

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**ORGANIZAÇÃO DA ESTRUTURA DO SOLO EM FUNÇÃO DE SISTEMAS
DE PREPARO E DE CULTURAS**

**Tiago Stumpf da Silva
(Tese de Doutorado)**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**ORGANIZAÇÃO DA ESTRUTURA DO SOLO EM FUNÇÃO DE SISTEMAS
DE PREPARO E DE CULTURAS**

TIAGO STUMPF DA SILVA
Engenheiro-Agrônomo (UFPel)
Mestre em Ciência do Solo (UFRGS)

Tese apresentada como um dos
requisitos à obtenção do Grau de
Doutor em Ciência do Solo

Porto Alegre (RS) Brasil
Outubro de 2020

CIP - Catalogação na Publicação

Silva, Tiago Stumpf
Organização da estrutura do solo em função de
sistemas de preparo e de culturas / Tiago Stumpf
Silva. -- 2020.

115 f.

Orientador: Renato Levien.

Coorientador: Michael Mazurana.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa de
Pós-Graduação em Ciência do Solo, Porto Alegre, BR-RS,
2020.

1. Sistemas de manejo. 2. Difusão de oxigênio. 3.
Tomografia computadorizada. 4. Permeabilidade ao ar.
5. Sistema radicular. I. Levien, Renato, orient. II.
Mazurana, Michael, coorient. III. Título.

TIAGO STUMPF DA SILVA
Engenheiro Agrônomo - UFPel
Mestre em Ciência do Solo - UFRGS

TESE

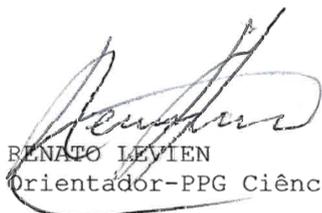
Submetida como parte dos requisitos
para obtenção do Grau de

DOCTOR EM CIÊNCIA DO SOLO

Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Faculdade de Agronomia
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre (RS), Brasil

Aprovado em: 16.10.2020
Pela Banca Examinadora

Homologado em: 01.06.2021
Por



RENATO LEVIEN
Orientador-PPG Ciência do Solo

ALBERTO VASCONCELLOS INDA JUNIOR
Coordenador do
Programa de Pós-Graduação em
Ciência do Solo

GETULIO COUTINHO FIGUEIREDO
PPG Ciência do Solo - UFRGS
(MConf UFRGS - Comunidade GPRSM)

CÁSSIO ANTONIO TORMENA
Universidade Estadual de Maringá
(MConf UFRGS - Comunidade GPRSM)

LUIS EDUARDO AKIYOSHI SANCHES SUZUKI
UFPel
(MConf UFRGS - Comunidade GPRSM)

CARLOS ALBERTO BISSANI
Diretor da Faculdade
de Agronomia

*Dedico aos meus pais,
Gildéres e José Luciano.*

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo (PPGCS), pela possibilidade realizar o doutorado. A Estação Experimental Agrônômica da UFRGS, onde essa pesquisa foi desenvolvida.

Ao Professor e orientador Renato Levien pela parceria, dedicação e incentivo ao trabalho realizado e por acompanhar minha jornada nesses quatro anos. Ao Professor e co-orientador Michael Mazurana pelo empenho, paciência e motivação durante todo o planejamento e condução desta pesquisa.

Aos demais professores que tive o privilégio de ser aluno, os quais contribuíram imensamente para minha formação profissional.

Um agradecimento especial aos meus pais que sempre me incentivaram a continuar estudando, e que não mediram esforços para que eu atingisse mais esse objetivo. Meus sinceros agradecimentos.

Aos colegas do grupo de pesquisa em relação solo-máquina, Marcelo, Zulpo, Fortes, Sofia, Cícero, Moacir, Altamir, Roberto, Artur, Nelson, Gabrielle, Letícia e Pablo. Aos demais colegas: Vitor, Telles, Denardin, Murilo e Ramon.

As amigadas que fiz durante o período vivido na Dinamarca, Juliana, Jessica, Maria, Triven, Estelle, Simon, Rick, Lee, Peter, Flora, Daniel, Fabi, Nastaran, Guilherme, Gaspar, Hafeez, Drishya e Sundas.

I would like to thank very much my supervisor in Denmark, Professor Lars Juhl Munkholm, who was very attentive and helpful in discussions and introduce me to X-ray computed tomography. I would also like to thank Mansonia Pulido-Moncada, who was my working partner at Aarhus University. I thank the technicians Michael Koppelgaard, Jorgen Nielsen, Bodil Christensen, and Stig Rasmussen for helping in the lab and for good moments shared.

À minha namorada Renata, por todo carinho e compreensão, me apoiando em todos os momentos. Fica minha gratidão.

Ao CNPq pela concessão da bolsa de doutorado e a Fundação Agrisus (projeto 2031/17) pelo apoio financeiro para condução da pesquisa desenvolvida nessa tese.

ORGANIZAÇÃO DA ESTRUTURA DO SOLO EM FUNÇÃO DE SISTEMAS DE PREPARO E DE CULTURAS¹

Autor: Eng. Agr. MSc. Tiago Stumpf da Silva

Orientador: Prof. Dr. Renato Levien

Co-orientador: Prof. Dr. Michael Mazurana

RESUMO

O sistema de plantio direto vem se tornando cada vez mais praticado em áreas agrícolas. Portanto, torna-se importante estudar o comportamento do solo que vinha sendo preparado por longo tempo com diferentes níveis de mobilização, com foco na organização estrutural do solo após adoção do plantio direto. Para avaliar a estrutura do solo, esse trabalho foi dividido em dois estudos, os quais foram conduzidos na Estação Experimental Agronômica da UFRGS, nos anos de 2017/18 e 2018/19, com amostras de solo com estrutura preservada, além de parâmetros de raiz e produtividade das culturas. O experimento consistiu em um delineamento de blocos ao acaso com parcela subdividida, com plantio direto de longo prazo continuamente, além de plantio direto de curto prazo com históricos de preparo reduzido e convencional (manejos do solo). As culturas estudadas foram soja, milho e braquiária. Com o intuito de facilitar a abordagem dos resultados, estes foram divididos em dois estudos. Os físico-mecânicos e físico-hídricos dentro do estudo I, e as avaliações tomográficas e de transporte de gases no estudo II. No primeiro estudo, abordou-se parâmetros físico-mecânicos como densidade do solo, resistência mecânica à penetração, além de características do sistema radicular das culturas e seus componentes de rendimento. A cultura da braquiária reduziu a densidade do solo após dois anos de estabelecimento na área. O tratamento com histórico de preparo reduzido apresentou menores valores de resistência mecânica à penetração. As culturas do milho e braquiária apresentaram maiores valores de parâmetros de raízes em relação à soja, porém não diferiram entre sistemas de manejo. A cultura do milho apresentou maior produtividade no plantio direto contínuo nos dois anos avaliados. Os parâmetros físico-hídricos da estrutura do solo, como fluxos de ar e água, além de propriedades de retenção de água mostraram-se sensíveis em detectar diferenças nas culturas, com a permeabilidade ao ar sendo mais evidente na cultura do milho. Os sistemas de manejo não influenciaram a água disponível para as plantas. No segundo estudo, abordou-se o uso da tomografia computadorizada de raio-X e os transportes de gases no solo. De modo geral, não houve efeito das culturas sobre os parâmetros analisados. Os sistemas de manejo influenciaram alguns parâmetros fornecidos pelas imagens tomográficas. Foi possível verificar uma boa correlação entre indicadores de continuidade/conectividade de poros e a permeabilidade ao ar.

Palavras-chave: sistemas de manejo, difusão de oxigênio, tomografia computadorizada, permeabilidade ao ar, sistema radicular.

¹Tese de Doutorado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (101p.) Outubro, 2020.

SOIL STRUCTURE ORGANIZATION AS FUNCTION OF THE TILLAGE AND CROP SYSTEMS²

Author: Eng. Agr. MSc. Tiago Stumpf da Silva

Adviser: Prof. Dr. Renato Levien

Co-adviser: Prof. Dr. Michael Mazurana

ABSTRACT

No-tillage system is getting more and more performed in agricultural areas. Therefore, it becomes important to study the soil behavior that had been tillage for long time with different disturbance levels, with focus on soil structure organization after converting to no-tillage. To assess soil structure, this work was divided into two studies, which were conducted at Experimental Station of UFRGS, in 2017/18 and 2018/19, with undisturbed soil samples, besides root parameters and yield crops. The experiment consisted in a randomized block design in a split plot, with long-term no-tillage continuously, besides short-term in no-tillage with historic of reduced and conventional tillage (soil management). The crops evaluated were soybean, maize, and brachiaria. In order to improve the results approach, they were divided into two studies. The physical-mechanical and physical-hydric in study I, and tomographic evaluations and gas transport in study II. In the first study, physical-mechanical parameters were addressed such as soil bulk density, soil penetration resistance, in addition to the plant root system features and their yield components. Brachiaria reduced soil bulk density after two years of establishment in the area. The treatment with a reduced tillage historic showed lower values of penetration resistance. The maize and brachiaria crops showed higher values of root parameters in relation to soybeans but did not differ between management systems. The maize showed higher yield in the long-term no-tillage in the two years evaluated. The physical-hydric parameters of soil structure, such as air and water flows, in addition to water retention properties showed to be sensitive in detecting differences between crops, with air permeability being more evident for maize. The management systems did not influence the plant available water. In the second study, the use of X-ray computed tomography and gas transport parameters in the soil were addressed. In general, there was no effect of crops on the analyzed parameters. The management systems influenced some parameters provided by tomographic images. It was possible to verify a good correlation between pore continuity/connectivity indicators and air permeability.

Keywords: soil management, oxygen diffusion, computed tomography, air permeability, root system.

²Doctoral thesis in Soil Science. Graduate Program in Soil Science, Faculty of Agronomy, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (101p.) October, 2020.

SUMÁRIO

1. CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO GERAL	1
2. CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. Caracterização do plantio direto	4
2.2. Estrutura do solo após conversão do preparo convencional e reduzido para o plantio direto	5
2.3. Influência do sistema radicular na estruturação do solo	7
2.4. Funcionalidade e organização dos poros estruturais.....	10
2.5. Tomografia computadorizada de raio-X como análise direta da porosidade do solo	12
3. CAPÍTULO III - ORGANIZAÇÃO DO SOLO EM PLANTIO DIRETO A CURTO E LONGO PRAZO, AVALIAÇÃO DO SISTEMA RADICULAR E PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS	14
3.1. Introdução.....	14
3.2. Material e métodos	16
3.2.1. Descrição da área experimental.....	16
3.2.2. Histórico da área e condução dos preparos de solo	18
3.2.3. Delineamento experimental e tratamentos.....	20
3.2.4. Amostragem de solo	22
3.2.5. Avaliação de parâmetros físico-mecânicos do solo.....	23
3.2.6. Avaliações de parâmetros físico-hídricos do solo	24
3.2.7. Análise do sistema radicular das culturas	27
3.2.8. Altura e produtividade das culturas	29
3.2.9. Análise estatística	29
3.3. Resultados.....	30
3.3.1. Densidade e porosidade do solo.....	30
3.3.2. Resistência mecânica à penetração.....	32
3.3.3. Permeabilidade a água	33
3.3.4. Permeabilidade ao ar	35
3.3.5. Retenção de água	38
3.3.6. Relação do sistema radicular e a água disponível	41
3.3.7. Sistema radicular e rendimento das culturas	41
3.4. Discussão	47
3.4.1. Efeito dos tratamentos sobre as propriedades físicas do solo	47
3.4.2. Resistência mecânica à penetração.....	48

3.4.3.	Permeabilidade a água e ao ar	49
3.4.4.	Retenção de água	52
3.4.5.	Sistema radicular.....	53
3.4.6.	Sistema radicular e água disponível para as plantas	55
3.4.7.	Componentes de rendimento e propriedades físicas	57
3.4.8.	Discussão geral dos tratamentos	58
3.5.	Conclusão.....	59
4.	CAPÍTULO IV- EVALUATION OF SOIL PORE NETWORK WITH X-RAY COMPUTED TOMOGRAPHY AND GAS TRANSPORT PARAMETERS	61
4.1.	Introduction	61
4.2.	Material and methods	64
4.2.1.	Description of the experiment.....	64
4.2.2.	Soil sampling.....	65
4.2.3.	X-ray computed tomography analysis	65
4.2.4.	Gas transport analysis.....	68
4.2.5.	Statistical analysis	70
4.3.	Results.....	70
4.3.1.	Soil structure and gas transport parameters	70
4.3.2.	CT-derived pore characteristics	73
4.3.3.	Relationship between CT-macroporosity and macroporosity by water retention.....	74
4.3.4.	Relationship between CT-derived characteristics and gas transport parameters	75
4.4.	Discussion	78
4.4.1.	Treatment effect	78
4.4.2.	CT-derived pore characteristics and laboratory measurements.....	79
4.4.3.	Scale effect	81
4.5.	Conclusion	82
5.	CONCLUSÕES GERAIS.....	83
6.	REFERÊNCIAS.....	85
7.	APÊNDICES.....	100

RELAÇÃO DE TABELAS

Tabela 1. Descrição da análise granulométrica e teor de matéria orgânica do solo.....	17
Tabela 2. Resumo do esquema de culturas empregadas no inverno e verão na área experimental entre os anos 2000 e 2019.....	20
Tabela 3. Efeito dos diferentes sistemas de manejo e culturas sobre a densidade do solo (D_s), macroporosidade (Mac), microporosidade (Mic) e porosidade total do solo (PT) em dois anos de avaliação em três camadas de solo.....	31
Tabela 4. Condutividade hidráulica do solo saturado ($mm\ h^{-1}$) avaliada nas culturas de verão nos diferentes manejos do solo e culturas, nas três camadas.	34
Tabela 5. Permeabilidade ao ar (k_a) e porosidade de aeração (ϵ_a) avaliadas em três potenciais matriciais (kPa) para manejos do solo e culturas na camada superficial de 0-10 cm.....	36
Tabela 6. Matriz de correlação de Pearson entre as médias dos parâmetros físicos do solo e características das culturas na camada do solo de 0-20 cm. Níveis de significância: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$	46
Table 7. Physical properties of the investigated soil including bulk density (Bd), total porosity (TP), microporosity ($\epsilon_{a<30}$) and macroporosity ($\epsilon_{a>30}$) in both sample sizes.	71
Table 8. Gas transport and soil pore characteristics evaluated in the small scale including air permeability (k_a , μm^2), relative gas diffusivity (D_s/D_o), air-filled porosity (ϵ_a , $m^3\ m^{-3}$), specific air permeability (SP , μm^2), tortuosity (T_B) and equivalent pore diameter (d_B , μm) at each matric potential.	72

RELAÇÃO DE FIGURAS

Figura 1. Precipitação ao longo do período experimental, por decêndios, mostrando as datas de semeadura e de colheita das culturas utilizadas nos anos de 2017/18 (A) e 2018/19 (B).	18
Figura 2. Croqui de um bloco da área experimental com as dimensões e disposição dos tratamentos de manejo do solo e culturas, na Estação Experimental Agronômica da UFRGS, Eldorado do Sul, RS.	20
Figura 3. Esquema de coleta das amostras indeformadas nas três camadas de solo avaliadas.....	23
Figura 4. Ensaio de condutividade hidráulica do solo saturado pelo método adaptado de carga decrescente (a) e esquema das dimensões usadas na determinação do valor de k_{sat} (b).....	25
Figura 5. Posição da coleta das amostras do sistema radicular pelo método do trado, na linha de semeadura e aproximadamente 6-7 cm da planta de referência.	28
Figura 6. Separação das raízes com uso de peneiras.....	29
Figura 7. Resistência mecânica à penetração (RP) no primeiro ano de avaliação para os sistemas de manejo do solo (a) e culturas (b). No gráfico b está apresentada a umidade gravimétrica média no momento da avaliação de RP por camada de solo.	33
Figura 8. Relação entre condutividade hidráulica do solo saturado (k_{sat}) e a macroporosidade para os tratamentos soja, milho e braquiária no primeiro ano (a) e segundo ano de avaliação (b) das três camadas avaliadas.....	35
Figura 9. Permeabilidade específica ao ar (k_1) para os sistemas de manejo e culturas, no potencial matricial de -6 kPa (a) e -33 kPa (b) na camada de 0-10 cm.	37
Figura 10. Capacidade de ar (CAr) para os sistemas de manejo (a) e culturas (b) na camada de 0-10 cm, no primeiro ano de avaliação.....	38
Figura 11. Curvas de retenção de água do solo por sistemas de manejo (esquerda) e culturas (direita) nas camadas de 0-10 cm (a, d), 10-20 cm (b, e) e 20-30 cm (c, f).	39
Figura 12. Frequência de distribuição dos diâmetros dos poros para os sistemas de manejo do solo, nas camadas de 0-10 (a), 10-20 (b) e 20-30 cm (c). Área hachurada representa os poros entre 100 e 1000 μ m de diâmetro.....	41
Figura 13. Água disponível para as plantas (AD) sob diferentes sistemas de manejo (a) e de culturas (b) nas três profundidades avaliadas.....	40

Figura 14. Relação entre água disponível para as plantas (AD) e volume (VR) (a), área superficial (AS) (b), diâmetro (DR) (c) e comprimento radicular (CR) (d) na camada de 0-30 cm. Cada ponto é a média das três camadas.	41
Figura 15. Relação do volume (VR) (a), área superficial (AS) (b), diâmetro (DR) (c) e densidade do comprimento radicular (CR) (d) para cada cultura avaliada na linha de semeadura, em cada camada avaliada.	42
Figura 16. Massa seca das raízes por cada camada do solo (a) e o total entre 0-30 cm (a) medido nas linhas de semeadura das culturas.	43
Figura 17. Produtividade e altura das plantas de milho avaliadas no primeiro ano (a, b) e no segundo ano (c, d).	44
Figure 18. Sampling of the large samples using a hydraulic bottle jack (a), soil core in 4 cm below to the surface (b), and soil core after knife-trimming.....	65
Figure 19. Subsampling procedure of small cores from large cores with large sample on the apparatus (a), position of subsampling (b), and small soil core after inserting in the large sample (c).....	66
Figure 20. 2D images from original stacks of the large (a) and small soil cores (b).....	66
Figure 21. Relative gas diffusivity apparatus used in this study.....	69
Figure 22. CT-macroporosity (a) and largest macropore volume (b) at large and small scale for tillage and crop.....	73
Figure 23. CT-mean macropore diameter (a), macropore density (b) and macropore branch density (c), maximum connectivity of macropores (d), macropore length density (e) and macropore connectivity (f) comparing between large and small scale for each tillage and crop treatment.....	74
Figure 24. Relationship between air-filled porosity > 30 μm ($\epsilon_{a>30}$) and CT-macroporosity on large scale (a), air-filled porosity > 30 μm ($\epsilon_{a>30}$) and CT-macroporosity on small scale (b), and air-filled porosity > 50 μm ($\epsilon_{a>50}$) and CT-macroporosity on small scale (c).	75
Figure 25. Relative gas diffusivity (D_s/D_o) at -100 hPa as a function of CT-macroporosity at small scale (a), air-filled porosity with pore diameter > 30 μm ($\epsilon_{a>30}$) (b), macropore connectivity (c), maximum connectivity of macropores (d) and macropore length density (e).	76
Figure 26. Air permeability (k_a) at -100 hPa as a function of CT-macroporosity at small scale (a), air-filled porosity with pore diameter > 30 μm ($\epsilon_{a>30}$) (b), macropore connectivity (c), maximum connectivity of macropores (d) and macropore length density (e).	77

1. CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO GERAL

Atualmente a agricultura conservacionista, como o sistema plantio direto (PD), tem e vem ganhando reconhecimento em diferentes regiões do mundo, trazendo avanços econômicos e ambientais para a agricultura intensiva. É de conhecimento geral a importante contribuição deste sistema de manejo, com mobilização de solo restrita à linha de semeadura, para a redução da erosão hídrica, aumento de matéria orgânica e estabilização da estrutura do solo por fatores bióticos. Além disso, tem refletido aumento da produção de grãos na agricultura brasileira, assim como a qualidade dos ambientes agropecuários que usam esta tecnologia.

A escolha do sistema de manejo envolve interesses econômicos em termos de produtividade esperada, investimento em maquinário, combustível, tipo de cultura, além de interesses ecológicos como o aporte de carbono e nível de degradação do solo. Portanto, existe uma tendência de que sistemas de manejo do solo com mobilização e revolvimento, como no caso de preparo convencional e até mesmo preparo reduzido, sejam convertidos em PD, devido as vantagens desse sistema na redução de custos e preservação ambiental. No entanto, existem os efeitos de históricos do manejo do solo no passado, os quais tem sido tema de diferentes frentes de pesquisa. Na maioria dos casos, o PD tem sido implantado sobre solos degradados, explorados durante muitos anos sob preparo convencional, onde permanece o chamado “pé-de-grade/arado”. Como ação para atenuar tal problema e melhorar a estrutura do solo ao longo do tempo em PD, tem-se a estratégia de utilizar plantas que tenham sistema radicular profundo e robusto, capaz de se desenvolver mesmo em condições estruturais inadequadas para outras culturas (ABREU; REICHERT; REINERT, 2004). Alguns estudos têm mostrado que os resultados de produtividade são divergentes após a conversão dos preparos com

mobilização para PD, pois dependem de vários fatores, e não unicamente deixar de realizar os preparos de solo. Portanto, é importante realizar experimentos de campo em longo prazo, usando os principais sistemas de cultivo adequados para cada região, e avaliar as mudanças da estrutura do solo ao longo do tempo. A estabilidade ou maturidade da estrutura do solo em PD pode ser atingida em um longo período de uso desse sistema.

No entanto, embora tenham ocorrido progressos na área de uso e manejo do solo, segundo Denardin et al. (2008) após cerca de 70 safras no Rio Grande do Sul e Santa Catarina da implantação do PD, observa-se que problemas vem ocorrendo, como a perda da qualidade estrutural do solo. Em consequência disso, ocorre um aumento da densidade e da resistência mecânica à penetração, a redução da porosidade e da taxa de infiltração de água no solo, a deformação morfológica de raízes e concentração destas na camada superficial do solo, ocorrência de erosão hídrica e prematura expressão de déficit hídrico por ocasião de pequenas estiagens. Desta maneira, há necessidade de estudar e avaliar os benefícios do PD quanto as efetivas melhorias da estrutura do solo e no aumento da produtividade das culturas, principalmente nos primeiros anos após a adoção do sistema em locais que praticavam preparos com mobilização.

Para as condições de solos de textura média, muitas são as divergências sobre sistemas de manejo que permitam melhorias duradouras sobre aspectos da estrutura do solo. Neste contexto, para as condições da agricultura brasileira, das 13 classes de solos, os Argissolos juntamente os Latossolos ocupam aproximadamente 58% da área total (EMBRAPA, 2006). No entanto, para condições de solos com menor teor de argila, existe uma lacuna de dados de pesquisa sobre sistemas capazes de melhorar a estrutura do solo, e assim aumentar o rendimento das culturas por ação do sistema radicular das plantas e sistemas de manejo.

