concluídos quando pelo menos três leituras sucessivas indicaram que a taxa de infiltração havia se aproximado de taxa constante. A média das três taxas finais observadas foi considerada como taxa de infiltração estável (Tie).

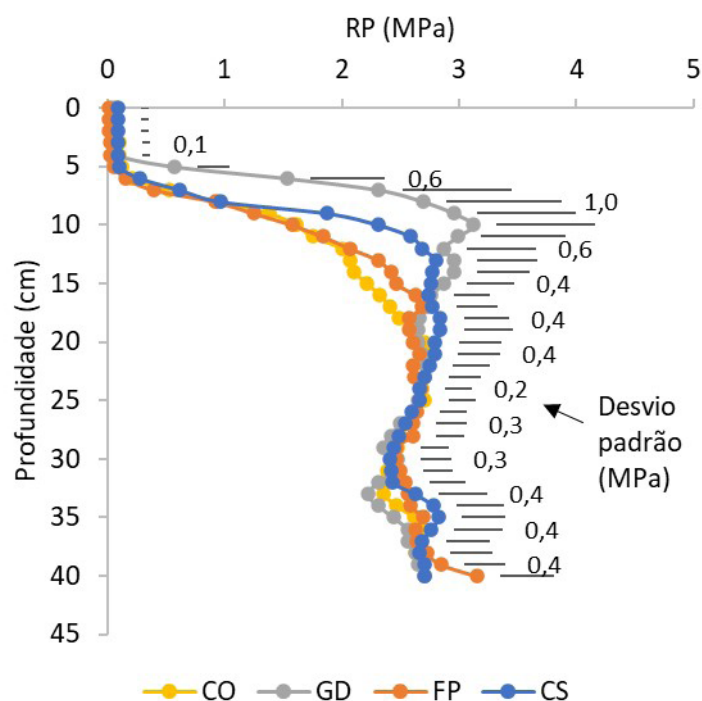
Análises estatísticas

Para evitar transformações em variáveis com distribuição diferente da normal (Ks, Ka e MA) e devido o número reduzido de unidades experimentais (doze), o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis, que requer menos pressupostos que a análise de variância, foi utilizado para avaliar se as plantas de cobertura afetaram as variáveis de solo determinadas em cada camada. O teste não paramétrico de Nemenyi foi utilizado como teste post-hoc para indicar as diferenças entre tratamentos. Os efeitos foram considerados significativos quando probabilidade de erro foi menor que 10%. Esses testes foram executados com a macro SAS KW_MC (Elliott e Hynan, 2011). Análises de correlações entre as propriedades físico-hídricas também foram realizadas.

Resultados e discussão

A RP medida após o primeiro ciclo de cultivo das plantas de cobertura foi semelhante entre os tratamentos

Figura 2 – Resistência do solo à penetração medida cinco mês após início do experimento. GD - Guandú; FP - Feijão de porco; CS - Crotalária spectabilis; CO - Controle.



(Figura 2). A RP foi menor que 0,5 MPa na camada de 0-0,05 m, aumentou bruscamente para valores maiores que 2 MPa na camada de 0,05 - 0,15 m e manteve-se em torno de 2,5 MPa até 0,40 m de profundidade. Na maioria das profundidades, o desvio padrão do conjunto total de dados da respectiva profundidade (todos os tratamentos) oscilou entre 0,4 e 0,6 MPa. Apesar da semelhança, a RP nas parcelas com GD e CS foi ligeiramente superior na camada entre 0,07 e 0,15 m. Essa diferença provavelmente está associada à compactação causada pelo conjunto trator-semeadora utilizada no plantio dessas duas espécies e não utilizada nos demais tratamentos. Entretanto, mesmo no FP e CO que não receberam tráfego de máquina, a RP de camadas mais profundas que 0,01 m foi maior que o limite crítico de 2 MPa. Portanto, um único ciclo de cultivo de plantas de cobertura não foi suficiente para reduzir a RP abaixo do limite crítico nas condições edafoclimáticas estudadas.

Três anos após a instalação do experimento, o teste de Kruskal-Wallis indicou efeito das plantas de cobertura na micro e na macroporosidade da camada 0,10-0,20 m e na microporosidade da camada de 0,30-0,40 m (Tabela 1). Em nenhum outro caso (variável e camada de solo) foi detectado efeito estatístico. O reduzido número de repetições (três) e a alta variabilidade intrínseca de variáveis como Ks, Ka e Tie, corroborada pelas medições desse estudo (Tabela 1), pode ter levado a não detecção de diferenças estatísticas pelo teste não paramétrico de Kruskal-Wallis a 10% de probabilidade de erro. A utilização de qualquer outro teste estatístico também seria limitada por estas duas condições.