Pelas particularidades climáticas existentes no Estado do Rio Grande do Sul, dentre os diversos sistemas de culturas utilizados para constituir o PD, têm-se por base soja e milho no verão. Nessa estação, há uma preferência para a soja, principalmente pelo rendimento econômico da cultura, tornando maior a resistência dos produtores na introdução de novos sistemas, como por exemplo, o uso de braquiária para pastejo em parte da área, o que

permitiria manutenção da atividade pecuária. Este poderia ser um mecanismo pelo qual o uso de culturas de cobertura em rotação ou consórcio com a principal, condicionaria um efeito duradouro na mitigação das limitações físicas do solo. Além disso, poderia fornecer cobertura do solo após a colheita das culturas de grãos, no período de outono-inverno.

De acordo com Munkholm et al. (2008), o conhecimento aprimorado das interações solo-máquina-planta-atmosfera é altamente necessário para implantar um sistema de manejo sustentável em relação à produtividade das culturas e a qualidade estrutural do solo. O impacto das práticas de manejo sobre o nível de organização estrutural formado pelo arranjo de partículas tem sido amplamente avaliado através de parâmetros como a relação massa/volume. No entanto, devido às características intrínsecas de cada sistema de manejo, tem-se tornado clara a existência de valores restritivos distintos dos atributos físicos do solo, os quais podem limitar o crescimento das culturas. Há evidências de que alguns atributos físicos não têm sido capazes de detectar os efeitos das práticas de manejo sobre a estrutura do solo. Isto tem levado ao desenvolvimento de indicadores não destrutivos e não invasivos para avaliação da qualidade do solo, com base na permeabilidade dos poros (indicando a funcionalidade estrutural) e a tomografia computadorizada de raios-X (indicando diretamente a geometria dos poros). Assim, como a água e o ar podem ocupar os espaços vazios na fase sólida do solo, a dinâmica destes fluidos torna-se importante para estudar o comportamento da estrutura em diferentes sistemas de manejo. Neste sentido, a aplicação dos métodos de avaliação, considerando as estratégias citadas é uma alternativa para a caracterização da qualidade estrutural do sistema poroso de solos e suas interações com as plantas, após a adoção do PD em áreas anteriormente manejadas sob preparo reduzido e convencional. Diante disso, ainda restam incertezas a respeito do tempo necessário para que o PD recupere a estrutura do solo e o potencial produtivo.

As hipóteses deste trabalho são que o sistema de plantio direto em longo prazo apresenta as melhores condições estruturais do solo, devido à ausência de mobilização e do não rompimento da continuidade de poros, e o uso de culturas com sistema radicular mais expressivo, como a braquiária, podem ser uma estratégia para melhorar estruturação do solo.

2. CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Caracterização do plantio direto

A exploração de sistemas agrícolas produtivos sem preparo de solo é tão antiga quanto à agricultura, tendo sido praticada, pelo menos, até cerca de 4.000 anos a.C., época em que surgiu o arado, inventado pelos egípcios (CASSOL; DENARDIN; KOCHHANN, 2007; DENARDIN et al., 2011). Cassol et al. (2007) relatam que dentre todas as ações realizadas para conservar o solo, a mais eficiente foi o sistema plantio direto (PD). Inicialmente, as expressões plantio direto, semeadura direta e semeadura sem preparo do solo foram conceituadas como simples práticas conservacionistas, especialmente voltadas ao controle da erosão hídrica (DENARDIN et al., 2011).

De acordo com Denardin et al. (2011), o ano 1969 foi apontado como marco histórico da introdução do plantio direto no Brasil. Adotado na região Sul do país, onde predominava a sucessão de culturas de trigo (*Triticum aestivum* L.) no inverno e soja (*Glycine max* L.) no verão, o plantio direto teve como objetivo reduzir as perdas de solo devido as altas intensidades de chuva no Estado, principalmente no período de primavera-verão coincidindo com a época de semeadura das culturas, onde as lavouras em preparo convencional estavam com os solos descobertos. Segundo Denardin et al. (2011) em decorrência da relevante contribuição do plantio direto para a conservação do solo, essa tecnologia passou a ser adotada e entendida como um sistema alternativo de manejo do solo, com potencial para minimizar a intensa erosão hídrica instalada nas lavouras.

Com o avanço das pesquisas de campo a partir dessa época, na década de 1980 recebeu a denominação de sistema plantio direto (DENARDIN et al., 2011; CASSOL; DENARDIN; KOCHHANN, 2007). Assim, passou a ser

conceituado como um conjunto de técnicas destinado à exploração de sistemas agrícolas (DENARDIN; FAGANELLO; SANTI, 2008). Além da mobilização de solo apenas na linha de semeadura e da manutenção dos resíduos culturais na superfície, já contemplados no conceito de plantio direto, nessa nova denominação para sistema plantio direto, passou a ser considerado essencial a diversificação de espécies via rotação e/ou consorciação de culturas e a cobertura permanente do solo, seja por plantas vivas ou por restos culturais (DENARDIN et al., 2011).

Em relação às propriedades físicas do solo, tem-se um grave problema que preocupa pesquisadores e agricultores que adotaram esse sistema: a presença de uma camada subsuperficial com estrutura mais compactada, ocasionada por fatores como pressões externas de máquinas agrícolas, efeito do histórico do “pé-de-arado/grade”, tráfego intenso em condições de solo com consistência plástica e perda de matéria orgânica por baixa diversificação de culturas e baixo aporte de resíduos (DENARDIN et al., 2011). O fato de muitos produtores não cumprirem com alguns preceitos fundamentais na adoção do sistema plantio direto, tem gerado falhas na conservação do solo para a sustentação da agricultura em escala competitiva em nível nacional. De acordo com Denardin et al. (2011), dentre essas falhas têm-se a incipiente utilização de rotação de culturas, insuficiente cobertura de solo, manejo inadequado do sistema integração lavoura-pecuária, ausência de práticas mecânicas para manejo do escoamento superficial, abandono da semeadura em contorno, escarificações esporádicas do solo sob justificativas mal fundamentadas.

Diante desses problemas documentados em trabalhos de pesquisa no Brasil e no mundo, ocorre a degradação física da estrutura do solo em áreas manejadas em plantio direto, principalmente em solos com maior grau de compactação. Portanto, o manejo da compactação ainda é um assunto que necessita de pesquisas com respostas à mitigação deste problema.

2.2. Estrutura do solo após conversão do preparo convencional e reduzido para o plantio direto

O preparo do solo é definido como a mobilização mecânica do solo a fim de condicionar a germinação, o crescimento e estabelecimento das plantas

e a produção agrícola, afetando as características estruturais do solo, como os fluxos de ar e água, o armazenamento de água e temperatura do solo (BUSARI et al., 2015), além de reduzir mecanicamente as restrições físicas (GAJRI; ARORA; PRIHAR, 2002). No entanto, os sistemas agrícolas de diversos lugares ao redor do mundo que estavam sob longo tempo em preparo convencional (aração e gradagem) e preparo reduzido (escarificação) estão modificando o sistema de manejo de solo, passando a adotar sistemas de manejo com menor revolvimento, como o PD (REICHERT et al., 2016). A conversão do preparo convencional para os preparos conservacionistas, quando feito de acordo com os princípios do sistema, pode melhorar a estrutura do solo, aumentar o carbono orgânico, minimizar os riscos de erosão, aumentar a capacidade de armazenamento de água, diminuir a amplitude térmica e melhorar a qualidade estrutural do solo (BUSARI et al., 2015).

Experimentos de longa duração realizados pela Embrapa Soja em Londrina-PR têm demonstrado os efeitos sobre a estrutura do solo após adoção do PD em áreas com histórico de diferentes sistemas de manejo. Os resultados mostram que, para as condições de solos argilosos (diferente do solo deste estudo), durante as primeiras quatro safras após a adoção do PD, a produtividade da soja é similar ou pouco inferior à obtida no preparo convencional (FRANCHINI et al., 2009). Segundo estes autores, a partir do quinto ano, quando o sistema atinge certa “maturidade”, a produtividade da soja normalmente é maior no PD do que no preparo convencional. De forma geral, os benefícios do PD são mais evidentes em anos com irregularidade de precipitação. Isso demonstra que este sistema de manejo, quando adotado em sua plenitude, aumenta a eficiência de uso da água pelas plantas, conferindo estabilidade à produção de grãos frente à ocorrência de períodos de déficit hídrico (FRANCHINI et al., 2009). Em trabalho realizado por Vicente et al. (2010), verificou-se que na sétima safra de PD em áreas anteriormente manejadas em preparo convencional, a soja apresentou maior produtividade, quando em rotação e diversificação de culturas. No entanto, em áreas onde houve sucessão de trigo-soja, esse tempo chegou a 10 anos para atingir a maturidade.

Diversos trabalhos têm buscado avaliar os benefícios do plantio direto (MORAES et al., 2014, 2016, 2017; MUNKHOLM et al., 2001, 2008;

REICHERT et al., 2016) em relação aos diferentes sistemas de manejo, porém há poucas informações sobre o comportamento dos solos na organização estrutural ao longo do tempo e os resultados têm sido controversos (BLANCO-CANQUI et al., 2017; BLANCO-CANQUI; RUIS, 2018). De modo geral, o grande número de trabalhos relatados na literatura avalia a descompactação do PD com intervenção mecânica, com diferentes intervalos de tempo. No caso do presente estudo, foram avaliadas diferentes condições de conversão para o PD, sem proceder qualquer intervenção mecânica após a adoção desse sistema de manejo.

2.3. Influência do sistema radicular na estruturação do solo

O uso de plantas de cobertura para reduzir as restrições físicas, processo conhecido como descompactação biológica do solo, em sistemas de rotação de culturas com espécies que tenham sistema radicular vigoroso e com capacidade de crescer em solos com alta resistência mecânica à penetração, promovem melhorias na estrutura do solo (SILVA; ROSOLEM, 2001). Dentre as forrageiras tropicais, as plantas do gênero *Brachiaria* se destacam pela alta adaptação em condições de clima e solos brasileiros, além da produção satisfatória de biomassa praticamente o ano todo, proporcionando cobertura do solo, especialmente em PD. A semeadura do milho sobre braquiária dessecada vem se destacando na diversificação de culturas do PD, haja vista que a pastagem apresenta excelente cobertura, podendo contribuir para o aumento da matéria orgânica do solo e permitir a rotação e/ou consorciação de culturas (SALTON; TOMAZI, 2014). Portanto, uma das modalidades do emprego da palha de braquiária, além do seu volumoso sistema radicular, seria a utilização dessa gramínea para compor o PD em áreas de soja, como relatado por Mariani et al. (2012) em trabalho realizado no norte do RS.

No entanto, o uso da braquiária na presente pesquisa foi de estudar o potencial desta na produção de massa seca da parte aérea e de raízes, nas condições edafoclimáticas do experimento, com objetivo na estruturação do solo. A estrutura do solo é importante por controlar diversos processos no ambiente solo-raiz (RABOT et al., 2018). Regula a infiltração e retenção de água, trocas gasosas, dinâmica de nutrientes, resistência à penetração de raízes e suscetibilidade à erosão (RABOT et al., 2018). A estrutura também

constitui o habitat de organismos do solo (VEZZANI et al., 2018), impulsionando a diversidade e regulando sua atividade microbiológica (ELLIOTT; COLEMAN, 1988; VEZZANI et al., 2018).

Segundo Brady e Weil (2013) as raízes crescem através da formação e expansão de novas células no ponto de crescimento (meristema), que está localizado logo atrás da coifa, modificando fisicamente o solo. Além disso, na zona de alongamento fora do meristema, as células aumentam de comprimento, acompanhadas por um aumento no tamanho do vacúolo, e conseqüentemente, um aumento nas paredes celulares (GREGORY, 2006). Após alcançar um poro, a raiz cresce e se expande, exercendo forças laterais que o ampliam (BRADY; WEIL, 2013). Ao remover água do solo ao seu redor pela transpiração, causam expansão e contração da estrutura do solo, criando rachaduras e fendas, que por sua vez, aumentam a estabilidade das ligações organominerais (BRADY; WEIL, 2013). Portanto, as plantas desempenham papel fundamental no desenvolvimento da estrutura do solo, incluindo a formação de bioporos a partir do crescimento e rotação de diferentes sistemas radiculares (OADES, 1993). As gramíneas contribuem para esses processos devido à alta densidade de suas raízes, que promove a aproximação de partículas pela constante absorção de água do solo, como também às periódicas renovações do sistema radicular e à uniforme distribuição dos exsudados orgânicos ao solo, que estimulam a atividade microbiana (SILVA; MIELNICZUK, 1997), além de aportarem matéria orgânica no solo (SALTON; TOMAZI, 2014).

Segundo Garbout et al. (2012) a complexa interação solo-raiz é mais do que mutualismo, é uma espécie de simbiose. Esses autores argumentam que o solo fornece nutrientes, água e ancoragem para plantas, e as plantas desempenham um papel fundamental na manutenção e melhoria da qualidade do solo. Os resíduos das culturas são essenciais para a ciclagem de nutrientes, a biodiversidade do solo e a formação e estabilização da estrutura do solo (KAY; MUNKHOLM, 2011), bem como impedem o impacto direto da gota da chuva ou da irrigação sobre a superfície do solo, que se constitui na primeira e mais importante fase do processo erosivo, que é a desagregação (ELLISON, 1947).

O crescimento efetivo do sistema radicular requer uma contínua rede de poros no solo (TRACY et al., 2011). Em solos estruturados, as raízes das plantas se alongam preferencialmente através de uma rede de bioporos, mais ou menos arredondados, desenvolvidos principalmente pelas raízes e pela fauna do solo, além de rachaduras e pontos de fraqueza induzidos por processos abióticos (ATHMANN et al., 2013). Esta rede pode melhorar as condições de transporte de ar e água (SOANE et al., 2012) e formar rotas para o desenvolvimento de raízes verticais (EHLERS et al., 1983). Mobilizações mínimas do solo, como as realizadas no PD, especialmente quando combinadas com a manutenção de resíduos superficiais, podem aumentar a disponibilidade e o armazenamento de água do solo (BESCANSA et al., 2006). Isto não ocorre somente pelo aumento da cobertura do solo que resulta em menor evaporação, mas também porque essas estratégias de manejo geralmente desenvolvem um sistema de poros estruturais do solo que aumenta a capacidade de retenção de água (BESCANSA et al., 2006).

De acordo com Smucker (1986), em condições desfavoráveis ao desenvolvimento radicular, a quantidade de fotoassimilados direcionados para a manutenção das raízes é muito maior, pois um ambiente estressante fisicamente demanda maiores quantidades de carbono para o desenvolvimento de tecido adicional, para a manutenção da integridade das membranas, perdas por exsudação, e maior taxa de renovação celular ou de tecidos que fazem a interface solo-raiz. Estudos provaram que acomodação mais compacta das partículas do solo afetam negativamente as relações entre ar e água do solo (MENTGES et al., 2016), onde as raízes das plantas respondem à compactação por diferenciação na morfologia, sendo manifestadas no seu espessamento e/ou deflexão. Em trabalho com sistema radicular de plantas, Materechera et al. (1991) mostraram que o espessamento das raízes foi uma resposta significativa para as culturas. Por espessamento, as raízes são capazes de inserir maior pressão axial e maior capacidade de penetrar as camadas de solo (MISRA; DEXTER; ALSTON, 1986). Quando ocorre deflexão das raízes, estas frequentemente crescem horizontalmente até encontrar um poro vertical ou uma área de menor resistência, como relatado em estudo de campo por Munkholm (2000). Segundo esse autor, os bioporos mais verticais aumentam a probabilidade de raízes penetrarem em camadas compactadas.

2.4. Funcionalidade e organização dos poros estruturais

As raízes das plantas precisam de suprimentos, tanto de água quanto de oxigênio, os quais são fornecidos pelo solo (DEXTER, 1988). O fator fundamental da estrutura do solo que cumpre essa função de transporte de fluxos é a matriz porosa do solo (ABDOLLAHI; MUNKHOLM, 2017). Assim, as características dos poros do solo são importantes para uma ampla gama de funções essenciais, como o transporte de ar e água, habitat para organismos (MUNKHOLM; HECK; DEEN, 2012), bem como propriedades mecânicas como a resistência de agregados (MUNKHOLM, 2011).

Semelhante à hierarquia de agregados, uma hierarquia de poros também pode ser definida (ELLIOTT; COLEMAN, 1988). Segundo Ferreira (2010), dependendo do seu tamanho, os poros são classificados como macroporos, mesoporos e microporos, embora não haja limites de tamanhos definidos entre essas categorias. No entanto, há uma tendência de generalizar a adoção do diâmetro de 50 μm para separar macroporos de microporos (FERREIRA, 2010). A distribuição de tamanho dos poros e a porosidade total foram estudadas em diferentes condições de solo e são fortemente afetadas por práticas de manejo, manutenção de resíduos sobre a superfície e/ou incorporados, rotação e sucessão de culturas, espécies vegetais e uso do solo (MUNKHOLM et al., 2016; DAL FERRO et al., 2014; JARVIS; LARSBO; KOESTEL, 2017), afetando as propriedades hidráulicas do solo como a retenção e a infiltração de água (HILLEL, 2004; BLANCO-CANQUI et al., 2017; PIRES et al., 2017).

Dentro dessa dinâmica dos fluxos da matriz porosa do solo, o armazenamento e o movimento de água não são os únicos fatores que influenciam o desenvolvimento das plantas, devido à necessidade de aeração (DEXTER, 1988). As raízes das plantas precisam de oxigênio, e esse move-se muito lentamente através da água (aproximadamente 10.000 vezes menos) em relação a um poro sem água. Portanto, poros contínuos e preenchidos por ar são necessários no solo até pelo menos a profundidade do sistema radicular das culturas. O fornecimento de oxigênio às raízes depende de muitos fatores, incluindo a continuidade, conectividade, tortuosidade e o tamanho dos poros, bem como espaço livre de água (DEXTER, 1988). Em trabalho realizado por

Kadžienė et al. (2011), esses autores encontraram diferenças claras no limite de porosidade de aeração e de difusividade de oxigênio. Eles concluíram que o valor de 10% da porosidade de aeração não é uma estimativa satisfatória, e que o limite crítico para a aeração do solo, em áreas cultivadas com cereais, apresentou melhores previsões por medidas diretas da difusividade de oxigênio. Alguns autores relataram que uma redução na aeração do solo pode reduzir significativamente a produtividade das culturas, possivelmente associado com o menor desenvolvimento de raízes (ALAKUKKU, 1999; HAKANSSON; REEDER, 1994).

Diante disso, os sistemas de manejo do solo influenciam diretamente a estrutura e a funcionalidade do sistema poroso, alterando a continuidade e conectividade, principalmente de macroporos (TRACY et al., 2011). Além disso, a diminuição da macroporosidade e da conectividade dos poros causam diminuição da difusividade de gases e permeabilidade ao ar (CHEN; WEIL; HILL, 2014; KUNCORO et al., 2014). Enquanto a condutividade depende do fluido transportado (ar ou água) devido à sua densidade específica e viscosidade, a permeabilidade teoricamente é a mesma para todos os fluidos, pois descreve o sistema de poros com base no diâmetro, comprimento e conectividade. Assim, correlacionando permeabilidade ao ar com a porosidade de aeração, é possível obter informações sobre a continuidade dos poros (GROENEVELT; KAY; GRANT, 1984; BLACKWELL et al., 1990). A permeabilidade do solo ao ar representa a maior ou menor facilidade com que o ar atravessa um volume de solo, sendo fortemente influenciada pelas características dos poros (ROSEBERG; MCCOY, 1990). Portanto, Silva et al. (2009) sugerem que a permeabilidade ao ar pode ser usada na avaliação das alterações da estrutura do solo causadas pelo manejo.

Segundo Reichert et al. (2003), do ponto de vista físico, a qualidade do solo está associada com condições que permitem a infiltração, retenção e disponibilização de água às plantas, córregos e subsuperfície; as trocas de calor e de gases com a atmosfera e as raízes das plantas; e possibilita o crescimento radicular. A porosidade é importante para definir a qualidade física do solo, uma vez que os processos dinâmicos ocorrem nos poros. Na percepção da funcionalidade, os poros devem ser avaliados quanto à sua

eficiência no transporte de água, ar e calor. Portanto, eles devem executar suas funções no solo (MENEZES et al., 2018).

Considerando que o ar e a água podem ocupar os espaços disponíveis entre as partículas sólidas presentes no solo, a dinâmica destes fluidos na matriz porosa torna-se um fator chave para o entendimento do comportamento da estrutura dos solos em diferentes sistemas agrícolas. Neste sentido, a aplicação dos métodos de avaliação considerando as estratégias supracitadas é uma ferramenta viável para a caracterização da qualidade funcional do sistema poroso e suas relações com o crescimento de plantas. Entretanto, dada a complexidade de se caracterizar a estrutura de determinado solo, de seu caráter dinâmico e da grande variabilidade espacial e dos fatores que podem influenciá-la, há necessidade de avanços nessa área (FERREIRA, 2010).

2.5. Tomografia computadorizada de raio-X como análise direta da porosidade do solo

A tomografia computadorizada de raio-X (CT) é uma ferramenta recente para o estudo da matriz porosa do solo e suas inter-relações do solo com o meio. Esta técnica tem sido amplamente explorada nos últimos anos por sua capacidade de quantificar diretamente a estrutura em termos de porosidade (KATUWAL et al., 2015; RAB et al., 2014; PIRES; BACCHI, 2010; SCHLÜTER; WELLER; VOGEL, 2011; MUNKHOLM et al., 2012, 2013, 2016; GARBOUT; MUNKHOLM; HANSEN, 2013), friabilidade (MUNKHOLM; HECK; DEEN, 2012) e formato dos poros (PIRES et al., 2019; GALDOS et al., 2019).

Várias características de poros, como a conectividade, continuidade, diâmetro, tortuosidade e número tem sido quantificadas para avaliar o estado atual da estrutura do solo, os quais podem ser relacionados com parâmetros de permeabilidade ao ar e água (VOGEL; WELLER; SCHLÜTER, 2010; LARSBO; KOESTEL; JARVIS, 2014; NAVEED et al., 2013a). Devido à natureza não destrutiva e não invasiva da análise, podendo repetir as avaliações nas mesmas amostras sem danos no material (BERTOLLO, 2018), a CT permite que os dados das imagens sejam correlacionados com dados estruturais obtidos dos métodos de laboratório tradicionais (KATUWAL et al., 2015; PÖHLITZ et al., 2019). Com o avanço da tecnologia e da técnica, há uma

tendência crescente de usar CT na pesquisa científica aplicadas à ciência do solo (VAZ et al., 2014), especialmente na área de física do solo, analisando parâmetros envolvidos na compactação e na influência dos diferentes sistemas de manejo sobre a estrutura, como é o caso do presente estudo. Além disso, o desenvolvimento de scanners tomográficos mais modernos abriu possibilidade de análises com melhores resoluções (BERTOLLO, 2018). O método da CT também tem benefícios nas informações espaciais adicionais (RAB et al., 2014). Segundo esses autores, a distribuição espacial pode ser usada para determinar variações verticais micrométricas dentro de cada amostra, sendo importante para o estudo da interface solo-raiz e estudos de movimento de ar e água.

Diante do exposto, mais estudos ainda são necessários para quantificar o efeito combinado das características de geometria e continuidade dos poros (MUNKHOLM et al., 2016) em diferentes condições de clima e solo. Tais estudos poderiam ter como ponto de partida o uso de CT e relações com as ferramentas atuais em uso, a fim de obtermos informações que permitam entender como o sistema se recupera e, baseado nisso, aprimorar as atuais ferramentas de pesquisa. Um dos pontos abordados nesse trabalho foi a utilização dos parâmetros derivados das imagens tomográficas, que foram comparados e correlacionados com os parâmetros das avaliações de permeabilidade ao ar e difusividade de oxigênio, além da macroporosidade. Com os resultados, buscou-se investigar e validar se os parâmetros obtidos a partir das imagens seriam preditores da permeabilidade ao ar e a difusividade relativa de oxigênio no solo.

Além disso, abordou-se também nesse estudo diferentes resoluções de escala. Isso porque mudanças na estrutura do solo nem sempre são detectadas quando se usa um único tamanho de amostra, pois diferentes informações são obtidas a partir de diferentes níveis de observação (PICCOLI et al., 2019). Para cobrir as escalas relevantes de poros estruturais, Lucas et al. (2020) sugerem combinar pelo menos dois tamanhos de amostra. Primeiro, uma coluna de solo é digitalizada em resolução menor e, em seguida, as subamostras são extraídas e digitalizadas em uma resolução mais alta, e finalmente, a distribuição do tamanho dos poros de ambas as escalas pode ser comparadas e/ou mescladas (SCHLÜTER et al., 2018).

3. CAPÍTULO III - ORGANIZAÇÃO DO SOLO EM PLANTIO DIRETO A CURTO E LONGO PRAZO, AVALIAÇÃO DO SISTEMA RADICULAR E PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS

3.1. Introdução

O sistema de plantio direto (PD) traz inúmeros benefícios para o solo e para o meio ambiente (BLANCO-CANQUI et al., 2011). Dentre esses benefícios pode-se destacar a redução das perdas de solo, água e de nutrientes por erosão, aumento da matéria orgânica do solo nas camadas superficiais e da retenção de água. Além disso, solos sob PD apresentam estrutura mais organizada e estabilizada, com o desenvolvimento de bioporos criados pelo sistema radicular das plantas e pela atividade biológica.

O PD tem sido adotado em muitas áreas que eram manejadas em preparo reduzido e preparo convencional (REICHERT et al., 2016). Áreas sob preparo convencional normalmente apresentam uma camada compactada aproximadamente aos 20 cm de profundidade ao longo do tempo de utilização, onde os pneus dos tratores que trabalham dentro do sulco formam o que é denominado de “pé-de-arado”. Essa prática prejudica o desenvolvimento e produtividade das culturas, pela maior densidade do solo, maior resistência mecânica à penetração, redução da porosidade total, além de reduzir a permeabilidade ao ar e a água na camada compactada. Desse modo, tem se notado uma crescente adoção do PD para recuperar essas áreas com histórico de alto grau de revolvimento. O presente estudo faz parte de um projeto de investigação da organização estrutural do solo em um experimento de longa duração com PD continuamente e adoção de PD sobre áreas anteriormente

manejadas com escarificação e aração, sem intervenção mecânica após a conversão.

Poucos estudos têm sido reportados no Brasil sobre como a mudança permanente de manejo (interromper a mobilização do solo) afeta a estrutura do solo e as culturas ao longo do tempo. McGregor et al. (2006) relataram que a soja em PD teve maior produção a partir do quinto ano, em relação ao sistema de preparo convencional. Franchini et al. (2009) também constataram que a partir da quinta safra a cultura da soja começou a produzir mais em PD sobre preparo convencional, comparado com preparo convencional contínuo por longo período. No mesmo estudo, esses autores constataram que a produtividade de soja no PD, do quinto ao 14º ano após a conversão, teve uma média 62% maior do que no solo com preparo convencional. Portanto, experiências de campo em longo prazo podem contribuir e esclarecer os efeitos da evolução dos sistemas de manejo (FRANCHINI et al., 2012). A literatura tem mostrado que os resultados de produtividade são divergentes entre sistemas de manejo, pois dependem de vários fatores. Portanto, é importante realizar experimentos de campo de longa duração, usando os principais sistemas de cultivo de cada região, e avaliar as mudanças da estrutura do solo ao longo do tempo.

As características físicas dos solos têm grande influência na rede de poros. Especificamente, essas propriedades físicas controlam os arranjos das fases líquida, gasosa e sólida e suas conectividades, afetando diretamente os movimentos de ar e água (HAMAMOTO et al., 2016). Os parâmetros de transporte de gases e água são importantes indicadores da qualidade estrutural do solo que mantém o desenvolvimento das plantas (KUNCORO et al., 2014). Dentre esses parâmetros, tem-se a permeabilidade ao ar, que pode fornecer uma boa estimativa da estrutura do solo, pois causa mínimas perturbações na matriz do solo (NEVEED et al., 2013a). Groenevelt et al. (1984), e mais tarde Blackwell et al. (1990), usaram a permeabilidade ao ar e a porosidade de aeração em diferentes potenciais para caracterizar a estrutura dos poros do solo, usando a permeabilidade específica ao ar para identificar mudanças em diferentes sistemas de manejo (IVERSEN et al., 2001). A forma e o modo como essas propriedades mudam após a adoção do PD, merecem discussão e estudos, devido aos divergentes resultados encontrados na literatura

(BLANCO-CANQUI; RUIS, 2018), além de monitoramento em sistemas de manejo por longos períodos.

Além dos parâmetros físicos do solo, os efeitos dos sistemas de manejo sobre a estrutura e compactação do solo podem ser diagnosticados por diferentes formas, como a evidência de atividade biológica e o desenvolvimento radicular (WEILL; MUNKHOLM, 2015). A avaliação do sistema radicular das culturas torna-se uma importante ferramenta para monitorar as condições estruturais do solo impostas pelos sistemas de manejo, principalmente após adoção do PD. A resistência mecânica do solo à penetração é a principal propriedade que determina a acessibilidade das plantas à água, uma vez que regula amplamente as taxas de alongamento das raízes (COLOMBI et al., 2018). O crescimento das raízes no solo pode ser limitado pelas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. Sem essas informações, é difícil manejar o solo a fim de maximizar a produção agrícola (BENGOUGH et al., 2011). Recentemente, diversos estudos têm mostrado que o PD tem apresentado algumas restrições ao desenvolvimento das culturas, principalmente ao crescimento de raízes. É necessário um conhecimento aprimorado das interações solo-planta para planejar sistemas de manejo mais sustentáveis em relação à produtividade das culturas e à qualidade ambiental (MUNKHOLM; HANSEN; OLESEN, 2008).

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a organização estrutural do solo em diferentes tempos de plantio direto sobre áreas anteriormente manejadas em preparo reduzido e convencional. Além disso, foi comparado com um plantio direto em longo prazo. Foram utilizadas as culturas da soja, milho e braquiária nos dois últimos anos como culturas de verão. Foram determinados parâmetros físico-mecânicos e físico-hídricos, além das características das raízes e produtividade.

3.2. Material e métodos

3.2.1. Descrição da área experimental

O estudo foi conduzido em um experimento de longa duração instalado no ano de 2000 na Estação Experimental Agronômica da UFRGS, localizada no município de Eldorado do Sul/RS, região fisiográfica da Depressão Central, caracterizado por solos pouco profundos, com baixa

fertilidade natural, de textura franca e franco-argilosa (Tabela 1) e relevo com declividade média a moderada. Uma descrição morfológica geral e da área experimental encontram-se nos Apêndices 1 e 2, respectivamente. O solo da área é classificado como Argissolo Vermelho Distrófico típico (SANTOS et al., 2013). Conforme a classificação de Köeppen, o clima da região é do tipo Cfa, subtropical úmido, com temperatura média anual de 18,8 °C, sendo a temperatura mais baixa no mês de julho e a mais alta em janeiro. A precipitação média anual é de 1.455 mm, de acordo com a normal climatológica (BERGAMASCHI et al., 2013). A Figura 1 mostra a distribuição das chuvas nos dois últimos anos de condução do experimento, separada por decêndios.

Tabela 1. Descrição da análise granulométrica e teor de matéria orgânica do solo.

Profundidade (m)	Granulometria ¹				Matéria orgânica ²		
	Areia	Silte	Argila	Classe textural	17 PD	4 PD-PR	4 PD-PC
	----- g kg ⁻¹ -----				----- % -----		
0,0-0,10	462	291	247	Franca	2,3	2,2	1,9
0,10-0,20	437	285	278	Franco argilosa	2,0	1,8	1,8

¹ Retirado e adaptado de Stürmer (2012). Limites de diâmetro médio das partículas das frações granulométricas, areia: 2-0,05 mm; silte: 0,05-0,002 mm; argila: < 0,002 mm. ² Matéria orgânica foi determinada no verão de 2017, antes da implantação das culturas de verão; 17 PD: 17 anos em plantio direto contínuo; 4 PD-PR: plantio direto por 4 anos após 13 anos de preparo reduzido; 4 PD-PC: plantio direto por 4 anos após 13 anos de preparo convencional.

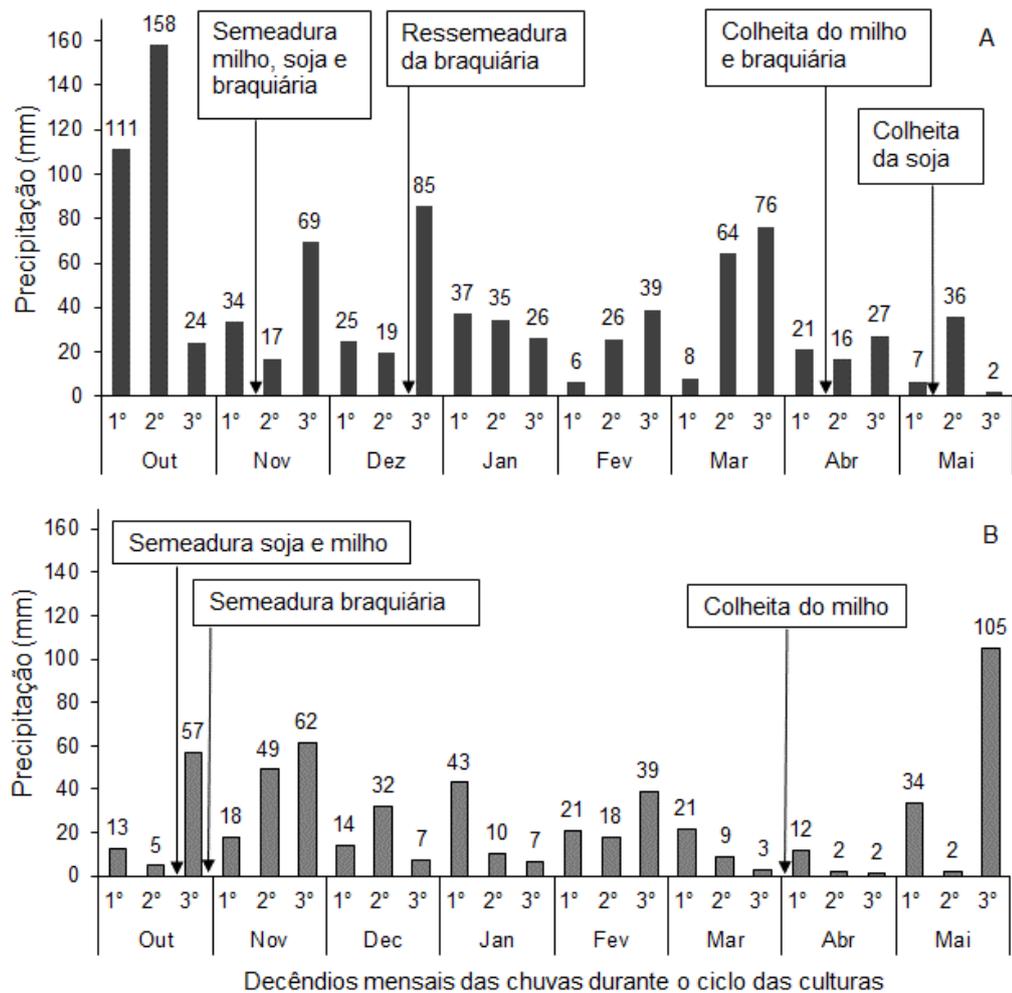


Figura 1. Precipitação ao longo do período experimental, por decêndios, mostrando as datas de semeadura e de colheita das culturas utilizadas nos anos de 2017/18 (A) e 2018/19 (B).

3.2.2. Histórico da área e condução dos preparos de solo

O experimento vem sendo conduzido desde o verão de 2000, quando foi implantado sobre uma área previamente ocupada por vegetação nativa. O experimento consistiu em diferentes sistemas de preparo do solo até o verão de 2013, dentre eles o plantio direto, preparo reduzido e preparo convencional. Esses preparos eram realizados antes da implantação das culturas de verão, uma vez ao ano. O plantio direto consistiu em semear as culturas diretamente sobre os resíduos deixados pelas culturas antecessoras (culturas dessecadas e sem preparo de solo). O preparo reduzido constituiu de uma escarificação realizada até 25 cm de profundidade antes da implantação das culturas de verão, usando um escarificador equipado com 5 hastes, 40 cm de espaçamento entre hastes e ponteiras com 6 cm de largura. O preparo

convencional consistiu em uma aração e duas gradagens, sendo realizada até 20 cm, com arado fixo, montado, de 4 discos de 28 polegadas, e gradagem com grade niveladora excêntrica, montada, de 36 discos de 20 polegadas de diâmetro. As culturas de verão foram soja (*Glycine max* L.) e milho (*Zea mays* L.), alternadamente, em todas as parcelas, e sempre que possível essas culturas de verão foram semeadas no mesmo dia em que eram realizados os preparos de solo. As culturas de inverno foram aveia preta (*Avena strigosa* Schreb), azevém (*Lolium multiflorum* L.) e ervilhaca (*Vicia sativa* L.).

No entanto, a partir do verão de 2014, todas as parcelas passaram a ser semeadas sem nenhum preparo prévio de solo, assim adotando o plantio direto em área total. As culturas de verão foram semeadas com semeadora de precisão, montada (Vence Tudo, modelo AS 11500), com 5 linhas espaçadas em 45 cm, com mecanismo de abertura do sulco para deposição de fertilizante do tipo facão atuando até 12 cm de profundidade. As culturas de inverno sempre foram semeadas diretamente sem preparo prévio (sobre os resíduos da cultura antecessora), com uma semeadora de fluxo contínuo, montada (Vence Tudo, modelo AS 11500A), com 11 linhas espaçadas em 17 cm e sulcadores tipo discos duplos, os quais depositam simultaneamente o adubo e as sementes no sulco de semeadura. Na Tabela 2 estão apresentadas as culturas que foram empregadas ao longo dos anos na área experimental, cultivando uma cultura por verão até 2016 em área total. Posteriormente, de 2017 em diante, iniciou-se o cultivo de três culturas sobre os três sistemas de preparo (plantio direto contínuo e as parcelas com históricos de preparo reduzido e convencional) (Figura 2). Além das culturas já cultivadas na área experimental de longo prazo, foi incluída a braquiária (*Brachiaria brizantha* cv Xaraés).

Tabela 2. Resumo do esquema de culturas empregadas no inverno e verão na área experimental entre os anos 2000 e 2019.

Ano	Inverno ¹	Verão
2000/01	Campo nativo	Soja
2001/02	Aveia preta + ervilhaca	Milho
2002/03	Aveia preta +ervilhaca	Soja
2003/04	Aveia preta	Milho
2004/05	Aveia preta	Pousio
2005/06	Aveia preta + ervilhaca	Soja
2006/07	Aveia preta + ervilhaca	Milho
2007/08	Aveia preta + ervilhaca	Soja
2008/09	Aveia preta + ervilhaca	Milho
2009/10	Azevém	Soja
2010/11	Aveia preta + ervilhaca	Milho
2011/12	Aveia preta + ervilhaca	Soja
2012/13	Aveia preta + ervilhaca	Milho
2013/14	Aveia preta + ervilhaca	Soja
2014/15	Aveia preta + ervilhaca	Milho
2015/16	Aveia preta + ervilhaca	Milho
2016/17	Aveia preta +ervilhaca	Soja
2017/18	Aveia preta	Milho/ Soja/ Braquiária
2018/19	Aveia preta	Milho/ Soja/ Braquiária

Soja (*Glycine max* L.); Milho (*Zea mays* L.); Braquiária (*Brachiaria brizantha*); Aveia preta (*Avena strigosa* Schreb); Ervilhaca (*Vicia sativa* L.); Azevém (*Lolium multiflorum* L.).

¹ Em determinados anos, o bloco V teve aveia branca (*Avena sativa* L.) e trigo (*Triticum aestivum* L.), pois era rotação de culturas; bloco III era mantido em pousio no inverno.

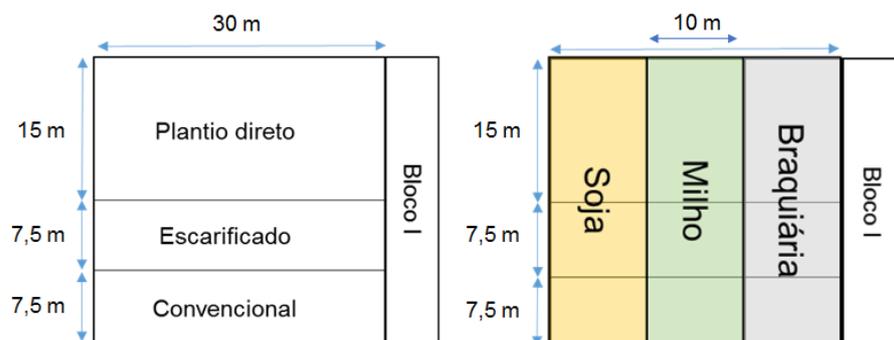


Figura 2. Croqui de um bloco da área experimental com as dimensões e disposição dos tratamentos de manejo do solo e culturas, na Estação Experimental Agronômica da UFRGS, Eldorado do Sul, RS.

3.2.3. Delineamento experimental e tratamentos

A área experimental implantada para se constituir essa pesquisa de longa duração possuiu delineamento de blocos casualizados com quatro repetições, arranjados em parcelas subdivididas, em esquema fatorial 3 x 3

(manejos do solo x culturas). Como não ocorrem mais preparos de solo desde 2014, será usado o termo manejo do solo para caracterizar os tratamentos de preparos. No ano de 2017/18, as parcelas principais foram compostas por 17 anos em plantio direto contínuo (17 PD); plantio direto por 4 anos após 13 anos de preparo reduzido (4 PD-PR); e plantio direto por 4 anos após 13 anos de preparo convencional (4 PD-PC). As sub parcelas foram constituídas pelas culturas da soja, milho e braquiária. Foi realizada uma segunda avaliação de determinados parâmetros físicos no ano de 2018/2019, sendo os tratamentos de manejo do solo designados como 18 anos em plantio direto contínuo (18 PD); plantio direto por 5 anos após 13 anos de preparo reduzido (5 PD-PR); e plantio direto por 5 anos após 13 anos de preparo convencional (5 PD-PC). As culturas foram mantidas nas mesmas parcelas durante os dois anos avaliados. Nesses dois anos estudados, todos os tratamentos foram cultivados com aveia preta no inverno (Tabela 2).

As parcelas dos manejos do solo 17 PD mediam 10,0 x 15,0 m, enquanto as parcelas 4 PD-PR e 4 PD-PC mediam 10,0 x 7,5 m (Figura 2), pois cada bloco media 30,0 x 30,0 m (cada faixa de cultura foi dividida em 10,0 m). No ano de 2017/2018, as três culturas foram semeadas no início de novembro, com espaçamento de 45 cm (soja com 15,3 e milho com 3,5 sementes por metro de linha) e 17 cm (braquiária). As sementes de soja foram inoculadas com *Bradyrhizobium* sp. e as parcelas adubadas com 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 60 kg ha⁻¹ de K₂O, aplicados em duas etapas (1/2 na base e 1/2 em cobertura à lanço). Na cultura do milho foram aplicados 110 kg ha⁻¹ de N (10 kg na base e o restante em cobertura), 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 30 kg ha⁻¹ de K₂O aplicados na base. A semeadura da braquiária foi realizada com semeadora de fluxo contínuo, utilizando-se 36 kg ha⁻¹ de sementes. Foram aplicados 100 kg ha⁻¹ de N, 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 30 kg ha⁻¹ de K₂O apenas em cobertura. No entanto, essa cultura precisou ser ressemeada no final de dezembro devido à baixa germinação e estabelecimento das plantas na primeira semeadura. Assim, permaneceu menos tempo do que as demais no primeiro ano de implantação (ressemeada em torno de 40 dias após a primeira tentativa).

A aveia preta foi semeada no final de maio, espaçada em 17 cm, numa densidade de 80 kg ha⁻¹ de sementes nos últimos dois anos, usando a mesma semeadora da braquiária. Ressalta-se que foram utilizados os mesmos

implementos de preparo e de semeadura ao longo de todos os anos na área experimental (2000 – 2019). No início de abril de 2018 foi colhido o milho e no início de maio foi colhida a soja, juntamente com a massa seca da braquiária. O trator usado para todas as operações no campo experimental foi um John Deere, modelo 5600 com tração dianteira auxiliar (TDA), possuindo um peso total de ~3.500 kg. A pressão de inflação dos pneus do eixo dianteiro era de 24 psi (~165 kPa) (12.4-24 R1) e dos pneus do eixo traseiro de 20 psi (~137 kPa) (18.4-30 R1). Os resíduos das culturas de verão permaneceram no campo após a colheita e foram uniformemente distribuídos pelo sistema picador-distribuidor da colhedora. As culturas de inverno atuaram como cobertura de solo e seus resíduos mantidos nas parcelas.

No segundo ano (2018/2019), todas as culturas foram semeadas no final de outubro, uma única vez. Portanto, nesse ano a braquiária ficou em tempo igual as demais culturas sobre a área. Foram realizados os mesmos tratamentos culturais (os quais ocorreram de acordo com a necessidade), com os mesmos equipamentos. No entanto, a adubação da soja foi 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 90 kg ha⁻¹ de K₂O (adubação de base e cobertura). Na cultura do milho, foram aplicados 155 kg ha⁻¹ de N, 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 50 kg ha⁻¹ de K₂O (adubação de base e cobertura). Na braquiária foi realizado apenas adubação nitrogenada, com 70 kg ha⁻¹ de N em cobertura. O milho foi colhido no início de abril de 2019. A soja não foi colhida em 2019 devido a problemas com pragas e seca, o que acarretou baixo enchimento de grãos.