Contudo, os resultados observados neste estudo estão alinhados com tendências observadas em outros. Por exemplo, é consenso que uma estrutura do solo com melhor qualidade se traduz em aumento da PT, MA, Ks, Ka, Tie e diminuição da Ds (Reichert et al., 2003; Reichert et al., 2007). Embora seja possível afirmar que apenas FP causou aumento estatisticamente detectável de MA neste estudo, é razoável suspeitar que não deve ter sido por acaso que todas as parcelas com plantas de cobertura tiveram valores mais altos de PT, MA, Ks, Ka (exceto para Ka100 em GD), e mais baixos de DS nas duas primeiras camadas superficiais (Tabela 1), posição que coincide com a região do perfil de solo onde geralmente há maior

concentração de raízes (Battisti e Sentelhas, 2017; Moraes et al., 2020). Ou seja, a tendência no sentido de mudança dessas variáveis observada nas camadas superficiais do perfil de solo é semelhante ao que se observa na literatura (aumento da PT, MA, Ks, Ka e diminuição da DS) quando há decréscimo do estado de compactação do solo. Além disso, a maior MA nas parcelas com plantas de cobertura, em especial FP, na camada que geralmente apresenta maior compactação (0,10 a 0,20 m), é um indicativo de que a produção de bioporos pelas raízes das plantas de cobertura é uma contribuição expressiva na melhoria da estrutura do solo.

Tabela 1 – Indicadores da estrutura do solo e propriedades de transporte de água e ar determinadas três anos após a implantação do experimento.

Tratamento	PT	MI	MA	DS	Ks	Ka10	Ka100
	----- m ³ m ⁻³ -----			Mg m ⁻³	mm h ⁻¹	----- μ ² -----	
Camada 0 – 0,10 m							
CS	0,58	0,40	0,17	1,26	760	22	42
FP	0,57	0,40	0,18	1,20	1384	63	62
GD	0,58	0,39	0,19	1,22	1144	32	65
CO	0,56	0,41	0,14	1,35	464	19	43
Camada 0,10 – 0,20 m							
CS	0,54	0,42 a	0,12 b	1,43	429	27	65
FP	0,56	0,38 b	0,18 a	1,30	941	45	60
GD	0,56	0,39 a	0,16 b	1,40	249	18	47
CO	0,53	0,43 a	0,10 c	1,44	51	12	57
Camada 0,20 – 0,30 m							
CS	0,58	0,42	0,16	1,28	97	20	27
FP	0,58	0,43	0,15	1,30	881	36	54
GD	0,57	0,45	0,12	1,36	128	43	32
CO	0,58	0,43	0,15	1,31	222	16	31
Camada 0,30 – 0,40 m							
CS	0,58	0,44 a	0,15	1,31	58	8	38
FP	0,58	0,41 b	0,17	1,24	1074	32	50
GD	0,59	0,44 a	0,15	1,26	97	17	28
CO	0,57	0,43 a	0,14	1,29	122	12	26

GD - Guandú; FP - Feijão de porco; CS - Crotalaria spectabilis; CO - Controle; PT = porosidade total, MI = microporosidade, MA = macroporosidade, DS = densidade do solo, Ks = condutividade hidráulica de solo saturado, Ka10 = permeabilidade ao ar a 10 kPa de tensão matricial, Ka100 = permeabilidade ao ar a 100 kPa de tensão matricial. Letras diferentes na mesma coluna indicam diferença estatística pelo teste não paramétrico de Nemenyi a $p < 0.1$.

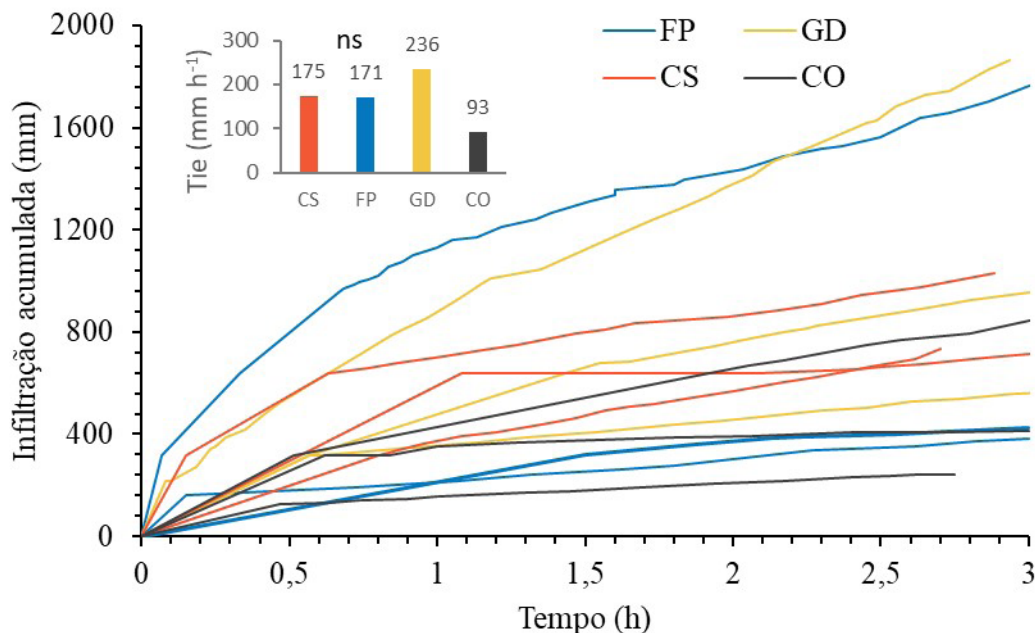
Embora a infiltração acumulada tenha sido alta em dois testes individuais em parcelas com FP e GD, as médias dos tratamentos não diferiram estatisticamente (Figura 3). As diferenças entre as médias de Tie também

não foram atribuídas aos tratamentos, embora a Tie nas parcelas com plantas de cobertura tenha sido em torno do dobro em relação ao controle. Os poros de grande dimensão deixados pelas raízes após a senescência das

plantas são um canal para o fluxo preferencial causando grande variabilidade nas medições de infiltração (Basset

et al., 2023; de Almeida et al., 2018), como as observadas nesse estudo (Figura 3).

Figura 3 – Infiltração acumulada e taxa de infiltração estável (Tie - gráfico de colunas) determinada três anos após a implantação do experimento. GD - Guandú; FP - Feijão de porco; CS - Crotalaria spectabilis; CO - Controle. ns = não significativo.



O aumento da Tie nas parcelas com plantas de cobertura (em torno do dobro em relação ao controle, Figura 3) também é coerente com o fato de ter havido aumento na PT, MA, Ks, Ka e diminuição da DS nessas parcelas (Tabela 1), associações essas frequentemente observadas nas pesquisas (Prando et al., 2010; Drescher et al., 2016). Essas associações também foram observadas nas duas primeiras camadas de solo deste estudo, e foram significativas na segunda camada (Tabela 2). Associação mais forte da Tie com as variáveis da segunda camada do que com as da primeira pode ser explicada pelo fato de que a camada de solo mais restritiva ao fluxo é a que mais afeta a infiltração (Boeno et al., 2021). Na camada de 0,10-0,20 m, a DS mais elevada e a PT e a Ks mais baixas (Tabela 1), em relação à camada de 0-0,10 m, indicam a existência de camada subsuperficial compactada mais restritiva à infiltração, comumente detectada em áreas de plantio direto (Reichert et al., 2009; Nunes et al., 2015). Ao contrário, maior quantidade de galerias normalmente criada pela macrofauna na porção superficial do solo (Spurgeon et al., 2013; Bottinelli et al., 2015) juntamente com as capinas efetuadas para o controle de plantas daninhas deixaram a camada de 0-0,10 m mais permeável ao fluxo de água (Ks e PT mais elevadas, Tabela 1). Por isso, a camada superficial não foi a que limitou a infiltração e nela houve baixa associação entre Tie e as demais variáveis (Tabela 2).

A variação das duas propriedades estruturais básicas do solo, DS entre 1,2 e 1,44 Mg m⁻³, e PT entre 0,53 e 0,59 m³ m⁻³, também está coerente com valores

observados em solos argilosos semelhantes ao da área experimental deste estudo (Gubiani et al., 2013b; Drescher et al., 2016). Correlação positiva da DS apenas com a MI e negativa com todas as demais variáveis (Tabela 2) é outro aspecto geralmente verificado em outros estudos (Mondal and Chakraborty, 2022; Suzuki et al., 2022). Além disso, há coerência também na correlação entre as variáveis de fluxo (Tie, Ka10, Ka100 e Ks), que estiveram positivamente correlacionadas entre si, exceto duas correlações da Tie com Ka10 e Ka100 na camada 0,30-0,40 m (Tabela 2).