3.2.4. Amostragem de solo

As amostragens de solo do presente estudo foram realizadas no verão de 2017/18 e de 2018/19 (meados de março de 2018 e 2019). As amostras com estrutura preservada foram coletadas utilizando anéis de aço (~4,0 cm de altura e ~5,7 cm de diâmetro, ~102 cm³), no centro das camadas de 0-10, 10-20 e 20-30 cm (Figura 3), totalizando 216 amostras no primeiro ano (4 blocos x 9 tratamentos x 3 profundidades x 2 anéis por profundidade) e 108 amostras no segundo ano (4 blocos x 9 tratamentos x 3 profundidades x 1 anel por profundidade). Os anéis para as coletas das amostras foram inseridos no solo utilizando um suporte metálico com o uso de uma marreta. Após serem

extraídas, as amostras foram seladas em plástico filme e mantidas no laboratório sob refrigeração para reduzir a atividade biológica.



Figura 3. Esquema de coleta das amostras indeformadas nas três camadas de solo avaliadas.

3.2.5. Avaliação de parâmetros físico-mecânicos do solo

As amostras de solo com estrutura preservada foram usadas para determinar a densidade do solo (D_s), macroporosidade (Mac), microporosidade (Mic), porosidade total (PT), condutividade hidráulica do solo saturado (k_{sat}), permeabilidade ao ar (k_a) e a curva de retenção de água. A D_s foi determinada pela razão entre a massa de solo seco (M_{ss}) em estufa a 105 °C e o volume dos respectivos anéis cilíndricos (V_c) (Equação 1):

$$D_s = M_{ss}/V_c \quad (1)$$

A porosidade total (PT) foi derivada da densidade do solo (D_s) em cada amostra e da densidade de partículas (D_p), assumindo um valor de 2,53 g cm^{-3} determinada em três amostras de cada camada de solo da parcela 17 PD, pelo método do balão volumétrico (TEIXEIRA et al., 2017) (Equação 2):

$$PT = 1 - (D_s/D_p) \quad (2)$$

A microporosidade (Mic) foi determinada utilizando o conteúdo de água retido nas amostras equilibradas no potencial de -6 kPa (M_{s6kPa}) e a massa de solo seco (M_{ss}) pelo volume dos anéis cilíndricos (V_c) (Equação 3):

$$\text{Mic} = (\text{Ms}_{6\text{kPa}} - \text{Mss}) / V_c \quad (3)$$

A macroporosidade (Mac) foi determinada por diferença de volume, ou seja, diferença entre o volume da PT e o volume de Mic (Equação 4):

$$\text{Mac} = \text{PT} - \text{Mic} \quad (4)$$

No primeiro ano de avaliação foram obtidos dados de resistência mecânica à penetração no campo (RP). Para esta avaliação foi utilizado um penetrômetro modelo SoloTrack PLG5300 desenvolvido pela Falker Automação Agrícola, que registrou e armazenou digitalmente dados da força aplicada com leituras de 10 em 10 mm. O medidor segue as recomendações da norma internacional ASAE S.313.3 (ASAE, 1999) para as dimensões do cone. Utilizou-se o cone tipo 2 com diâmetro de 12,8 mm. A velocidade de inserção da haste foi de 24 mm s⁻¹ com ângulo do cone de 30°.

As medições foram marcadas em uma transecta de 10 em 10 cm, com 10 pontos amostrais por sub parcela até 40 cm de profundidade, aleatoriamente e transversalmente às linhas de semeadura. Em função do teor de água influenciar diretamente nesta avaliação, coletaram-se amostras de solo para a determinação da umidade gravimétrica nas camadas de 0-10, 10-20 e 20-40 cm. A distribuição espacial de cada avaliação foi de aproximadamente 2,0 m do ponto de coleta das amostras indeformadas. Essa avaliação foi realizada cerca de 60 dias após a semeadura da aveia, no inverno de 2018. Buscou-se avaliar a RP com conteúdo de água no solo mais próximo possível da capacidade de campo (CC).

3.2.6. Avaliações de parâmetros físico-hídricos do solo

Nas amostras com estrutura preservada foram colocadas tela de nylon fixadas com atilho de borracha para evitar perda de solo na extremidade inferior. Em cada amostra foi colocado um sobre anel com vedação por fita isolante para a análise da condutividade hidráulica do solo saturado (k_{sat}). Posteriormente, as amostras foram lentamente saturadas em água por capilaridade por 48 h e determinada a k_{sat} pelo método de carga decrescente, utilizando medidores metálicos com diferenças de alturas sobre as amostras saturadas e dentro do sobre anel saturado. A metodologia de carga decrescente utilizada foi uma adaptação de Reynolds e Elrick (2002), sem a utilização do tanque (Figura 4a), sendo expressa pela Equação (5):

$$k_{\text{sat}} = (\frac{\varnothing}{\varnothing_s})^2 (H/t) \ln (h_0/h_1) \quad (5)$$

Sendo, k_{sat} a condutividade hidráulica do solo saturado [LT^{-1}], \varnothing o diâmetro do anel volumétrico sem solo (sobre anel) [L], \varnothing_s o diâmetro do anel volumétrico com solo (amostra de solo) [L], H é a altura da amostra de solo [L], h_0 e h_1 as alturas de referência (alturas das hastes dos medidores metálicos + H) [L] e t é o tempo do nível da água em h_0 até atingir o nível em h_1 [T] de deslocamento total da coluna de água entre h_0 e h_1 (Figura 4b). Durante essas determinações, foi medida a temperatura da água para correção da viscosidade e a densidade.

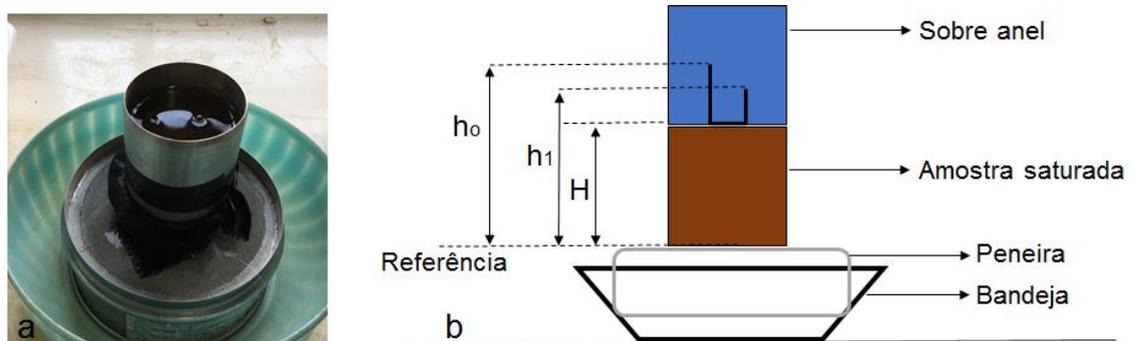


Figura 4. Ensaio de condutividade hidráulica do solo saturado pelo método adaptado de carga decrescente (a) e esquema das dimensões usadas na determinação do valor de k_{sat} (b).

Após as determinações de k_{sat} , as amostras permaneceram saturadas até serem submetidas aos diferentes potenciais matriciais nas mesas de tensão e nas câmaras de Richards para atingirem o equilíbrio hidráulico em cada potencial, e assim, construir a curva de retenção de água. A curva de retenção foi ajustada conforme Van Genuchten (1980). A curva de frequência de distribuição do tamanho dos poros foi determinada pela primeira derivada da equação de ajuste da curva de retenção de água no solo (PREVEDELLO; ARMINDO, 2015) (Equação 6):

$$(d\theta/dh) = [-\alpha^n(\theta_s - \theta_r)mn(|\psi_m|)^{n-1}] / [1 + (\alpha|\psi_m|)^n]^{m+1} \quad (6)$$

Sendo que θ_r e θ_s representam os conteúdos de água residual e conteúdo na saturação [L^3/L^3], respectivamente; α , n e m ($m = 1 - 1/n$) são parâmetros empíricos e determinados pelo ajuste da equação de Van Genuchten (1980); e ψ_m é o potencial matricial.

Já o diâmetro equivalente de poros foi determinado pela teoria da capilaridade (HILLEL, 2004). Nas mesas de tensão, as amostras foram equilibradas a -6 kPa. Nas câmaras de Richards foram equilibradas em -10, -33, -100 e -300 kPa. Com um psicrômetro WP4, foi medido o potencial matricial a -1500 kPa (ponto de murcha permanente, PMP), onde a umidade na câmara se equilibra com o potencial de água das amostras, sendo este calculado com base na temperatura do solo e do ar, no ponto de orvalho (SCANLON; ANDRASKI; BILSKIE, 2002). A partir da curva de retenção de água, foi determinada a água disponível para as plantas (AD), segundo White (2006), a qual corresponde ao volume de água retido entre a capacidade de campo (CC) (-10 kPa) e o PMP (-1500 kPa). Foi também calculada a capacidade de ar (CAr), sendo essa a diferença entre o conteúdo de água do solo saturado ou porosidade total e o conteúdo de água na CC (REYNOLDS et al., 2008) em cada tratamento.

Após o equilíbrio hidráulico nos potenciais de -6 kPa (considerado nesse estudo como macro/microporosidade), -10 e -33 kPa, as amostras de solo foram pesadas e estabelecido um fluxo de ar para quantificar a permeabilidade ao ar (k_a), utilizando o permeâmetro proposto por Prevedello e Armindo (2015). Nessa metodologia, a medida que a água ascende na câmara de ar, o ar adquire uma pressão maior que a atmosférica, fluindo pela amostra de solo e a permeabilidade ao ar (k_a) pode ser então calculada pela densidade de fluxo e pela diferença de pressão entre o ar na câmara e o ar atmosférico (PREVEDELLO; ARMINDO, 2015). A partir da Lei de Darcy, a densidade de fluxo de ar (q) pode ser descrita (Equação 7):

$$q = (-k_a/\eta)(\partial P/\partial z + \rho g) \quad (7)$$

Sendo, (q) [L/T], (k_a) a permeabilidade ao ar [L²], (P) a pressão de ar [M/LT²], (z) a distância [L] na direção do movimento de ar no sistema poroso, (η) a viscosidade do ar [M/LT], (ρ) a densidade do ar [M/L³] e (g) a aceleração da gravidade [L/T²]. Para corrigir a viscosidade do fluido, foi verificada apenas a temperatura do ar dentro do laboratório em cada ensaio de k_a , não sendo verificada a temperatura da água. A densidade do fluxo corresponde a vazão de ar (Q) [L³/T] por área perpendicular ao movimento de fluido (A_s) [L²] e,

considerando como desprezível a influência da densidade do ar, tem-se a Equação 8:

$$k_a = (Q^* \eta / A_s) (\partial z / \partial P) \quad (8)$$

Para estudar as características dos poros do solo, foi utilizado um índice de organização de poros, a permeabilidade específica ao ar (k_1) (GROENEVELT; KAY; GRANT, 1984), calculado com base na relação entre k_a e a porosidade de aeração (ϵ_a) para os potenciais matriciais de -6, -10 e -33 kPa, conforme Equação 9:

$$k_1 = k_a / \epsilon_a \quad (9)$$

3.2.7. Análise do sistema radicular das culturas

A amostragem do sistema radicular foi realizada nas três culturas, aos 149, 144 e 105 dias após a semeadura, respectivamente, para soja, milho e braquiária (ressaltando que essa cultura permaneceu ~40 dias a menos na área experimental em relação as demais). Essa avaliação foi realizada apenas no primeiro ano (2017/18). As raízes foram extraídas próximo de duas plantas de referência de cada parcela, em três blocos, em três profundidades (0-10, 10-20 e 20-30 cm) em torno de 6-7 cm da planta de referência na linha de semeadura (Figura 5). A retirada das amostras foi realizada com trado de 6,0 cm de diâmetro interno, com marcação a cada 10 cm, igualmente para todas as culturas. Portanto, com essa metodologia se tem um valor aproximado do volume radicular, estimado com base no volume amostrado pelo trado. Posteriormente, as raízes foram armazenadas sob refrigeração com o solo para conservação do material e redução da atividade biológica até o momento da separação.

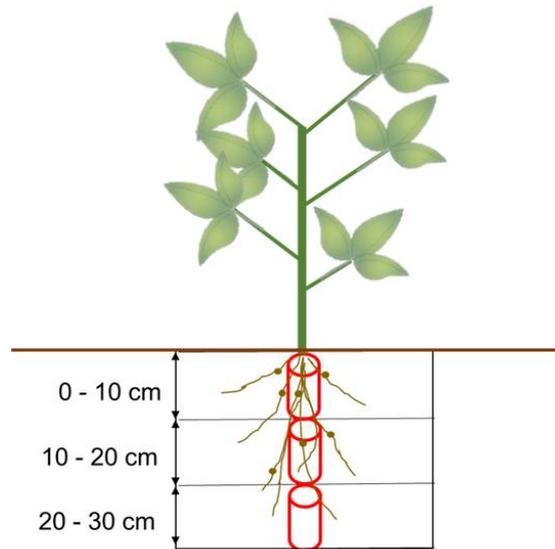


Figura 5. Posição da coleta das amostras do sistema radicular pelo método do trado, na linha de semeadura e aproximadamente 6-7 cm da planta de referência.

As raízes foram separadas das amostras de solo manualmente com pinças e peneiras (Figura 6), e mantidas em álcool 70% para conservação até o momento da digitalização. Após todas as amostras terem sido separadas e identificadas, foi realizado o escaneamento de 20% das raízes amostradas na camada de 0-10 cm, devido ao grande volume radicular. Para as amostras das camadas de 10-20 e 20-30 cm, escaneou-se todo o volume amostrado, utilizando um escâner HP Photosmart C4280. Utilizou-se o software SAFIRA desenvolvido pela Embrapa (JORGE; RODRIGUES, 2008), uma ferramenta para a análise de raízes através de processamento de imagens digitais para determinação do volume (VR), comprimento (CR), área superficial (AS) e diâmetro radicular (DR). Após escanear cada amostra de raiz, estas foram colocadas em estufa a 65°C por 96 h para determinação da massa seca em 100% do volume das raízes. Com a relação dos valores de massa seca e o volume de solo que estas ocupavam, obteve-se a densidade de massa seca de raiz (kg ha^{-1}) de cada camada avaliada e do total de 0-30 cm.



Figura 6. Separação das raízes com uso de peneiras.

3.2.8. Altura e produtividade das culturas

A determinação da altura das plantas de milho foi realizada aos 29 dias após a semeadura no primeiro ano, e aos 27 dias no segundo ano, sendo medidas 10 plantas por parcela. A produtividade do milho e soja foi avaliada pelo peso dos grãos de 30 m lineares por 45 cm de espaçamento em cada parcela, expressando os resultados em kg ha^{-1} e com correção para 13% de umidade. As determinações da parte aérea da braquiária (duas sub amostras por parcela) foram realizadas no mesmo período da colheita do milho. Foram compostas por todas as plantas contidas em um retângulo com dimensões de 60 x 40 cm (2.400 cm^2), que foram cortadas aproximadamente 3 cm de altura do solo. Após as coletas, as amostras foram identificadas e levadas para estufa até obterem massa constante, sendo os resultados expressos em kg ha^{-1} de massa seca.

3.2.9. Análise estatística

Os dados foram submetidos ao teste de Shapiro-Wilk para verificar a normalidade. A permeabilidade ao ar e condutividade hidráulica do solo saturado foram log-transformados antes das análises para atenderem a

normalidade. Foi feita a média dos dois anos de avaliação da condutividade hidráulica do solo saturado, devido à ausência de diferenças significativas e a alta variabilidade dos dados. A curva de retenção de água foi analisada estatisticamente com os dados observados, usando as curvas ajustadas para mostrar o comportamento da retenção em cada fator de tratamento.

Um modelo de parcelas subdivididas ANOVA foi utilizado neste estudo para testar a interação entre manejos do solo x culturas. Quando significativas, as médias dos tratamentos foram testadas usando o teste de Tukey a 5% de probabilidade. A análise estatística foi realizada utilizando o software R 3.40 (R FOUNDATION FOR STATISTICAL COMPUTING) em combinação com o pacote ExpDes (FERREIRA; CAVALCANTI; NOGUEIRA, 2014). Para correlações de Pearson entre características do sistema radicular e os parâmetros físicos foi utilizado o software SigmaPlot versão 14.0 (SYSTAT SOFTWARE, San Jose, CA). Para as regressões entre parâmetros das raízes e água disponível para as plantas (AD) foi utilizado o software Microsoft Office Excel®.

3.3. Resultados

3.3.1. Densidade e porosidade do solo

A Tabela 3 mostra os resultados dos parâmetros físicos densidade do solo (Ds), macroporosidade (Mac), microporosidade (Mic) e porosidade total (PT) nos dois anos de avaliação (2017/18 e 2018/19). Não houve interação entre os sistemas de manejo e as culturas. Os sistemas de manejo não afetaram significativamente os parâmetros do solo, nos dois anos avaliados, porém houve efeito das culturas sobre a Ds, Mic e PT (Tabela 3). Na camada de 0-10 cm, em ambos os anos não houve efeito dos sistemas de manejo e cultura. No ano de 2018/19, a cultura da braquiária tendeu a proporcionar menor Ds e maior PT ($p= 0,098$).

Tabela 3. Efeito dos diferentes sistemas de manejo e culturas sobre a densidade do dolo (Ds), macroporosidade (Mac), microporosidade (Mic) e porosidade total do solo (PT) em dois anos de avaliação em três camadas de solo.

2017/18					2018/19				
Tratamento	Ds (g cm ⁻³)	Mac (cm ³ cm ⁻³)	Mic (cm ³ cm ⁻³)	PT (cm ³ cm ⁻³)	Tratamento	Ds (g cm ⁻³)	Mac (cm ³ cm ⁻³)	Mic (cm ³ cm ⁻³)	PT (cm ³ cm ⁻³)
Camada de 0-10 cm									
Soja	1,60 A	0,10	0,26 B	0,36 A	Soja	1,57 A	0,09	0,29 A	0,38 A
Milho	1,55 A	0,12	0,26 B	0,38 A	Milho	1,58 A	0,08	0,30 A	0,38 A
Braquiária	1,59 A	0,10	0,25 B	0,36 B	Braquiária	1,49 B	0,11	0,30 A	0,41 A
17 PD	1,55	0,11	0,27 B	0,38	18 PD	1,52	0,10	0,30 A	0,40
4 PD-PR	1,58	0,11	0,25 B	0,36	5 PD-PR	1,54	0,10	0,29 A	0,39
4 PD-PC	1,60	0,11	0,26 B	0,37	5 PD-PC	1,58	0,08	0,30 A	0,38
Camada de 10-20 cm									
Soja	1,64	0,08 A	0,26 aB	0,35	Soja	1,58 b	0,10 A	0,28 A	0,38 a
Milho	1,65	0,09 A	0,26 aB	0,34	Milho	1,68 a	0,06 B	0,28 A	0,34 b
Braquiária	1,65	0,10 A	0,25 bB	0,35	Braquiária	1,61 ab	0,07 B	0,29 A	0,36 ab
17 PD	1,64	0,09	0,26 B	0,35	18 PD	1,63	0,08	0,28 A	0,36
4 PD-PR	1,65	0,09	0,26 B	0,35	5 PD-PR	1,63	0,07	0,28 A	0,36
4 PD-PC	1,65	0,08	0,25 B	0,34	5 PD-PC	1,61	0,08	0,28 A	0,36
Camada de 20-30 cm									
Soja	1,65 A	0,07 A	0,27 B	0,34 A	Soja	1,60 B	0,08 A	0,29 A	0,37 A
Milho	1,65 A	0,07 A	0,27 B	0,34 A	Milho	1,63 A	0,07 A	0,29 A	0,36 A
Braquiária	1,62 A	0,08 A	0,27 A	0,35 A	Braquiária	1,62 A	0,06 B	0,30 B	0,36 A
17 PD	1,65 A	0,07	0,28 B	0,34 B	18 PD	1,60 B	0,07	0,30 A	0,37 A
4 PD-PR	1,62 A	0,08	0,26 B	0,34 A	5 PD-PR	1,62 A	0,07	0,29 A	0,36 A
4 PD-PC	1,65 A	0,08	0,27 B	0,34 A	5 PD-PC	1,63 A	0,07	0,28 A	0,35 A

17 PD: 17 anos em plantio direto contínuo; 4 PD-PR: 4 anos em plantio direto após 13 anos de preparo reduzido; 4 PD-PC: 4 anos em plantio direto após 13 anos de preparo convencional; 18 PD: 18 anos em plantio direto contínuo; 5 PD-PR: 5 anos em plantio direto após 13 anos de preparo reduzido; 5 PD-PC: 5 anos em plantio direto após 13 anos de preparo convencional. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre tratamentos na mesma camada de solo. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha não diferem entre os anos, na mesma camada de solo (para o mesmo parâmetro físico pelo teste de Tukey ($p < 0,05$)).

Na camada de 10-20 cm as culturas influenciaram significativamente a Mic ($p < 0,05$) em 2017/18 (Tabela 3). Os tratamentos com soja e milho apresentaram Mic de $0,26 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, enquanto a braquiária apresentou $0,25 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. No ano seguinte (2018/19), nessa mesma camada também houve efeito significativo das culturas sobre a Ds e PT ($p < 0,05$). O tratamento com milho apresentou significativamente maior Ds do que a soja, $1,68$ e $1,58 \text{ g cm}^{-3}$, respectivamente, porém não diferindo da braquiária ($1,61 \text{ g cm}^{-3}$). Assim, as diferenças na PT foram inversamente proporcionais, com a soja apresentando maior PT, seguida da braquiária, e o milho com menor PT. Na camada de 20-30 cm não houve efeito significativo dos sistemas de manejo e culturas em ambos os anos avaliados (Tabela 3).

Além das diferenças observadas entre os tratamentos dentro de cada ano, foi realizada a comparação dos parâmetros entre os anos. De modo geral, em todas as camadas avaliadas a Mic sofreu influência entre os anos para todos os tratamentos, exceto na camada de 10-20 cm para a cultura da soja (Tabela 3). Na camada de 0-10 cm a cultura da braquiária reduziu a Ds e aumentou a PT. Na camada de 10-20 cm, os tratamentos milho e braquiária apresentaram redução da Mac. Na camada de 20-30 cm, o tratamento com a cultura da soja apresentou redução da Ds e conseqüentemente, aumento da PT. A braquiária causou redução da Mac de um ano para o outro nessa camada. O tratamento continuamente em plantio direto apresentou redução da Ds e aumento da PT de um ano para o outro.

3.3.2. Resistência mecânica à penetração

Os resultados da resistência mecânica à penetração (RP) revelaram efeitos significativos dos sistemas de manejo a partir de 17,5 cm de profundidade ($p < 0,05$) (Figura 7a). Os tratamentos 17 PD e 4 PD-PC apresentaram maiores valores de RP em relação ao tratamento 4 PD-PR, com esse apresentando significativamente menor resistência entre 22,5 e 27,5 cm e na profundidade de 37 cm. Não foi verificado efeito das culturas sobre a RP, apresentando valores críticos de 2,0 MPa (TAYLOR; ROBERTSON; PARKER, 1966; TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1998) em profundidades maiores que 27,5 cm (Figura 7b). O conteúdo de água do solo no momento das avaliações de RP estava ~25% acima da capacidade de campo (CC) em cada camada (CC

média dos manejos foi de 0,208, 0,211 e 0,215 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, respectivamente em 0-10, 10-20 e 20-30 cm de profundidade) e não apresentaram diferenças entre os tratamentos.

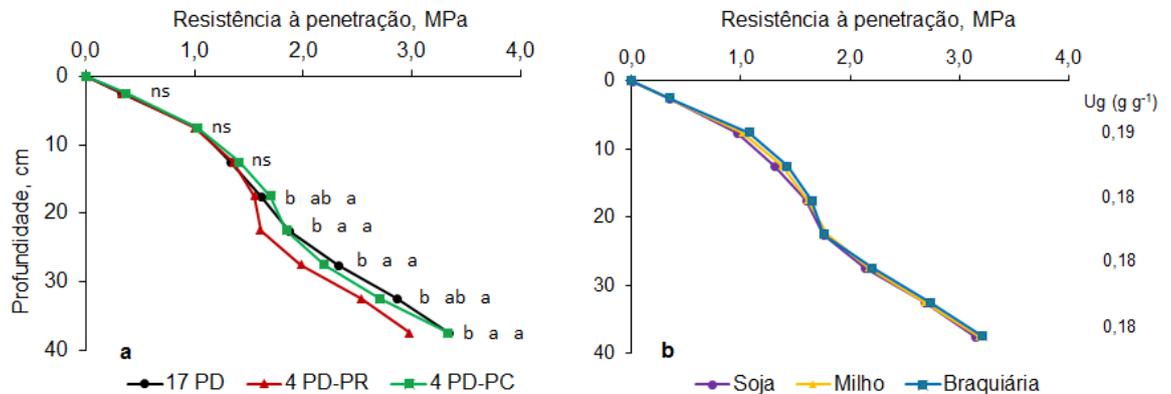


Figura 7. Resistência mecânica à penetração (RP) no primeiro ano de avaliação para os sistemas de manejo do solo (a) e culturas (b). No gráfico b está apresentada a umidade gravimétrica média no momento da avaliação de RP por camada de solo.

17 PD: 17 anos em plantio direto contínuo; 4 PD-PR: 4 anos em plantio direto após 13 anos de preparo reduzido; 4 PD-PC: 4 anos em plantio direto após 13 anos de preparo convencional. Médias seguidas pela mesma letra em uma determinada profundidade não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

3.3.3. Permeabilidade a água

Não foram encontradas diferenças entre os dois anos quanto à condutividade hidráulica do solo saturado (k_{sat}), sendo assim, foi feita a média dos anos (Tabela 4). A k_{sat} não apresentou interação significativa, nem diferenças entre as médias dos tratamentos. Na camada superficial de 0-10 cm, a k_{sat} variou de 118 a 230 mm h^{-1} para as culturas, onde o tratamento com milho apresentou uma tendência de maior valor, embora não diferindo das demais culturas. No entanto, essa cultura apresentou aproximadamente o dobro da k_{sat} em relação a soja e 22% maior que a braquiária na camada superficial. Nas camadas subsuperficiais de 10-20 cm e 20-30 cm, a k_{sat} variou de 89 a 139 mm h^{-1} e de 37 a 51 mm h^{-1} , respectivamente, porém não diferindo entre tratamentos. Analisando o perfil do solo de 0-30 cm, observa-se uma k_{sat} superior para a cultura do milho, embora não diferindo estatisticamente da braquiária e da soja. Nos manejos do solo, na camada 0-10 cm, a k_{sat} variou de 158 a 204 mm h^{-1} , na camada de 10-20 cm de 88 a 122 mm h^{-1} , e na camada de 20-30 cm de 28 a 55 mm h^{-1} sem tendências observadas. Na camada de 0-

30 cm, os tratamentos 4 PD-PR, 17 PD e 4 PD-PC apresentaram k_{sat} média de 127, 105 e 99 mm h^{-1} , respectivamente, porém não diferindo estatisticamente.

Tabela 4. Condutividade hidráulica do solo saturado (mm h^{-1}) avaliada nas culturas de verão nos diferentes manejos do solo e culturas, nas três camadas.

Tratamento ¹	Camada, cm			
	0-10	10-20	20-30	0-30
Cultura	mm h^{-1}			
Soja	118	139	37	98
Milho	230	89	51	123
Braquiária	189	95	44	109
Manejo				
17 PD	175	113	28	105
4 PD-PR	204	122	55	127
4 PD-PC	158	88	50	99

¹ Média dos dois anos de avaliação em cada tratamento. 17 PD: 17 anos em plantio direto, 4 PD-PR: 4 anos em plantio direto após 13 anos com preparo reduzido, 4 PD-PC: 4 anos em plantio direto após 13 anos com preparo convencional. Os valores são as médias das duas avaliações, verão de 2017/18 e 2018/19.

As relações entre k_{sat} e macroporosidade para as três culturas no primeiro ano de avaliação estão apresentadas na Figura 8a, e para o segundo ano na Figura 8b. Considerando uma macroporosidade de $0,10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, a condutividade hidráulica saturada foi de 57, 76 e 91 mm h^{-1} , respectivamente, para os tratamentos soja, braquiária e milho, no primeiro ano. A escolha desta macroporosidade é pelo fato de ser considerada crítica para algumas culturas (GRABLE; SIEMER, 1968). A partir desse limite, a linha de tendência do tratamento com milho em relação a k_{sat} começa a se distanciar das demais, e em torno de $0,14 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ as outras duas linhas soja e braquiária passam a se diferenciar.

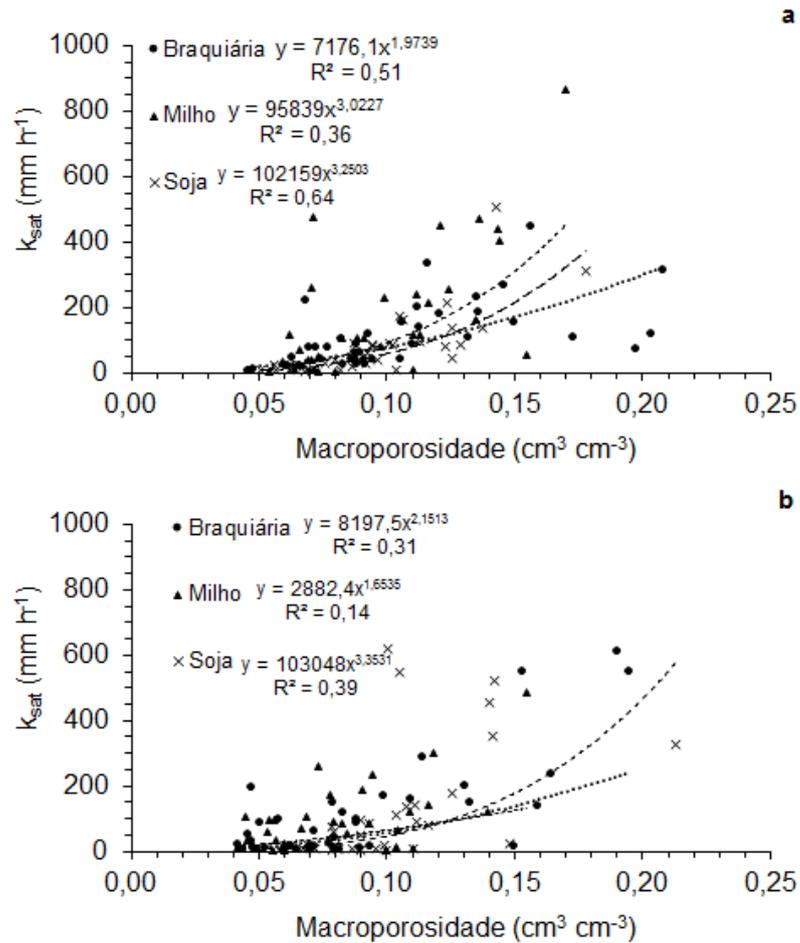


Figura 8. Relação entre condutividade hidráulica do solo saturado (k_{sat}) e a macroporosidade para os tratamentos soja, milho e braquiária no primeiro ano (a) e segundo ano de avaliação (b) das três camadas avaliadas.

3.3.4. Permeabilidade ao ar

Na Tabela 5 estão apresentados os resultados da permeabilidade ao ar (k_a) e porosidade de aeração (ϵ_a) em três potenciais matriciais. A k_a teve efeito dos tratamentos apenas na camada de 0-10 cm, sendo este na interação sistemas de manejo e culturas nos potenciais matriciais de -6 e -33 kPa (Tabela 5). No potencial matricial de -6 kPa, as culturas apresentaram efeitos ($p < 0,05$) nos sistemas de manejo 17 PD e 4 PD-PR, com destaque para o tratamento com milho, que apresentou 2,9 vezes maior permeabilidade ao ar do que a soja e 4,3 vezes maior que a braquiária. No potencial de -33 kPa, as culturas apresentaram efeitos ($p < 0,05$) apenas sobre o sistema 4 PD-PR, apresentando comportamento semelhante ao observado no potencial de -6 kPa.

Tabela 5. Permeabilidade ao ar (k_a) e porosidade de aeração (ϵ_a) avaliadas em três potenciais matriciais (kPa) para manejos do solo e culturas na camada superficial de 0-10 cm.

Tratamento	$k_a, \mu\text{m}^2$			$\epsilon_a, \text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$		
	-6	-10	-33	-6	-10	-33
Cultura						
Soja	33,8	39,7	59,0	0,10	0,15 b	0,17
Milho	54,5	76,2	127,1	0,12	0,19 a	0,20
Braquiária	28,3	37,3	47,6	0,10	0,15 b	0,18
Manejo						
17 PD	35,9	49,2	51,5	0,11	0,17	0,19
4 PD-PR	50,7	63,4	126,0	0,11	0,15	0,18
4 PD-PC	30,0	40,6	56,3	0,11	0,16	0,18
Manejo x cultura						
17 PD/ S	23,7 ab	31,1	39,0	0,11	0,16	0,18
17 PD/ M	68,3 a	91,1	83,9	0,14	0,20	0,22
17 PD/ B	15,7 b	25,4	31,6	0,09	0,13	0,17
4 PD-PR/ S	53,1 ab	57,3	90,0 ab	0,10	0,15	0,17
4 PD-PR/ M	74,5 a	104,3	264,1 a	0,13	0,18	0,21
4 PD-PR/ B	24,5 b	28,7	24,0 b	0,09	0,14	0,16
4 PD-PC/ S	24,5	30,7	48,2	0,09	0,14	0,16
4 PD-PC/ M	20,7	33,4	33,1	0,10	0,16	0,19
4 PD-PC/ B	44,7	57,2	87,3	0,13	0,17	0,20

17 PD: 17 anos em plantio direto, 4 PD-PR: 4 anos em plantio direto após 13 anos com preparo reduzido, 4 PD-PC: 4 anos em plantio direto após 13 anos com preparo convencional. S: soja; M: milho e B: Braquiária. Médias seguidas pela mesma letra no mesmo potencial matricial (coluna) não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Fish e Koppi (1994) classificaram a k_a em diferentes classes baseado em avaliações de campo. De acordo com essa classificação, os três potenciais apresentam k_a dentro das classes lenta (k_a entre 21 – 50 μm^2) e moderada (k_a entre 51 – 100 μm^2), exceto para os tratamentos milho e o 4 PD-PR, que apresentaram k_a superior a 100 μm^2 (Tabela 5). As Figura 9a e 9b mostram a permeabilidade específica ao ar (k_1), no potencial matricial de -6 e -33 kPa, respectivamente. Os sistemas de manejo não influenciaram significativamente a k_1 no potencial de -6 kPa (Figura 9a). No entanto, o tratamento com milho apresentou significativamente maior k_1 comparado com a soja e a braquiária, indicando então poros mais contínuos e/ou menos tortuosos. A Figura 9b apresenta o k_1 no potencial matricial de -33 kPa, com interação significativa ($p < 0,05$) entre os manejos e culturas, onde no manejo do solo 17 PD e no 4 PD-PR, a cultura do milho apresentou maior média,

porém não diferindo do tratamento com soja. A cultura da braquiária apresentou tendência ($p= 0,16$) de maior k_1 no sistema de manejo 4 PD-PC (Figura 9b).

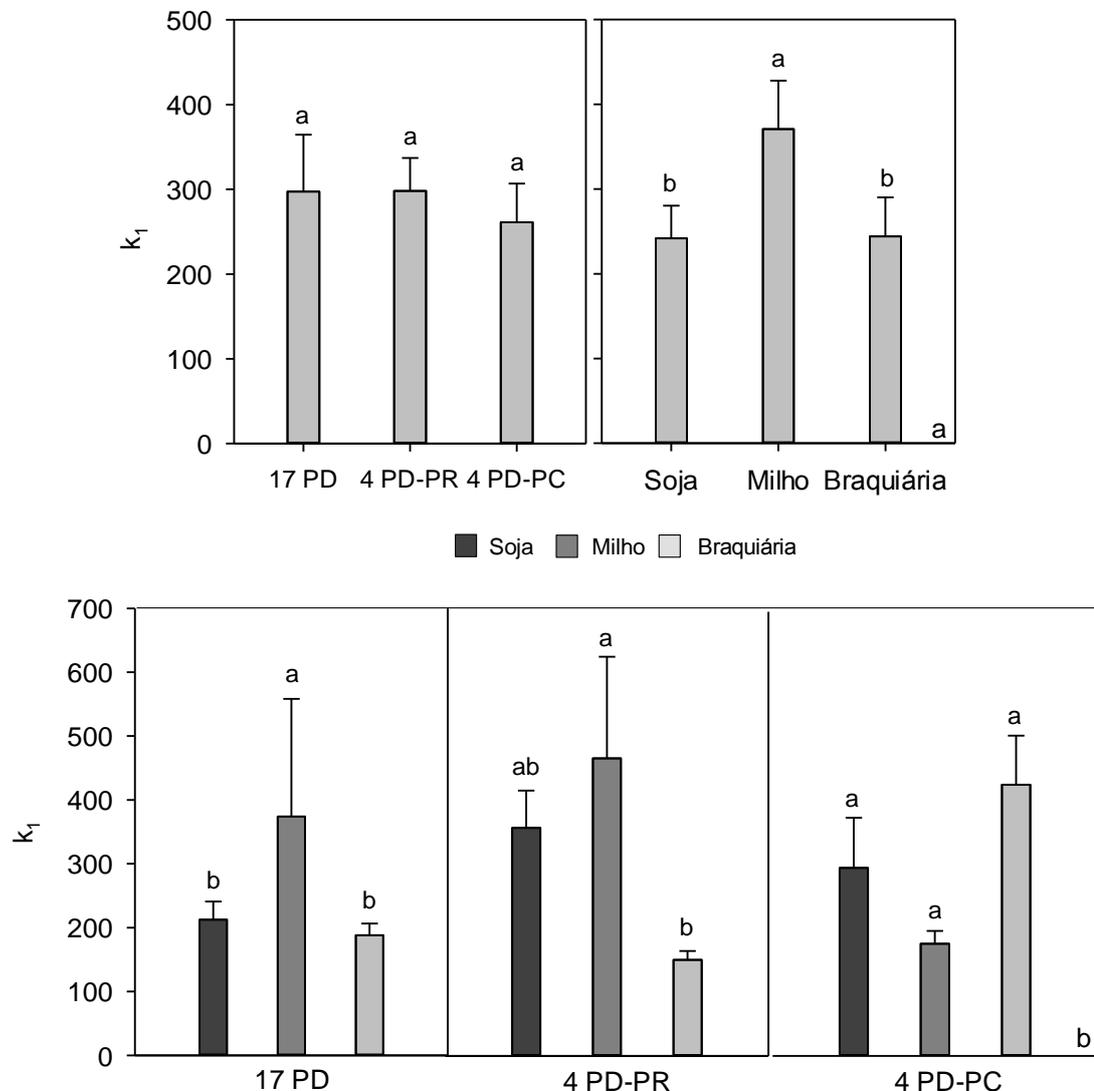


Figura 9. Permeabilidade específica ao ar (k_1) para os sistemas de manejo e culturas, no potencial matricial de -6 kPa (a) e -33 kPa (b) na camada de 0-10 cm.

17 PD: 17 anos em plantio direto, 4 PD-PR: 4 anos em plantio direto após 13 anos com preparo reduzido, 4 PD-PC: 4 anos em plantio direto após 13 anos com preparo convencional. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). As barras indicam o erro padrão da média.

As Figuras 10a e 10b mostram a capacidade de ar (CA_r), parâmetro do estado de aeração do solo que relaciona a porosidade de aeração (ϵ_a) drenada a -10 kPa com a porosidade total. Não houve efeito significativo dos sistemas de manejo sobre esse parâmetro (Figura 10a), apenas para as

culturas (Figura 10b). O tratamento com milho apresentou significativamente ($p < 0,05$) maior CAR em relação as culturas da soja e da braquiária. Estes resultados estão de acordo com a k_a e k_1 , onde a cultura do milho também apresentou maiores valores.

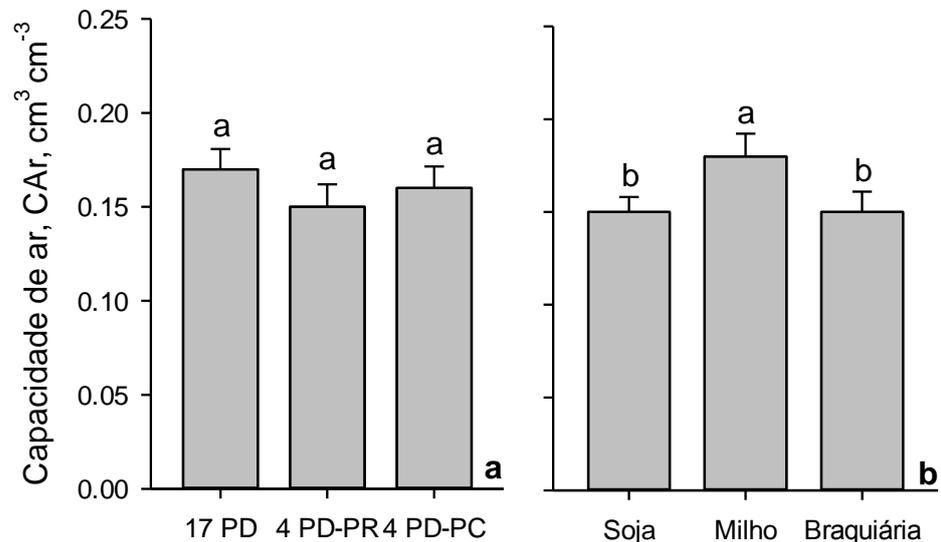


Figura 10. Capacidade de ar (CAR) para os sistemas de manejo (a) e culturas (b) na camada de 0-10 cm, no primeiro ano de avaliação.

17 PD: 17 anos em plantio direto, 4 PD-PR: 4 anos em plantio direto após 13 anos com preparo reduzido, 4 PD-PC: 4 anos em plantio direto após 13 anos com preparo convencional. As barras indicam o erro padrão da média.

3.3.5. Retenção de água

Não houve interação significativa entre manejos do solo e culturas. Não foram observadas diferenças significativas entre os sistemas de manejo (Figuras 11a, 11b, 11c). As culturas influenciaram a retenção de água no solo apenas na camada de 10-20 cm (Figura 11e). Na camada de 10-20 cm (Figura 11e), as culturas apresentaram efeitos significativos nos potenciais de -6, -10 e -33 kPa. Nesses potenciais, o tratamento com soja proporcionou significativamente maior retenção de água do que o tratamento com braquiária, porém não diferindo estatisticamente do tratamento com milho, que foi intermediário. Na camada de 20-30 cm as culturas não afetaram a retenção de água, nem mesmo tendências observadas.

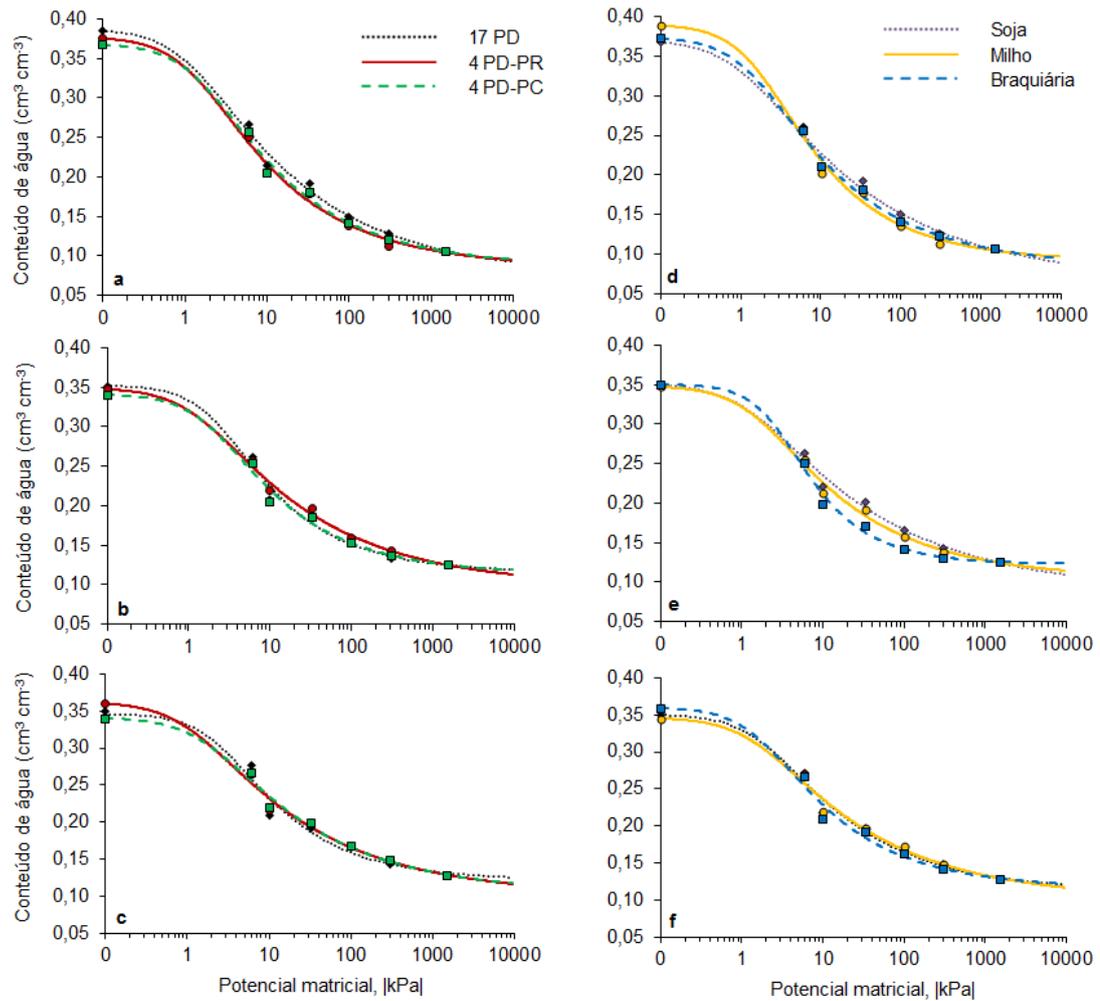


Figura 11. Curvas de retenção de água do solo por sistemas de manejo (esquerda) e culturas (direita) nas camadas de 0-10 cm (a, d), 10-20 cm (b, e) e 20-30 cm (c, f).