Tendo em vista que houve efeito significativo das plantas de cobertura na macroporosidade e coerência no que se refere à relação entre as variáveis físico-hídricas do solo, esse estudo contribui com tendências e evidências de que a descompactação do solo pode ser promovida biologicamente com alguns cultivos de plantas de cobertura. A contribuição deste estudo é o conjunto de tendências apontando que a descompactação do solo pode ser promovida biologicamente com alguns cultivos de plantas de cobertura.

Conclusão

As plantas de cobertura cultivadas no verão por três anos em Latossolo argiloso nas condições climáticas do Rio Grande do Sul aumentaram a macroporosidade do solo na camada usualmente mais compactada (0,10 a 0,20 m), sendo o feijão de porco a planta de cobertura com maior efeito sobre essa propriedade do solo. Ainda

que o aumento da macroporosidade não tenha resultado em efeito detectável em outras propriedades físicas do solo, uma maior quantidade de poros biogênicos,

principalmente em camadas restritivas, pode facilitar o crescimento das raízes das culturas de grãos cultivadas subsequentemente às plantas de cobertura.

Tabela 2 – Correlação de Spearman entre variáveis físico-hídrica nas diferentes camadas de solo.

Camada (m)		K10	K100	Ks	DS	MA	MI	PT		
		----- μ^2 -----		mm h^{-1}	Mg m^{-3}	----- $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ -----				
0,00-0,10	Tie	● 0,08	● 0,02	● 0,20	● -0,26	● 0,39	● -0,10	● 0,41		
	K10		0,67	0,76	-0,28	0,20	-0,63	-0,02		
	K100			0,78	-0,66	0,32	-0,45	0,10		
	Ks	●	●	●	-0,71	0,36	-0,56	0,15		
	DS	r < -0,5	-0,5 < r < 0,5	0,5 < r		-0,74	0,66	-0,50		
	MA	Azull: significativo a p < 0.05						-0,60	0,85	
	MI								-0,17	
0,10-0,20	Tie	● 0,57	● 0,31	● 0,38	● -0,62	● 0,57	● -0,48	● 0,55		
	K10		0,69	0,55	-0,77	0,69	-0,43	0,81		
	K100			0,39	-0,51	0,29	-0,03	0,41		
	Ks					-0,83	0,76	-0,74	0,71	
	DS						-0,87	0,73	-0,85	
	MA								-0,90	0,90
	MI								-0,67	
0,20-0,30	Tie	● 0,24	● 0,11	● 0,07	● -0,17	● -0,15	● -0,33	● -0,41		
	K10		0,73	0,71	-0,33	0,04	-0,21	-0,14		
	K100			0,84	-0,33	-0,01	-0,52	-0,33		
	Ks					-0,55	0,27	-0,28	0,07	
	DS						-0,70	0,47	-0,38	
	MA								-0,13	0,80
	MI								0,41	
0,30-0,40	Tie	● -0,03	● -0,16	● 0,11	● -0,07	● 0,08	● -0,11	● 0,08		
	K10		0,52	0,69	-0,53	0,20	-0,49	0,08		
	K100			0,67	-0,16	-0,12	0,00	0,05		
	Ks					-0,48	0,17	-0,37	0,22	
	DS						-0,86	0,71	-0,75	
	MA								-0,66	0,88
	MI								-0,31	

PT = porosidade total, MI = microporosidade, MA = macroporosidade, DS = densidade do solo, Ks = condutividade hidráulica de solo saturado, Ka10 = permeabilidade ao ar a 10 kPa de tensão matricial, Ka100 = permeabilidade ao ar a 100 kPa de tensão matricial. * significativo a 5% de probabilidade de erro.

Agradecimentos

À Universidade Estadual do Rio Grande do Sul - UERGS - Unidade São Luiz Gonzaga - RS e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal de Santa Maria - RS, pela disponibilidade de infraestrutura de campo e laboratório para condução da pesquisa.

Financiamento

Este estudo foi parcialmente financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - Código 001, e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) - Processo 434853/2018-6.