17 PD: 17 anos em plantio direto, 4 PD-PR: 4 anos em plantio direto após 13 anos com preparo reduzido, 4 PD-PC: 4 anos em plantio direto após 13 anos com preparo convencional.

Na Figura 12 estão apresentadas as frequências dos diâmetros de poros nos sistemas de manejo do solo, para as três camadas avaliadas, derivadas das curvas de retenção de água. De modo geral, na camada superficial (0-10 cm), o 17 PD apresentou maior frequência de poros maiores que 600 μm de diâmetro. Já nas camadas subsuperficiais de 10-20 e 20-30 cm, o tratamento 4 PD-PR apresentou maior frequência de poros a partir de 200 μm e 115 μm , respectivamente.

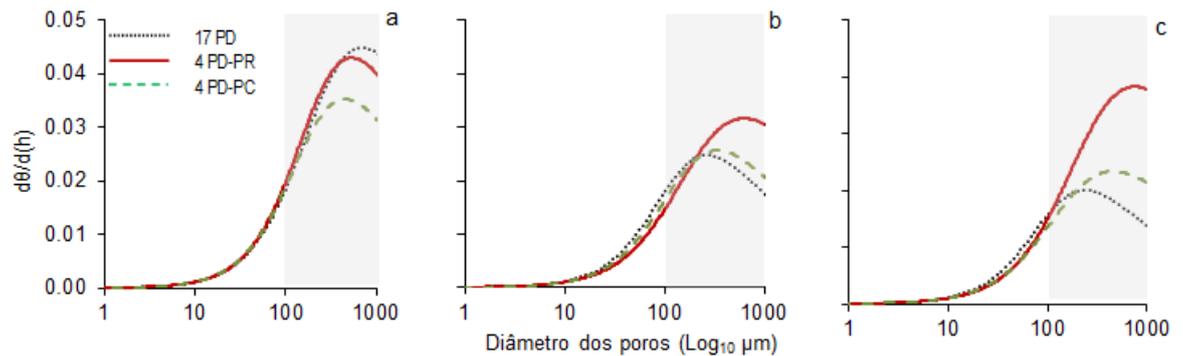


Figura 12. Frequência de distribuição dos diâmetros dos poros para os sistemas de manejo do solo, nas camadas de 0-10 (a), 10-20 (b) e 20-30 cm (c). Área hachurada representa os poros entre 100 e 1000 μm de diâmetro.

$d\theta/d(h)$ é uma expressão para o tamanho de poros que armazenam a maior quantidade de água num solo por unidade de potencial mátrico.

Proveniente da curva de retenção, os valores da água disponível para as plantas (AD) estão apresentados nas Figuras 13a e 13b para os sistemas de manejo e culturas, respectivamente. Não houve efeito significativo dos manejos do solo sobre a AD (Figura 13a). No entanto, para o tratamento 4 PD-PR, a AD foi mais homogênea no perfil do solo. As culturas afetaram significativamente a AD na camada de 10-20 cm (Figura 13b), com a soja apresentando a maior média, sendo 9,1 e 31,5% superior ao milho e a braquiária, respectivamente.

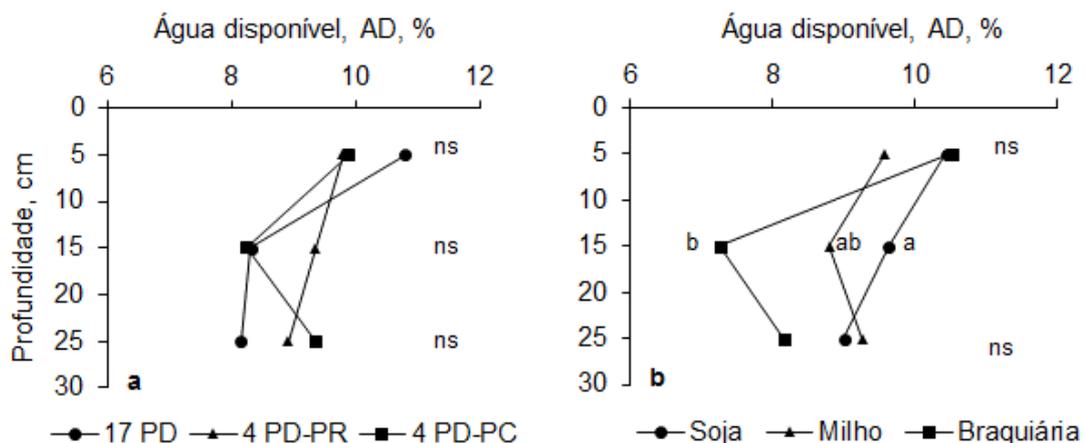


Figura 13. Água disponível para as plantas (AD) sob diferentes sistemas de manejo (a) e de culturas (b) nas três profundidades avaliadas.

17 PD: 17 anos em plantio direto, 4 PD-PR: 4 anos em plantio direto após 13 anos em preparo reduzido, 4 PD-PC: 4 anos em plantio direto após 13 anos em preparo convencional. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$); ns: não significativo a $p < 0,05$.

3.3.6. Relação do sistema radicular e a água disponível

As características morfológicas do sistema radicular das culturas foram relacionadas com a água disponível para as plantas (AD) (Figura 14a-d). De modo geral, os tratamentos com milho e braquiária apresentaram relações relativamente semelhantes, apresentando valores similares e ajustes com funções exponenciais para volume de raízes (VR), área superficial (AS) e densidade do comprimento radicular (CR). A cultura da soja apresentou comportamento diferente, onde teve crescimento linear com o aumento da AD (Figura 14a, 14b, 14d). Diferentemente, no diâmetro de raízes (DR), todas as culturas apresentaram ajustes com função polinomial (Figura 14c). Ressalta-se que cada ponto da Figura 14a-d foi obtido pela média dos valores das três camadas avaliadas (0-10, 10-20 e 20-30 cm).

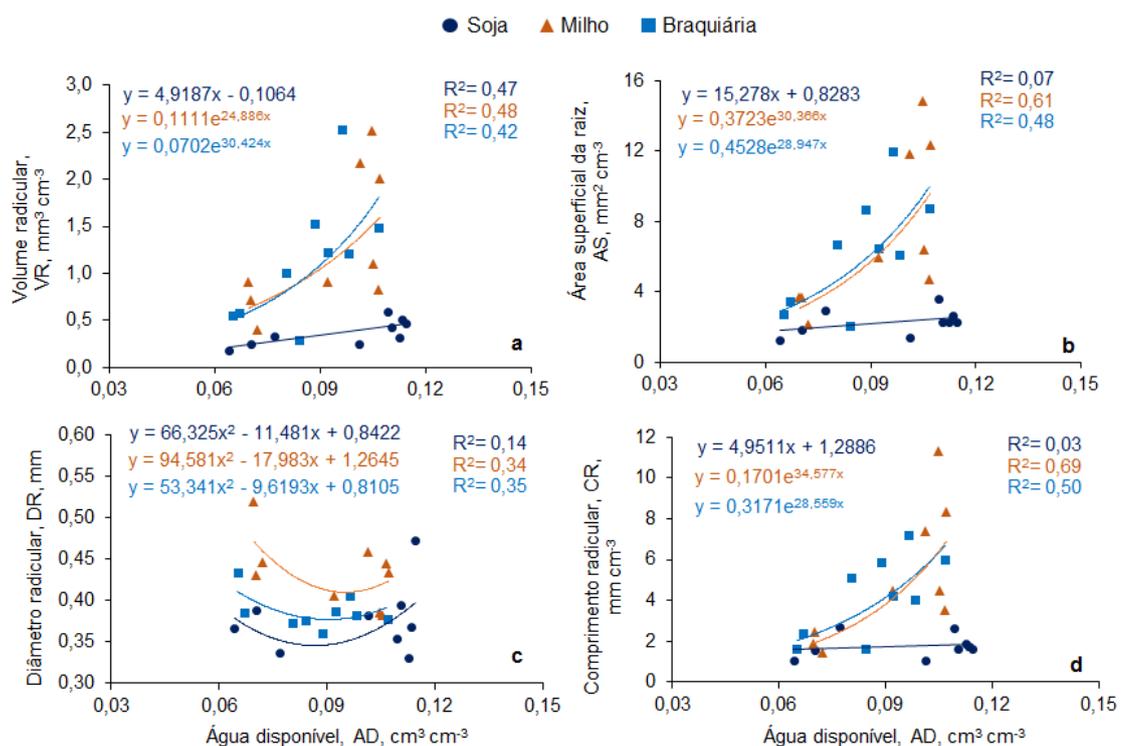


Figura 14. Relação entre água disponível para as plantas (AD) e volume (VR) (a), área superficial (AS) (b), diâmetro (DR) (c) e comprimento radicular (CR) (d) na camada de 0-30 cm. Cada ponto é a média das três camadas.

3.3.7. Sistema radicular e rendimento das culturas

Não houve interação significativa entre os sistemas de manejo e as culturas para as características do sistema radicular (Figura 15a-d). No entanto,

houve diferenças entre as culturas. Na camada de 0-10 cm, os tratamentos com milho e braquiária apresentaram as maiores médias de volume (VR), área superficial (AS) e comprimento radicular (CR) comparado com a soja. Na camada de 10-20 cm, o tratamento com milho apresentou as maiores médias desses parâmetros em relação ao tratamento com soja, porém não diferindo da braquiária. Na camada de 20-30 cm, os tratamentos com milho e braquiária foram superiores a soja em VR, AS e CR. De modo geral, todas as culturas apresentaram reduzidos valores nas características morfológicas de raízes na camada mais profunda (Figura 15a-d). Já para o diâmetro radicular (DR), não diferiram significativamente nas camadas superficiais, porém na maior profundidade a cultura do milho apresentou maior DR que a soja, mas não diferindo da braquiária.

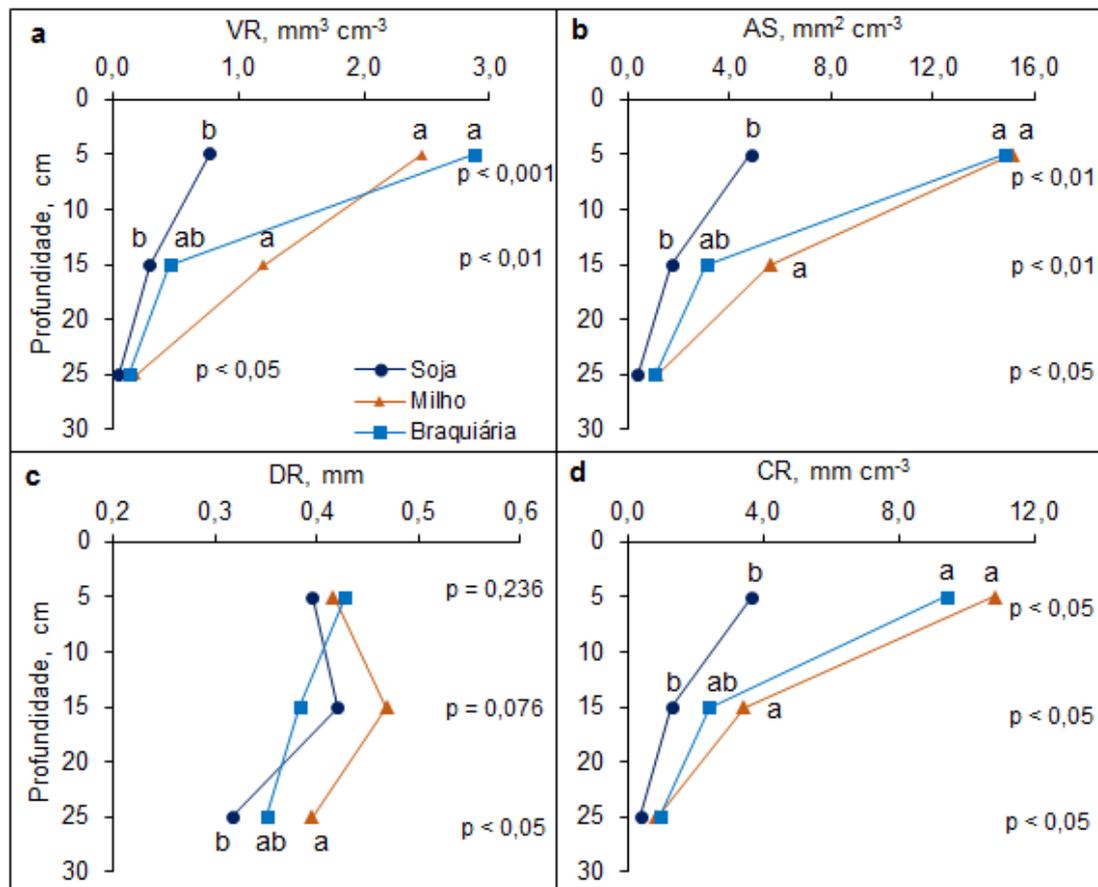


Figura 15. Relação do volume (VR) (a), área superficial (AS) (b), diâmetro (DR) (c) e densidade do comprimento radicular (CR) (d) para cada cultura avaliada na linha de semeadura, em cada camada avaliada.

Médias seguidas pela mesma letra em uma determinada profundidade não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Não houve interação e diferenças significativas entre os sistemas de manejo do solo sobre a massa seca do sistema radicular, assim foi trabalhado com as médias dos manejos. A massa seca de raízes das culturas por profundidade é apresentada nas Figuras 16a e 16b. As culturas do milho e da braquiária apresentaram maiores quantidades de massa seca na camada de 0-10 cm em relação a soja. Na camada de 10-20 cm, a cultura do milho apresentou maior massa seca, e na camada de 20-30 cm não diferiram significativamente (Figura 16a). Na Figura 16b está apresentada a massa total na camada de 0-30 cm, onde a cultura do milho e da braquiária apresentaram as maiores médias em relação à soja, como esperado.

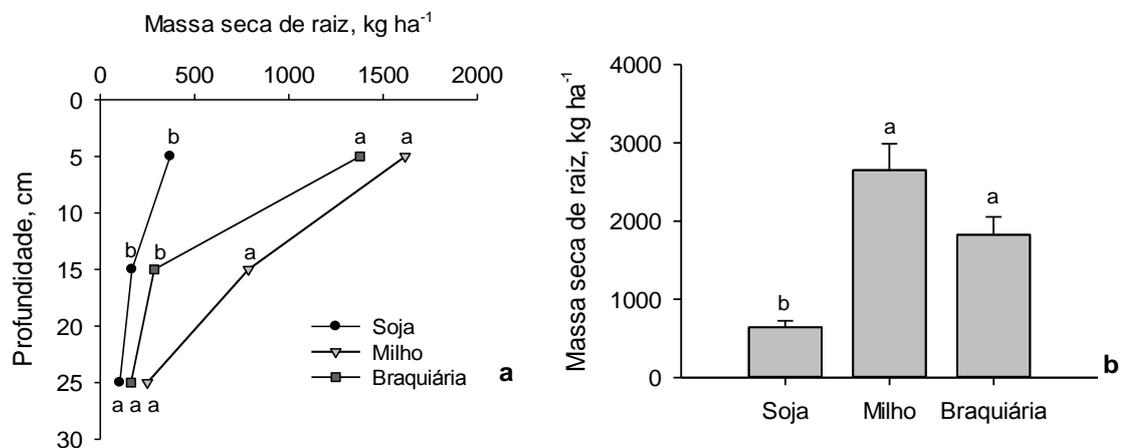


Figura 16. Massa seca das raízes por cada camada do solo (a) e o total entre 0-30 cm (a) medido nas linhas de semeadura das culturas.

Médias seguidas por mesmas letras não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Barras indicam o erro padrão da média.

A Figura 17 mostra a produtividade e a altura das plantas de milho avaliadas no primeiro e segundo ano (2017/18 e 2018/19). Em 2017/18, não houve diferenças significativas, embora o tratamento 17 PD tenha apresentado uma tendência ($p = 0,097$) de maior produtividade (Figura 17a). Nesse mesmo ano, a altura das plantas foi significativamente maior em 17 PD e 4 PD-PR, com o tratamento 4 PD-PC apresentando a menor altura média ($p < 0,05$) (Figura 17b). Em 2018/19, a produtividade do milho no tratamento 18 PD apresentou significativamente maior média ($p < 0,05$), não diferindo do tratamento 4 PD-PC (Figura 17c). Nesse ano, a altura média das plantas de milho foi significativamente maior no 18 PD em relação aos demais sistemas de

maneios ($p < 0,05$) (Figura 17d). Como não houve diferenças significativas entre as produtividades da soja e da braquiária, esses resultados não serão discutidos. No entanto, a média de produtividade da soja no primeiro ano foi 3.528 kg ha^{-1} e de massa seca da parte aérea da braquiária foi de $12.637 \text{ kg ha}^{-1}$ (Apêndice 3 mostra as produtividades e massa seca de raiz para todas as culturas e maneios separadamente).

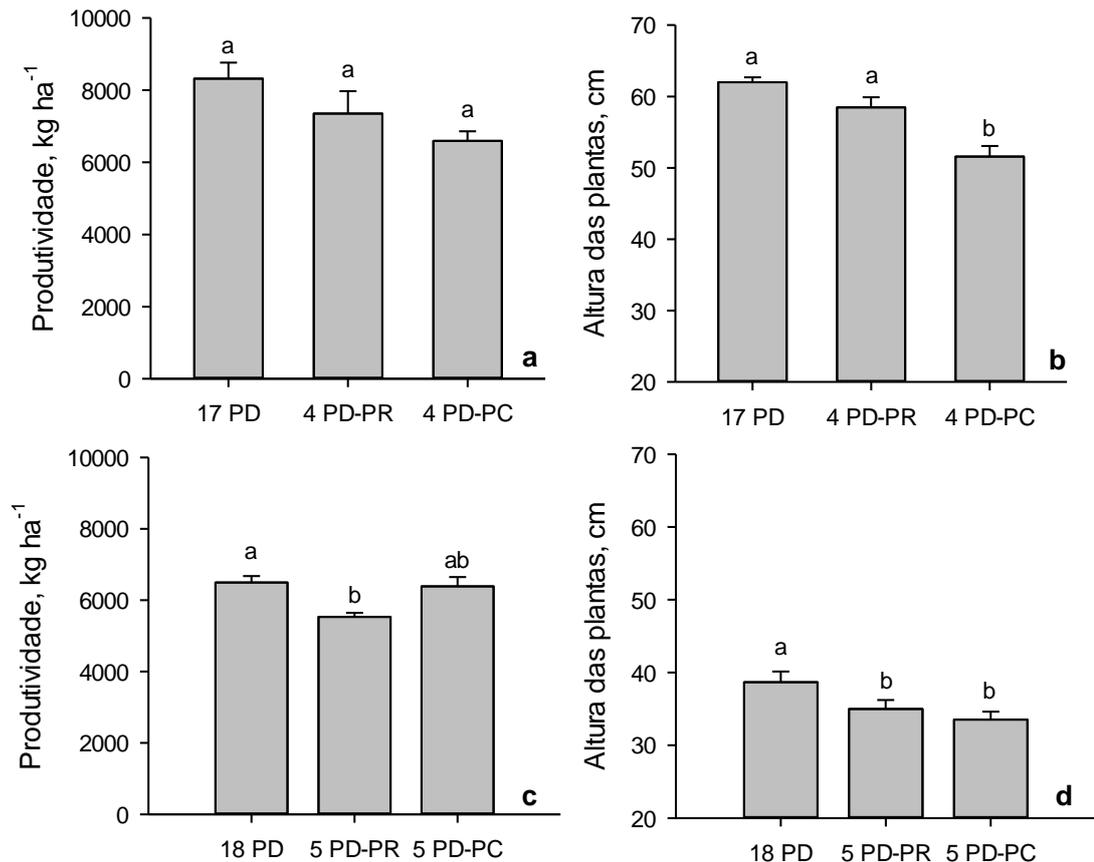


Figura 17. Produtividade e altura das plantas de milho avaliadas no primeiro ano (a, b) e no segundo ano (c, d).

17 PD: 17 anos em plantio direto contínuo; 4 PD-PR: 4 anos em plantio direto após 13 anos de preparo reduzido; 4 PD-PC: 4 anos em plantio direto após 13 anos de preparo convencional; 18 PD: 18 anos em plantio direto contínuo; 5 PD-PR: 5 anos em plantio direto após 13 anos de preparo reduzido; 5 PD-PC: 5 anos em plantio direto após 13 anos de preparo convencional. Médias seguidas por mesmas letras não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Barras indicam o erro padrão da média. No primeiro ano foi medida a altura das plantas aos 29 dias após a semeadura e no segundo ano foi medida 27 dias após a semeadura.

A Tabela 6 mostra a correlação entre os parâmetros físicos do solo e as características das plantas. Foi realizada a matriz de correlação com todas as culturas e nas duas camadas superficiais, onde apresentaram maior massa

seca de raiz (0-20 cm). No geral, os parâmetros de raízes se correlacionaram negativamente com a densidade do solo (D_s), porém não significativamente. A macroporosidade (Mac) se correlacionou positivamente com o comprimento radicular (CR) ($r= 0,52$). Por outro lado, a Mic apresentou correlação negativa com volume de raiz (VR) ($r= -0,56$), área superficial (AS) ($r= -0,56$) e densidade de comprimento (CR) ($r= -0,55$). A altura das plantas de milho foi negativamente correlacionada com o diâmetro radicular (DR) e positivamente com a produtividade.

Tabela 6. Matriz de correlação de Pearson entre as médias dos parâmetros físicos do solo e características das culturas na camada do solo de 0-20 cm. Níveis de significância: * p<0,05; ** p<0,01.

Parâmetro	Densidade	Macroporos	Microporos	Porosidade total	Volume radicular	Área radicular	Diâmetro radicular	Comprimento radicular	Massa seca de raiz	Produtividade do milho
Densidade	1,00									
Macroporosidade	-0,82**	1,00								
Microporosidade	0,11	-0,64**	1,00							
Porosidade total	-0,99**	0,83**	-0,11	1,00						
Volume radicular	-0,19	0,47	-0,56**	0,20	1,00					
Área radicular	-0,22	0,51	-0,56**	0,25	0,98**	1,00				
Diâmetro radicular	0,01	-0,15	0,23	-0,01	0,12	-0,02	1,00			
Comprimento radicular	-0,27	0,52**	-0,55**	0,22	0,94**	0,98**	-0,11	1,00		
Massa seca de raiz	-0,06	0,09	-0,02	0,06	0,66**	0,61**	0,29	0,52**	1,00	
Produtividade do milho	-0,28	0,09	0,16	0,28	0,27	0,39	-0,58	0,50	-0,25	1,00
Altura do milho	-0,16	0,20	-0,17	0,16	0,18	0,30	-0,78*	0,40	-0,58	0,65*
Produtividade da soja	-0,15	0,14	0,06	0,15	0,18	0,40	-0,08	0,48	-0,12	-
Massa seca da braquiária	-0,15	0,36	-0,51	0,15	0,65	0,58	0,15	0,50	-0,43	-

Ds: densidade do solo; Mac: macroporosidade; Mic: microporosidade; PT: porosidade total. Parâmetros das culturas avaliados no primeiro ano 2017/18.

3.4. Discussão

3.4.1. Efeito dos tratamentos sobre as propriedades físicas do solo

Os sistemas de manejo do solo não apresentaram diferenças em densidade do solo (Ds), macroporosidade (Mac), microporosidade (Mic) e porosidade total (PT) nas camadas avaliadas, em ambos os anos (Tabela 3). Esses resultados diferem dos observados por Reichert et al. (2016) que encontraram redução da Ds ao longo de 14 anos em PD contínuo para um solo argiloso, diferente do solo da presente pesquisa (textura média). No presente estudo foram observados efeitos das culturas na Ds no segundo ano de avaliação na camada de 10-20 cm, além da redução em Ds pela cultura da braquiária de um ano para o outro. Com esse resultado pode-se concluir que após dois anos de cultivo dessa cultura, permanecendo mais tempo na área, condicionou melhorias na estrutura do solo. Além disso, nota-se que o efeito das culturas se torna mais pronunciado com maior tempo de avaliação. Calonego et al. (2011) verificaram que o cultivo de braquiária em consórcio com o milho, por dois anos consecutivos, melhorou as condições físicas e estruturais do solo na camada de 20 a 40 cm.

Os limites críticos de Ds para o crescimento das culturas depende da textura do solo, mineralogia e matéria orgânica, as quais afetam a estrutura física, e conseqüentemente, a disponibilidade de água e ar, além da resistência mecânica do solo (REICHERT et al., 2009). De acordo com a equação baseada no teor de argila $Ds_{\text{crítico}} = -0.00071 \cdot \text{argila} + 1,8618$ (REICHERT et al., 2009), foi estimada a Ds considerada crítica para o crescimento das raízes. Nas camadas de 0-10 e 10-20 cm, o limite crítico foi de 1,69 e 1,67 g cm⁻³, respectivamente. Assim, foi constatado que a Ds avaliada em 2017/18 foi menor que o limite crítico para as raízes (Tabela 3). No entanto, em 2018/19 mostrou que na camada de 10-20 cm, o tratamento com milho apresentou Ds acima do limite crítico que afetaria o desenvolvimento da cultura. Não foi determinada a textura abaixo de 20 cm de profundidade. No entanto, com provável incremento de argila em camadas subsuperficiais, o limite crítico para o crescimento radicular seria atingido, o qual poderia contribuir para o reduzido aporte de raízes na camada de 20-30 cm.

Reichert et al. (2017) trabalhando com solo de textura similar ao deste estudo, relataram também não encontrar diferenças dos manejos após

curto período de intervenção mecânica (escarificação) e o tratamento continuamente em PD (13 anos) sobre Ds e Mac. Eles discutem que a reconsolidação do solo ocorre mais rápido em solo mais arenoso, ou seja, em dois anos já foi possível notar os efeitos do PD sobre um solo escarificado. Por outro lado, Reichert et al. (2016) relatam que parâmetros que consideram as propriedades/processos dinâmicos seriam uma ferramenta mais sensível para diagnosticar e quantificar mudanças nos sistemas de manejo em processos funcionais.

3.4.2. Resistência mecânica à penetração

A resistência mecânica à penetração (RP) foi medida em conteúdo de água superior a capacidade de campo (CC). Assim, se fosse considerado a CC deste solo, a RP poderia ter alcançado valores críticos na superfície. Verificou-se em todos os tratamentos que os valores de RP foram similares nos primeiros centímetros (~10-12 cm) de profundidade, o que pode estar associada com a haste sulcadora da semeadora. Esse mesmo efeito foi relatado por Drescher et al. (2016). A menor RP no tratamento 4 PD-PR (Figura 7a) possivelmente está relacionado com o efeito residual da escarificação realizada durante 13 anos antes da adoção do PD, pois as diferenças foram encontradas em profundidades que o implemento atuava.

Resultados de pesquisas mostraram a possibilidade de aumentar o valor crítico de RP para 3,5 MPa em condições de plantio direto contínuo a longo prazo, com base na presença de poros contínuos efetivos e biológicos, que favorecem o crescimento radicular mesmo em áreas com alta RP (TORMENA et al., 2007; MORAES et al., 2014). Segundo Moraes et al. (2014), ainda há dúvidas sobre qual nível de RP deve ser usado como limitante em plantio direto de longo prazo, pois nem sempre em áreas onde a RP indica um alto nível de compactação do solo, o rendimento de grãos é afetado. Como foi observado nesse estudo, a cultura do milho apresentou maior produtividade nos tratamentos 17 PD e 18 PD, onde a RP foi maior em relação ao tratamento 4 PD-PR.

Segundo Gao et al. (2016) o confinamento de raízes mais profundas às redes de poros pré-existentes está relacionado ao aumento da resistência mecânica solo que ocorre em profundidade. Ainda segundo esses autores, a

penetração das raízes em camadas mais profundas provavelmente depende de quão bem as raízes são capazes de encontrar redes de poros contínuos, formados principalmente por raízes decompostas. No entanto, como demonstrado na presente pesquisa, não é uma tarefa fácil aumentar bioporos em camadas mais profundas.

Como observado em outros parâmetros, as culturas apresentaram efeitos nas camadas superficiais, podendo contribuir para formação de bioporos em profundidade a longo prazo, principalmente com o uso de culturas com alto aporte de massa seca de raízes. Nouri et al. (2018) observou redução da RP em profundidade em plantio direto quando cultivado com plantas de cobertura, principalmente cultivado com trigo. Eles argumentam que esse efeito pode estar relacionado com a ação do sistema radicular em profundidade e por estimular a macrofauna do solo. Abdollahi e Munkholm (2014) encontraram redução da RP abaixo de 30 cm cultivado com nabo forrageiro após com 5 anos em rotação com cevada (cultura principal).

3.4.3. Permeabilidade a água e ao ar

A condutividade hidráulica do solo saturado (k_{sat}) é caracterizada por ser uma metodologia com grande variabilidade, apresentando alto coeficiente de variação, assim como os encontrados no presente trabalho, variando entre 40 e 50% com os dados log-transformados. Estes resultados estão de acordo com prévios estudos com avaliações de k_{sat} desenvolvidos por Figueiredo (2010) e Prevedello et al. (2013), além de estudos com maior variação, como os de Santos et al. (2012) e Scherpinski et al. (2010). A alta variabilidade dos dados de k_{sat} podem mascarar os resultados da análise, mesmo ocorrendo diferenças médias de grande magnitude. Diversos trabalhos mostraram alta dispersão de dados da k_{sat} (KUTILEK; NIELSEN, 1994; MESQUITA; MORAES; CORRENTE, 2002).

O tratamento 4 PD-PC apresentou menor k_{sat} (não estatisticamente), indicando que ainda poderia existir algum efeito residual da compactação ou desagregação ocasionada pelo preparo convencional no passado (Tabela 4). Isso evidencia que um sistema com maior nível de degradação leva mais tempo para recuperar a estrutura e organização da rede de poros do que um solo com histórico de menor revolvimento, como no caso do 4 PD-PR. Segundo

Schlüter et al. (2018), a k_{sat} é controlada por características dos poros do solo, como o diâmetro no domínio dos macroporos, abundância e conexão. A determinação da frequência de diâmetro de poros foi realizada para verificar se os sistemas de manejo alteraram a distribuição do tamanho dos poros, mesmo que a retenção de água não tenha sido afetada. O tratamento 17 PD apresentou maior frequência de poros com maiores diâmetros em superfície (Figura 12a) do que os tratamentos 4 PD-PR e 4 PD-PC, mas ainda sem evidências claras sobre essa diferença pela k_{sat} . No entanto, o tratamento 4 PD-PR apresentou maior frequência de poros maiores em subsuperfície (Figura 12b e 12c), assim estando de acordo com a tendência de maior k_{sat} . Isso pode estar associado a organização de poros causada pelas operações de escarificação.

O tratamento com milho apresentou o dobro da k_{sat} do tratamento com soja na camada superficial de 0-10 cm. Isso mostra o alto potencial do milho na estruturação do solo pelo sistema radicular, aumentando a habilidade do solo em conduzir água. Além disso, a partir da relação entre k_{sat} e macroporos considerando a macroporosidade crítica, a k_{sat} foi de 57, 76 e 91 mm h^{-1} , respectivamente, para os tratamentos soja, braquiária e milho. O tratamento com braquiária apresentou k_{sat} 60% maior do que a soja, também apresentando potencial para entrar em um sistema de rotação, rotacionando diferentes raízes, criando diferentes bioporos contínuos.

Os efeitos dos sistemas agrícolas sobre a estrutura do solo devem ser avaliados não apenas por meio das mudanças na relação massa/volume e sua estabilidade, mas também de acordo com a habilidade da rede de poros em conduzir gases e água (DÖRNER, SANDOVAL; DEC, 2010). De modo geral, os valores médios de permeabilidade ao ar foram maiores no solo do tratamento com a cultura do milho (Tabela 5). A permeabilidade ao ar dos solos é altamente dependente da distribuição do tamanho de poros (especialmente da proporção de poros maiores), continuidade e conectividade da porosidade de aeração (MOLDRUP et al., 2001; KAWAMOTO et al., 2006). Berisso et al. (2013) relataram que o fluxo por convecção é governado principalmente pela disponibilidade de poros de maior diâmetro, interconectados e preenchidos por ar (lei de Poiseuille). Portanto, foi atribuído isso a maior porosidade de aeração (ϵ_a) proporcionada pela cultura do milho (Tabela 5).

Nos sistemas de manejo 17 PD e 4 PD-PR, a cultura do milho apresentou as maiores médias de k_a , o que provavelmente proporcionou maior continuidade dos poros (Tabela 5). A consolidação do solo e a formação biológica de poros são os principais responsáveis pela continuidade dos poros, aumentando a permeabilidade ao ar (REICHERT et al., 2016). Vale ressaltar que a cultura da braquiária apresentou altos valores de k_a no tratamento 4 PD-PC. Esse mesmo comportamento foi observado na avaliação do sistema radicular, onde a braquiária apresentou altos valores de massa seca das raízes nesse sistema de manejo (Apêndice 3). Stumpf et al. (2017) estudando diferentes plantas para recuperação de solos degradados após a mineração de carvão, constataram que a *Brachiaria brizantha* se destacou em relação às demais. Sendo assim, considerada uma alternativa para uso do manejo da compactação e recuperação de solos degradados. Vale notar também que o efeito pouco pronunciado dessa cultura ocorreu possivelmente pelo lento estabelecimento no experimento, onde foi necessário refazer a semeadura aproximadamente 40 dias depois. Além disso, a braquiária tendeu a apresentar também maiores valores na ϵ_a no 4 PD-PC.

A permeabilidade específica ao ar (k_1) é um parâmetro utilizado para normalizar a k_a em relação a ϵ_a , sendo considerado um índice de continuidade dos poros. Groenevelt et al. (1984) afirmaram que a avaliação combinada da geometria porosa e suas características podem fornecer uma informação da condição explorada pela planta. Altos valores de k_1 expressam uma alta capacidade de um determinado volume da porosidade de aeração em conduzir ar, isto é, alta continuidade (ABDOLLAHI; MUNKHOLM, 2017). O tratamento com milho apresentou altos valores de k_1 (Figura 9), atingindo médias de 469. A braquiária apresentou o menor k_1 (151) devido seus menores valores de k_a e ϵ_a comparado com as demais culturas no 17 PD e 4 PD-PR, exceto no 4 PD-PC. Isso pode estar relacionado com o menor volume de poros com maior diâmetro, sendo esses os principais condutores de ar. O índice k_1 é frequentemente usado para descrever a inter-relação direta entre a permeabilidade ao ar e a porosidade de aeração. No entanto, não considera os aspectos geométricos desses poros que conduzem ar (RESZKOWSKA et al., 2011). Para inferir sobre aspectos geométricos e morfológicos seria necessário,

além de medir a permeabilidade ao ar, utilizar medidas de difusão de oxigênio, como sugerido por Ball (1981), os quais foram avaliados no capítulo IV.

No presente estudo foi encontrada uma moderada e positiva correlação de Pearson entre k_a e a capacidade de ar (CAr), com $r = 0,44$ ($p < 0,05$). Zúñiga et al. (2019) encontraram uma relação linear, mostrando que a k_a aumentou com o aumento da CAr, ou seja, com a fração de poros largos (diâmetro maior que $30 \mu\text{m}$). Para uma aeração adequada do solo é necessário que a CAr próxima à superfície do ar seja de, pelo menos $0,10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (GRABLE; SIEMER, 1968), sendo o mínimo para uma aeração adequada das raízes (TOPP et al., 1997). Nos resultados obtidos no presente estudo, a CAr média variou de 0,14 a 0,19 $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ na camada superficial (Figura 10), com a maioria dos valores dentro do limite. No entanto, a cultura do milho teve a média de CAr maior que as demais culturas, concordando com os resultados da k_a e k_1 .

3.4.4. Retenção de água

Os resultados mostraram que o tratamento com soja apresentou maiores volumes de água retido nos potenciais avaliados, como visto nas curvas de retenção, portanto, indicando maior volume de poros de retenção em relação ao milho e a braquiária na camada de 10-20 cm (Figura 11e). De modo geral, nos potenciais menores que -33 kPa, a retenção de água foi maior nas camadas mais profundas, possivelmente pelo aumento da quantidade de argila, característica dos solos da classe dos Argissolos brasileiros. Os resultados do presente estudo são opostos aos encontrados por Nouri et al. (2019), os quais verificaram que as características de retenção de água no solo foram afetadas principalmente pelos manejos (diferentes intensidades de preparo) e pouco pelas culturas. Blanco-Canqui et al. (2017) não encontraram diferenças em diferentes sistemas de manejo de solo sobre a retenção de água, em experimento com 35 anos de duração. Eles concluíram que o PD teve potencial limitado sobre os demais sistemas de manejo na melhoria das propriedades hidráulicas, dentre elas a condutividade hidráulica, retenção de água e porosidade total.

Para solos de textura média a fina, em diversos trabalhos conduzidos por Reynolds et al. (2002, 2008, 2014), os autores consideraram

diferentes classes de água disponível (AD). De modo geral, os tratamentos do presente estudo ficaram dentro das classes “limitada” e “pobre” em relação ao crescimento ou função das raízes e de resiliência à seca (Figura 13a-b). Isso evidencia a importância de práticas de manejo que contribuam para melhoria da acessibilidade da água no solo, especialmente com textura média e arenosa. A retenção de água no ponto de murcha permanente (PMP) não é dependente dos manejos (o fenômeno da capilaridade deixa de se manifestar), mas principalmente da textura (forças de adsorção), mais especificamente do conteúdo de argila (PREVEDELLO; ARMINDO, 2015). Portanto, as mudanças no conteúdo de água da capacidade de campo (CC) foi o que realmente influenciou na AD. Reichert et al. (2017) concluíram que os sistemas de manejo do solo com a microporosidade mais alta, também eram os sistemas com maior volume de água disponível. No entanto, Silva (2014) afirma que a liberação de água dentro da faixa da AD para um mesmo valor de capacidade de água disponível (CAD), pode diferir entre camadas de um mesmo solo, dependendo da habilidade do solo de conduzir e reter água. Além disso, existe a capacidade da planta em absorver água, que é diferente para cada espécie. A acessibilidade à água refere-se à capacidade das raízes das plantas alcançarem a água disponível, que é determinada por diferentes processos e interações no sistema solo-planta (BENGOUGH et al., 2011).

3.4.5. Sistema radicular

As raízes de soja, milho e braquiária se concentraram na camada superficial, independentemente do sistema de manejo (Figuras 16a), concordando com resultados de estudos de diversos autores (BEUTLER et al., 2004; CUNHA et al., 2010; DAL FERRO et al., 2014; FIORINI et al., 2018). Silva et al. (2000), ao estudarem a distribuição do sistema radicular de milho na camada de 0 a 40 cm, verificaram que 83 % do total de raízes encontrava-se na camada de 0 a 20 cm. Os resultados da presente pesquisa sugerem que a presença da cultura do milho e da braquiária no sistema de culturas em rotação com a soja, por exemplo, pode ter maior impacto ao longo do tempo na estabilização da estrutura do solo condicionada pelo volumoso sistema radicular dessas culturas. Essas culturas podem proporcionar significativas

melhorias ao solo, especialmente nos aspectos físicos, aporte de biomassa e no acúmulo de matéria orgânica no solo (SALTON; TOMAZI, 2014).

Considerando um sistema de manejo em plantio direto, onde não ocorre a mobilização do solo, torna-se essencial manter culturas com diferentes sistemas radiculares nas áreas. Calonego e Rosolem (2008) destacam que benefícios importantes têm sido observados na estrutura do solo a médio e longo prazo com o uso de espécies de plantas de cobertura com sistemas radiculares extensos e vigorosos, capazes de crescer através de camadas de solo de alta resistência, aumentar o conteúdo de matéria orgânica e estabilizar os agregados do solo.

Em recente trabalho, Stumpf et al. (2017) constatou maior concentração dos atributos radiculares das gramíneas na camada superficial, corroborando com nossos resultados. Esse comportamento tem sido relatado por alguns autores como uma característica dessas espécies (JACKSON et al., 1996; STUMPF et al., 2017). Nouri et al. (2019) relataram que o milho, em rotação com outras culturas de grãos, resultou em condições estruturais mais favoráveis e aumentou o rendimento, por exemplo, de algodão e soja. Esses autores não observaram efeito negativo do sistema contínuo de milho nas propriedades físicas do solo e na produtividade do milho.

A cultura da braquiária apresentou alto potencial de produção de massa seca de raiz, podendo ter sido mais expressivo no segundo ano consecutivo de cultivo (2018/19), como visto pela redução da Ds e aumento da PT. Isso pode ser atribuído também por ter permanecido maior tempo na área nesse segundo ano. Sugere-se que o uso dessas culturas com sistema radicular mais abundante possa com o tempo melhorar a estrutura do solo em profundidades maiores que 30 cm em PD, formando bioporos para a cultura sucessora. Além do menor desenvolvimento de raízes em subsuperfície, há ainda as restrições de solo consideradas limitantes, como a macroporosidade menor que $0,10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (GRABLE; SIEMER, 1968), além da resistência mecânica à penetração maior que 2,0 MPa (TAYLOR, 1966; TORMENA et al., 1998) observadas no presente estudo.

Cunha et al. (2010) discutiram que estudos sobre raízes de forrageiras tropicais nem sempre são conclusivos devido à alta variabilidade dos dados. No entanto, esses autores destacam o alto desempenho da

densidade radicular da cultura da braquiária. Galdos et al. (2020) observaram que as espécies de braquiária avaliadas apresentaram maior comprimento total de raiz, área superficial, diâmetro, volume e massa seca quando comparadas ao milho. Os mesmos autores verificaram que as espécies de braquiária tiveram maior número de raízes finas (diâmetro menor que 0,5 mm) em comparação com a cultura do milho. Eles cultivaram as culturas em cilindros com as condições controladas utilizando um solo com 614 g kg^{-1} de argila, peneirado a 2 mm e alocado nos cilindros a uma densidade de $1,2 \text{ g cm}^{-3}$. Por outro lado, no presente estudo não foi realizada a separação de raízes finas, sendo computados todos os diâmetros de forma conjunta. Assim, o grande número de raízes finas da braquiária fez com que diminuísse o diâmetro médio do total de raízes (Figura 15c). Além disso, o menor tempo de permanência e desenvolvimento na área experimental pode ter sido o principal fator para reduzir o volume do sistema radicular desta cultura. No presente estudo, as diferenças entre essas duas culturas (braquiária e milho) foram mínimas. No entanto, se fosse realizada uma avaliação de raízes no segundo ano, provavelmente a braquiária responderia melhor, e os resultados poderiam estar de acordo com Galdos et al. (2020).

As médias dos diâmetros de raízes (DR) não apresentaram grandes variações nas camadas superficiais, corroborando com os resultados de Beutler et al. (2004) e Rosolem et al. (1994), trabalhando com soja. Foloni et al. (2006) relatam que quanto maior o diâmetro da raiz, maior é a força exercida no processo de alongamento das células do meristema radicular para penetração em determinada camada de solo. Assim, a cultura do milho e da braquiária podem apresentar redução de camadas compactadas e formação de bioporos em camadas mais profundas, pelo maior diâmetro apresentado.

3.4.6. Sistema radicular e água disponível para as plantas

As características morfológicas das raízes apresentaram baixos valores de volume (VR), área superficial (AS) e comprimento radicular (CR), provavelmente devido à pequena quantidade de raízes na camada de 20-30 cm, o que reduziu os valores médios desses parâmetros na camada total de 0-30 cm, especialmente na cultura da soja. Além disso, a metodologia de coleta também pode ter sido determinante para os valores obtidos, onde foi utilizado o

método do trado, aproximadamente 6-7 cm de distância das plantas de referência, não abrangendo desta forma as raízes maiores que ficam próximas ao colmo das plantas.

Em janeiro e fevereiro de 2018 (aproximadamente dois e três meses após a semeadura), ocorreu apenas 98 e 71 mm de chuva, respectivamente (Figura 1) na área experimental, com temperaturas ao longo do dia chegando a 36 °C. Embora a média anual de precipitação seja abundante, os dois primeiros meses do ano são frequentemente afetados por estiagens na região da área experimental. Isso poderia ter sido ainda mais crítico para a cultura da braquiária, que estava no início do desenvolvimento após a ressemeadura 40 dias mais tarde. A baixa disponibilidade de água causa redução no crescimento, ocasionada pela diminuição da expansão e do alongamento celular devido ao decréscimo da turgescência (YASSEENE; ALOMARY, 1994). Isso está alinhado com os resultados do presente estudo, os quais apresentaram menor VR, AS e CR com a menor água disponível para as plantas (AD), porém menos pronunciado na cultura da soja. O DR apresentou comportamento com função polinomial quando relacionado com a AD. Isso sugere que em um ponto ou faixa intermediária de AD (ou uma faixa “ideal”) teria menor DR na condição dos tratamentos estudados, de clima, manejo e culturas. Possivelmente com o solo mais úmido e mais seco, as plantas precisaram aumentar seus diâmetros radiculares para melhorar a absorção de água, nutrientes, aprofundar em condições de maior resistência, bem como em condições de baixa oxigenação (em maior teor de água). Quando o solo está em condições intermediárias de conteúdo de água, a captação depende das propriedades do solo e da planta. Nesta faixa de água, a interface raiz-solo pode desempenhar um papel importante (CARMINATI et al., 2012).