Referências

- Alvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., De Moraes Gonçalves, J.L., Sparovek, G., 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22: 711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.
- Basset, C., Najm, M.A., Ghezzehei, T., Hao, X., Daccache, A., 2023. How does soil structure affect water infiltration? A meta-data systematic review. *Soil and Tillage Research*, 226: 105577. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2022.105577>.
- Battisti, C.; Sentelhas, P. C. 2017. Improvement of soybean resilience to drought through deep root system in Brazil. *Agronomy Journal*, 109: 1612–1622. <https://doi.org/10.2134/agnonj2017.01.0023>.
- Boeno, D.; Gubiani, P. I.; Jong Van Lier, Q.; Mulazzani, R. P. 2021. Estimating lateral flow in double ring infiltrometer measurements. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 45: 1–12. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcS20210027>.
- Bottinelli, N.; Jouquet, P.; Capowiez, Y.; Podwojewski, P.; Grimaldi, M.; Peng, X. 2015. Why is the influence of soil macrofauna on soil structure only considered by soil ecologists? *Soil Tillage Research*, 146: 118–124. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.01.007>.
- Calonego, J.C., Raphael, J.P.A., Rigon, J.P.G., Oliveira Neto, L. de, Rosolem, C.A., 2017. Soil compaction management and soybean yields with cover crops under no-till and occasional chiseling. *European Journal of Agronomy*, 85: 31–37. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.02.001>.
- Costa, M. S. S. M.; Pivetta, L. A.; Costa, L. A. M.; Pivetta, L. G.; Castoldi, G.; Steiner, F. 2011. Atributos físicos do solo e produtividade do milho sob sistemas de manejo e adubações. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 15: 810–815. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000800007>.
- CQFS-RS/SC, 2016. Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina.
- Donagemma GK, Campos DVB, Calderano SB, Teixeira WG, Viana JHM. Manual de métodos de análise do solo. 2. ed. rev. Rio de Janeiro: Embrapa Solos; 2011.
- de Almeida, W.S., Panachuki, E., de Oliveira, P.T.S., da Silva Menezes, R., Sobrinho, T.A., de Carvalho, D.F., 2018. Effect of soil tillage and vegetal cover on soil water infiltration. *Soil and Tillage Research*, 175: 130–138. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.07.009>.
- Deuschle, D.; Minella, J. P. G.; Horbe, T. A. N. H.; Schneider, F. J. A. S.; Londero, A. L. 2019. Erosion and hydrological response in no-tillage subjected to crop rotation intensification in southern Brazil. *Geoderma*, 340: 157–163. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.01.010>.
- Drescher, M. S.; Reinert, D. J.; Denardin, J. E.; Gubiani, P. I.; Faganello, A.; Drescher, G. L. 2016. Duração das alterações em propriedades físico-hídricas de Latossolo argiloso decorrentes da escarificação mecânica. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 51: 159–168. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000200008>.
- Elliott, A. C.; Hynan, L. S. 2011. A SAS® macro implementation of a multiple comparison post hoc test for a Kruskal-Wallis analysis. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 102: 75–80. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2010.11.002>.
- Flávio Neto, J.; Severiano, E. C.; Costa, K. A. P.; Guimarães Junnyor, W. S.; Gonçalves, W. G.; Andrade, R. 2015. Biological soil loosening by grasses from genus *Brachiaria* in crop-livestock integration. *Acta Sci., Agron.* 37: 376–383. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v37i3.19392>.
- Gubiani, P. I.; Reinert, D. J.; Reichert, J. M. 2013a. Indicadores hídrico-mecânicos de compactação do solo e crescimento de plantas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 37: 1–10. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000100001>.
- Gubiani, P. I.; Goulart, R. Z.; Reinert, D. J.; Reichert, J. M. 2013b. Crescimento e produção de milho associados com o intervalo hídrico ótimo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 37: 1502–1511. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000600007>.
- Mentges, M. I.; Reichert, J. M.; Rodrigues, M. F.; Awe, G. O.; Mentges, L. R.; 2016. Capacity and intensity soil aeration properties affected by granulometry, moisture, and structure in no-tillage soils. *Geoderma*, 263: 47–59. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.042>.
- Mondal, S., Chakraborty, D., 2022. Global meta-analysis suggests that no-tillage favourably changes soil structure and porosity. *Geoderma*, 405: 115443. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115443>.
- Moraes, M. T.; Debiassi, H.; Franchini, J. C.; Mastroberti, A. A.; Levien, R.; Leitner, D.; Schnepf, A. 2020. Soil compaction impacts soybean root growth in an Oxisol from subtropical Brazil. *Soil and Tillage Research*, 200: 104611. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104611>.
- Mulazzani, R. P.; Gubiani, P. I.; Zanon, A. J.; Drescher, M. S.; Schenato, R. B.; Girardello, V. C. 2022. Impact of soil compaction on 30-year soybean yield simulated with CROPGRO-DSSAT. *Agricultural Systems*. 203: 103523. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103523>.
- Nicoloso, R. S.; Amado, T. J. C.; Schneider, S.; Lanzanova, M. E.; Girardello, V. C.; Bragagnolo, J. 2008. 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*, 32: 1723–1734. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000400037>.
- Nunes, M. R.; Denardin, J. E.; Pauletto, E. A.; Faganello, A.; Pinto, L. F. S. 2015. Mitigation of clayey soil compaction managed under no-tillage. *Soil Tillage Res.*, 148: 119–126. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.12.007>.
- Prando, M. B.; Olibone, D.; Olibone, A. P. E.; Rosolem, C. A. 2010. Infiltração de água no solo sob escarificação e rotação de culturas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 34:693–700. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000300010>.

- Pott, C.A., Conrado, P.M., Rampim, L., Umburanas, R.C., Conrado, A.M.C., Outeiro, V.H., Müller, M.M.L., 2023. Mixture of winter cover crops improves soil physical properties under no-tillage system in a subtropical environment. *Soil and Tillage Research*, 234. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105854>.
- Reichert, J. M.; Suzuki, L. E. A. S.; Reinert, D. J.; Horn, R.; Hakanson, I. 2009. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil and Tillage Research*, 102: 242–254. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.07.002>.
- 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. *Tópicos em Ciência do Solo*, volume 5. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 49–134, 2007.
- Reichert, J. M.; Reinert, D. J.; Braidá, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. *Revista Ciência Ambiente*, 27: 29–48, 2003.
- Reinert, D. J.; Albuquerque, J. A.; Reichert, J. M.; Aita, C.; Andrada, M. M. C. 2008. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32: 1805–1816. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000500002>.
- Reinert, D. J.; Reichert, J. M. 2006. Use of sand column to measure soil water retention: prototypes and test. *Ciencia Rural* 36: 1931–1935. <https://doi.org/10.1590/s0103-84782006000600044>.
- Richards, L. 1965. Physical conditions of water in soil. p. 128–152. In: Black, C.; Evans, D.D.; White, J.L.; Clark, F.E., eds. *Methods of soil analysis: physical and mineralogical properties, including statistics of measurements and sampling*. Soil Science Society of America, Madison, WI, USA.
- Sá, J. C. M; Séguy, L.; Tivet, F.; Lal, R.; Bouzinac, S.; Borszowski, P. R.; Briedis, C.; Santos, J. B.; Hartman, D. C.; Bertoloni, C. G.; Rosa, J.; Friedrich, T. 2015. Carbon Depletion by Plowing and its Restoration by No-Till Cropping Systems in Oxisols of Subtropical and Tropical Agro-Ecoregions in Brazil. *Land Degradation & Development*, 26: 531–543. <https://doi.org/10.1002/ldr.2218>.
- Santos, H. G.; Jacomine, P. K. T.; Anjos, L. H. C.; Oliveira, V. A.; Lumberras, J. F.; Coelho, M. R.; Almeida, J. A.; Araújo Filho, J. C.; Oliveira, J. B.; Cunha, T. J. F. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 5. ed. rev. ampl. Brasília, DF: Embrapa; 2018.
- Spurgeon, D. J.; Keith, A. M.; Schmidt, O.; Lammertsma, D. R.; Faber, J. H.; 2013. Land-use and land-management change: Relationships with earthworm and fungi communities and soil structural properties. *BMC Ecology*, 43: 1–13. <https://doi.org/10.1186/1472-6785-13-46>.
- Suzuki, L.E.A.S., Reinert, D.J., Alves, M.C., Reichert, J.M., 2022. Medium-Term No-Tillage, Additional Compaction, and Chiseling as Affecting Clayey Subtropical Soil Physical Properties and Yield of Corn, Soybean and Wheat Crops. *Sustainability*, 14. <https://doi.org/10.3390/su14159717>.
- Torppa, K. A.; Taylor, A. R.; 2022. Alternative combinations of tillage practices and crop rotations can foster earthworm density and bioturbation. *Applied Soil Ecology*, 175: 104460. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104460>.
- Zhang, Y.; Peng, S.; Chen, X.; Chen, H. Y. H. 2022. Plant diversity increases the abundance and diversity of soil fauna: A meta-analysis. *Geoderma*, 411, 115694. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115694>.