As características morfológicas VR, AS e CR foram positivamente relacionadas com a AD. Assim, com aumento do volume de água dentro dessa faixa, reduziu exponencialmente a resistência do solo ao crescimento das raízes. A resistência mecânica à penetração das raízes é uma das principais propriedades do solo que determina a acessibilidade à água, uma vez que regula amplamente as taxas de alongamento das raízes (COLOMBI et al., 2018). Portanto, a resistência à penetração sendo fortemente influenciada pela

água, aumenta a resistência conforme ocorre a secagem do solo (BENGOUGH et al., 2011; GRZESIAK et al., 2013).

3.4.7. Componentes de rendimento e propriedades físicas

A produtividade de milho e a altura das plantas foram avaliadas em duas safras, nos anos de 2017/18 e 2018/19 (Figura 17). Vale destacar que a medição da altura de milho no ano de 2017/18 foi efetuada 29 dias após a semeadura e, no ano de 2018/19 aos 27 dias após a semeadura. O rendimento e características das culturas é função de vários fatores, como propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, manejo dado à cultura, além do fator climático (SUZUKI, 2005; FRANCHINI et al., 2012). Destaca-se um possível efeito da cultura antecessora de verão, já que no inverno foram as mesmas culturas. Foi cultivada soja em área total no verão de 2016/17, já no ano de 2017/18 foi cultivado o milho (assim, soja-milho), o que pode ter influenciado a maior produtividade de milho no primeiro ano em relação ao segundo (milho-milho em 2018/19).

Independentemente da condição climática regional, a produtividade de grãos de milho é decorrente das condições hídricas durante o período crítico, que vai do pendoamento ao início do enchimento de grãos (BERGAMASCHI et al., 2004). Já para a cultura da soja, o período crítico vai do início da floração até o início do enchimento de grãos R1-R5 (BERLATO, 1987). Esses períodos críticos podem coincidir justamente com a falta de chuvas nos meses de janeiro, fevereiro e março, como observado na Figura 1, reduzindo o potencial dessas culturas atingirem maiores produtividades. Estudos conduzidos por Dantas et al. (2016) indicam que a braquiária (*Brachiaria brizantha*) exige a manutenção do armazenamento de água no solo acima de 50% da água disponível no período de outono e inverno para suprir suas necessidades hídricas. Medições de umidade realizadas no experimento no mês de fevereiro de 2018 mostraram que o conteúdo de água do solo da camada superficial chegou a $0,08 \text{ g kg}^{-1}$ na média, o que corresponde a um conteúdo volumétrico de água de aproximadamente de $0,124 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ nessa camada. Esse volume de água ficou muito próximo do volume correspondente ao ponto de murcha permanente ($0,106 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). Portanto, as culturas permaneceram por longos períodos com baixo volume de água no solo,

podendo terem sido expostas a condições mais severas ao longo do ciclo. O potencial produtivo pode ser influenciado negativamente antes do conteúdo de água no solo alcançar o ponto de murcha permanente (Taylor, 1952) e portanto, a água não seria uniformemente disponível para as plantas dentro da faixa de “água disponível” (SILVA, 2014).

Os resultados de correlação entre densidade do solo (D_s) e características das plantas (Tabela 6) estão de acordo com Fiorini et al. (2018), indicando maior resistência ao desenvolvimento radicular em solos com maior D_s . Plantas com alta produção de raízes proporcionam significativas melhorias ao solo, especialmente nos aspectos relacionados à estrutura e acúmulo de matéria orgânica (SALTON; TOMAZI, 2014). Segundo Borges et al. (1988), as raízes das plantas de soja se desenvolvem melhor em pontos de menor RP, razão pela qual ocorrem modificações na morfologia da raiz, como a redução no comprimento, quando estas encontram impedimento mecânico. Essa explicação pode ser estendida às demais culturas estudadas nesse trabalho, visto que abaixo dos 20 cm de profundidade houve menor quantidade de raízes e maior resistência mecânica à penetração (RP). Balbinot Junior et al. (2018) relatam que nem sempre o incremento na profundidade radicular está relacionado com o aumento da produtividade das culturas. Resultados dessa afirmação também foram observados no presente estudo, onde nos sistemas de manejo de solo que apresentaram maiores produtividades, tiveram menores aportes de massa seca de raiz (Apêndice 3, embora sem diferenças significativas) e correlações negativas entre produtividade de grãos e massa seca de raízes.

3.4.8. Discussão geral dos tratamentos

No presente trabalho, os resultados mostraram que não houve efeito significativo na k_{sat} entre 17 e 18 anos de plantio direto contínuo, e entre 4 e 5 anos de plantio direto após 13 anos de preparo reduzido e preparo convencional do solo. Por essa razão foi feita a média dos dois anos de avaliação desse parâmetro. Provavelmente, para apresentarem maiores diferenças seria necessário um período maior de avaliação, quando o solo começasse a desenvolver uma estrutura mais organizada de poros, ou até mesmo um tratamento como “0 anos em PD, recém preparado”, para avaliar a

diferença do solo recém preparado em relação ao curto e longo prazo. Os efeitos contrastantes dos manejos e os resultados mistos geram a necessidade de pesquisas adicionais para entender melhor como os sistemas de manejo afetam as características de permeabilidade e retenção de água no solo (BLANCO-CANQUI et al., 2017).

No presente estudo buscou-se avaliar o potencial de uso da braquiária nas condições edafoclimáticas do experimento. A utilização desta cultura por um período maior na área experimental seria o ideal para verificar os efeitos positivos da cultura sobre a estrutura do solo e posteriormente entrar em um sistema de rotação ou consorciação com as culturas de grãos. Assim como a cultura do milho, a braquiária possui um sistema radicular abundante (GALDOS et al., 2020) que, com o tempo, poderia melhorar a estrutura de solos degradados pela alta intensidade das práticas de manejo. Os resultados mostraram evidências do potencial de uso da braquiária em solos com histórico de aração e gradagem em parâmetros como k_a , k_1 e ϵ_a .

Como uma das hipóteses desse estudo é que as culturas com sistema radicular volumoso, como a braquiária, melhorariam as condições físicas do solo foi alcançada no segundo ano para essa cultura. Embora tenha ficado menor período de desenvolvimento na área no primeiro ano e as condições climáticas menos favoráveis, como a falta de precipitação em alguns períodos. Espera-se que ao longo do tempo de estabelecimento (maior do que 2 anos), essa cultura tenha ainda maior potencial para ser utilizada em diferentes sistemas de produção, por ser uma planta perene, criando caminhos preferenciais e bioporos no solo, favorecendo as demais culturas subsequentes. Ainda, a ausência de efeito principalmente em relação a permeabilidade à água poderia ser justificada pela alta variabilidade dos dados.

3.5. Conclusão

Os sistemas de manejo do solo não afetaram os parâmetros físicos densidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total do solo nas camadas avaliadas em ambos os anos de estudo. Portanto, 4 anos de PD já são suficientes para o sistema entrar em um equilíbrio comparado com 17 em PD. No segundo ano, a cultura da braquiária reduziu a densidade do solo da camada superficial, apresentando melhoria na estrutura do solo.

A resistência mecânica do solo à penetração apresentou menores valores para o tratamento 4 PD-PR a partir dos 17,5 cm de profundidade. Esse efeito pode estar associado ao residual da escarificação ocorrida ao longo de 13 anos antes da adoção do PD.

A partir dos resultados obtidos, a condutividade hidráulica do solo saturado não apresentou diferença entre os anos de avaliação (verão de 2017/18 e de 2018/19), nem para os sistemas de manejo e culturas. Não houve efeito dos sistemas de manejo sobre os parâmetros permeabilidade ao ar e permeabilidade específica ao ar. No entanto, nos manejos 17 PD e 4 PD-PR, a cultura do milho apresentou maiores valores. Foi observado também uma tendência de efeito residual do preparo convencional (4 PD-PC), o qual demonstrou menores valores nos parâmetros físicos do solo. Isso evidencia a dificuldade em recuperar a estrutura de um solo com maior nível de degradação ocasionado pela maior intensidade de revolvimento.

O sistema radicular das culturas se concentrou nas camadas superficiais, com pouca abundância na camada de 20-30 cm de profundidade. Os sistemas de manejo do solo não diferiram quanto às características morfológicas das raízes. No entanto, o milho e a braquiária se destacaram quanto ao volume, área superficial e comprimento radicular. Assim, é recomendável incluir essas culturas nos sistemas de produção, as quais mostraram alto aporte de massa seca das raízes, além de indicar que a braquiária possui potencial para ser empregada também no Sul do Brasil, na localidade estudada.

Os tratamentos continuamente em plantio direto (17 PD e 18 PD) apresentaram maiores produtividades e alturas de milho em ambos os anos avaliados. Os resultados mostraram que os sistemas de manejo do solo não têm efeito sobre a retenção de água em plantio direto a curto e longo prazo. Entre as culturas, a soja proporcionou maior retenção de água nos potenciais entre -6, -10 e -33 kPa na camada de 10-20 cm e maior conteúdo de água disponível (AD) nessa mesma camada. A AD foi positivamente relacionada com as características do sistema radicular, embora abaixo do limite considerado satisfatório para o desenvolvimento das culturas.

4. CAPÍTULO IV- EVALUATION OF SOIL PORE NETWORK WITH X-RAY COMPUTED TOMOGRAPHY AND GAS TRANSPORT PARAMETERS

4.1. Introduction

Tillage and crop rotation are fundamental factors influencing soil quality, crop performance and thus the sustainability of cropping systems (MUNKHOLM; HECK; DEEN, 2012a). Soil tillage is defined as the mechanical disturbance of the soil in order to promote conditions to germination, growth and establishment of the plants, affecting the structural characteristics of the soil which control air, water and heat flows (BUSARI et al., 2015). However, agricultural systems from different parts of the world that have been under conventional and chiseling tillage for a long time are adopting no-tillage system (NT) with very limited soil disturbance (REICHERT et al., 2016). In Brazil, NT has been used on about 33 million hectares in 2017 (IBGE, 2017) for several crops.

Long-term experiments conducted in southern Brazil have demonstrated the effects on soil structure after NT conversion in areas previously under more intense tillage systems. Franchini et al. (2009) reported similar or slightly lower soybean yield in a clayey soil during the first four harvests after the conversion to no-tillage which increased from the fifth year, when the system reached "maturity" - time of maturity can be variable depending on the texture, mineralogy, NT management and climate conditions. The positive effects of NT on soil physical properties is highly dependent of NT duration (REICHERT et al., 2018; BLANCO-CANQUI; RUIS, 2018). In a review about NT systems, Blanco-Canqui and Ruis et al. (2018) reported that NT may improve soil macroporosity and reduce bulk density and penetration resistance over time. However, in the first years (< 5 years of duration) the variation of the results can be large.

Understanding the influence of soil macropores on aeration and soil water relationships is important for evaluating root growth and root respiration (RAB et al., 2014). Macropores formed by earthworm burrows, root channels, fissures and inter aggregate voids, represent only a small fraction of the total porosity in soil, but play a central role in many physical processes like fluid flow and solute transport (KATUWAL et al., 2015c; SCHLÜTER et al., 2020). Soil air exchange with the atmosphere is one of the most important soil functions that directly impacts crop yield and the environment (PICCOLI et al., 2017). The air-filled porosity and gas transport properties are key characteristics that control the potential soil aeration, as they impose the soil physical constraints on soil aeration (MARTÍNEZ et al., 2016). The evaluation of the gas transport properties provides indirect information on how the soil pore network is arranged (HAMAMOTO et al., 2016), and therefore, it becomes a useful parameter to evaluate the structural organization after conversion to NT. Advective movement of gases in soil is dependent of the pressure gradient and controlled by air permeability (k_a), and it is influenced by the large continuous pores (Hagen-Poiseuille law), pore size distribution and air-filled porosity (MOLDRUP et al., 2001; HAMAMOTO et al., 2011). On the other hand, diffusion is dependent of the concentration gradient, it is controlled by gas diffusivity (D_s/D_o) and it is more related to air-filled pore space and pore network tortuosity (MOLDRUP et al., 2001; HAMAMOTO et al., 2011). Both k_a and D_s/D_o as a function of air-filled porosity for different moisture conditions can be used to estimate the functional characteristics of the pores, such as specific air permeability (GROENEVELT; KAY; GRANT, 1984), tortuosity, equivalent pore diameter of the air-conducting pores and number of pores in a transect (BALL, 1981; SCHJØNNING et al., 2002).

The application of X-ray computed tomography (CT) for evaluation of soil pore space has added a new research tool for investigating macroporosity and its characteristics (TAINA; HECK; ELLIOT, 2008; MUNKHOLM; HECK; DEEN, 2012b, 2016; NAVEED et al., 2013a; PIRES et al., 2017; SCHLÜTER et al., 2018). Moreover, it has been developed into a powerful tool to gain more insights into the complex interactions between soil structure and soil functions in intact soils (SCHLÜTER; SAMMARTINO; KOESTEL, 2020). Several studies have evaluated soil structure in different management systems using CT in

order to describe the geometrical attributes of soil pore network, such as pore size distribution, volume, shape, number of pores, connectivity, diameter, tortuosity and branches (MUNKHOLM et al., 2012b, 2016; PIRES et al., 2017, 2019; GALDOS et al., 2019; BORGES et al., 2019; PULIDO-MONCADA et al., 2020). Soil structure changes are not always detected when using a single sample size, because different system information is obtained from different observation levels (PICCOLI et al., 2019). To cover the relevant scales of structural pores, Lucas et al. (2020) suggest combining at least two sample sizes. First a soil column is scanned at coarse resolution and then subsamples are extracted and scanned at a higher resolution, and finally the pore size distribution from both scales can be compared and/or merged (SCHLÜTER et al., 2018).

More recently, studies have linked CT-derived pore characteristics to gas transport parameters (HAMAMOTO et al., 2016; SMET et al., 2018; MÜLLER et al., 2019). The non-destructiveness of the methods is specifically suited to reveal soil structure and preferential pathways (NAVEED et al., 2013b). Combining these methods may yield a better understanding of soil characteristics, starting by CT and imaging to quantify the pore network geometry, connectivity of pathways, and bottle necks constricting transport, followed by gas transport measurements revealing the functionality of the porous system in terms of air permeability and gas diffusivity (NAVEED et al., 2013a).

There are several studies about NT effects on soil pore morphology and functionality, however, only a few studies evaluated the effects of these tillage systems using CT linked with gas transport parameters (SMET et al., 2018; MÜLLER et al., 2019). Such studies, to our knowledge, have not been carried out for tropical and subtropical Brazilian soils.

The objective of this work was to quantify soil pore organization using CT and gas transport parameters in soil subjected to short-term NT (5 years NT after 13 years of chiseling tillage) and long-term NT (18 years of continuous NT) and grown with either maize (*Zea mays* L.) or soybean (*Glycine Max* L.) in southern Brazil in a loamy Ultisol. Our hypotheses are (i) that no-tillage practice improves soil structure favoring gas transport and the effectiveness increases

with the duration of NT growth with maize and (ii) gas transport parameters are well related to pore connectivity and continuity derived by CT.

4.2. Material and methods

4.2.1. Description of the experiment

The field experiment was carried out in a long-term tillage field on the Experimental Station of the Federal University of Rio Grande do Sul, Eldorado do Sul, RS, Brazil (30°05'47" S, 51°40'52" W, and 42 m above sea level). The local climate is humid subtropical (Köppen Cfa), with mean annual temperature of 18.8 °C and mean annual rainfall of 1,455 mm (1970 – 2009, climatological normal) according to Bergamaschi et al. (2013). The soil is classified as Ultisol (SOIL SURVEY STAFF, 2014). The particle size distribution in the layer of 0-10 cm is 462, 291 and 247 g kg⁻¹, respectively, sand, silt, and clay, with loam texture.

The experiment was a split plot design in four replications with two factors, being tillage and crops. The main plot comprised one half subject to 18 years of continuous no-tillage (18 NT), while the other half had 5 years of no-tillage after receiving 13 years of chiseling tillage (5 NT). Soil mechanical chiseling was conducted once a year (2000-2013) in the 5 NT treatment down to 25 cm depth before sowing of summer crops, using a chisel plow equipped with five shanks, 40 cm interval between shanks and the tip width was 6 cm. Whenever possible, crops were sown on the same after the tillage. Since the summer of 2014, no-tillage has been carried out in all plots using mounted precision seeder (Vence Tudo, AS 11500 model) with 5 tine furrow openers distributed at 45 cm spacing. The tine furrow openers worked at around 12 cm depth. The winter crops were always sown in no-tillage system without prior soil disturbance. For winter crops, the same no-tillage seeder model was used for the summer crops, but in this case comprised 11 double disc furrow openers distributed at 17 cm spacing. The tillage plots were cultivated alternately with either soybean (*Glycine max* L.) or maize (*Zea mays* L.) in the summer until 2016. From the summer of 2017 onwards, the tillage plots were divided into three subplots, where soybean, maize and *Brachiaria brizantha* were grown. In this study, we only included the soybean and maize subplots.

Additional information of the experimental area is described in the section 3.2.2 and 3.2.3.

4.2.2. Soil sampling

Undisturbed large soil cores of 567.05 cm³ (inner diameter ~9.5 cm, height ~8.0 cm) PVC cylinders were taken from inter-row at 4-12 cm depth in March 2019, which coincided with the final stage of soybean and maize growth. In total, 16 large soil samples were collected from the experiment (two soil tillage x two crops x four blocks x one depth). Samples were collected using a hydraulic bottle jack cylinder to minimize disturbance, gently removing the bulk soil around the cylinders, knife-trimming (Figure 18a-c), sealing samples with plastic film and transporting the samples to the laboratory in closed containers. After sampling, the samples were gently saturated and drained to -100 hPa on tension tables, and then stored at 2 °C until CT scanning.



Figure 18. Sampling of the large samples using a hydraulic bottle jack (a), soil core in 4 cm below to the surface (b), and soil core after knife-trimming.

4.2.3. X-ray computed tomography analysis

The large samples were scanned using an CT scanner (XTH 225, Nikon Metrology) at an energy of 160 kV and a beam current of 285 μ A using a 0.8 mm Cu filter for beam hardening reduction. A total of 2748 projections through 360° was performed with a scan time of 33 minutes. The images were reconstructed with a resolution of 60 μ m in X, Y and Z directions and 8-bit grey

scale using the CT Pro 3D software (Nikon Metrology). Afterward, small aluminum rings ($\sim 100 \text{ cm}^3$, $\sim 6.06 \text{ cm}$ inner diameter, $\sim 3.48 \text{ cm}$ height) were extracted from the large samples (Figure 19a-c).

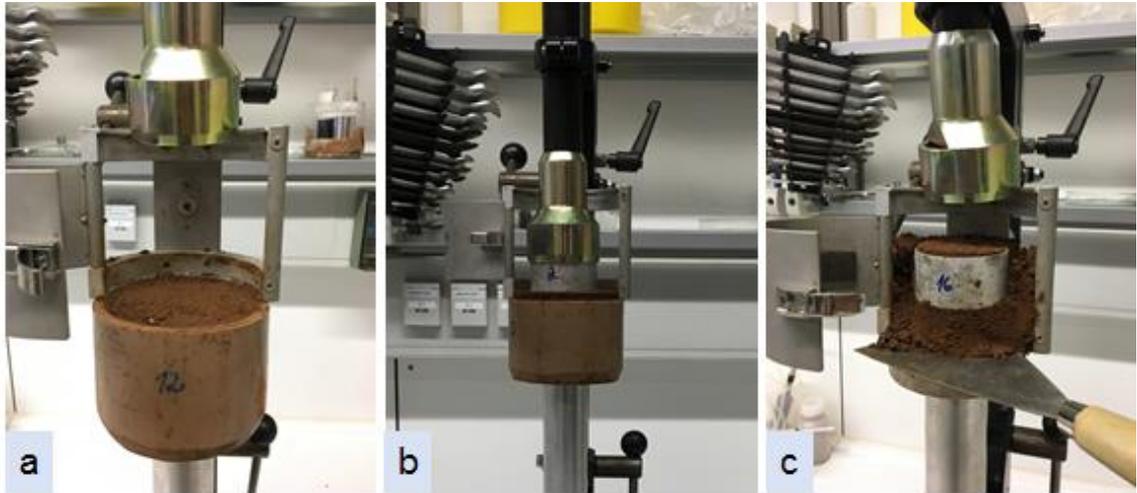


Figure 19. Subsampling procedure of small cores from large cores with large sample on the apparatus (a), position of subsampling (b), and small soil core after inserting in the large sample (c).

These subsamples were scanned at an energy level of 140 kV and a beam current of $280 \mu\text{A}$ using a 0.5 mm Cu filter and were reconstructed with a resolution of $37 \mu\text{m}$ in X, Y and Z directions. Each subsample scan comprised a total of 2540 projections. An example of original image stacks of the large and small soil cores (Figures 20a and 20b).

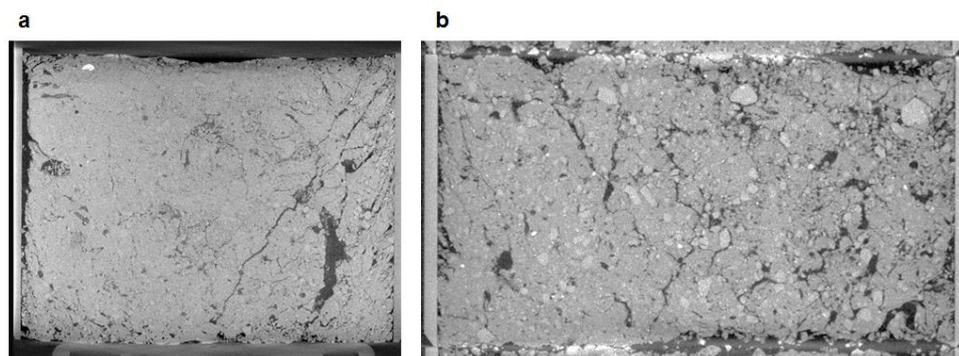


Figure 20. 2D images from original stacks of the large (a) and small soil cores (b).

Image processing and analysis were performed with ImageJ/Fiji software (SCHINDELIN et al., 2012) adopting similar procedures for the large and the small samples. Using the "Untilt stack" plugin, we conducted an

alignment correction to centralize the images for some large and small image stacks. Then, the corrected image stacks were cropped to a region of interest (ROI) of 80 mm diameter and 70 mm height (351.86 cm³ volume of ROI) for large samples and to 51 mm diameter and 30 mm height (61.28 cm³ volume of ROI) for small samples. This procedure resulted respectively in 1700 and 801 slices for large and small samples. A filter “Non-local Means Denoising” (BUADES; COLL; MOREL, 2005) of ImageJ was applied in order to minimize the noise. The segmentation process was performed using the thresholding “Moments” method (TSAI, 1985), in order to obtain binary images representing the pores and soil matrix. In the segmented images the volumes containing only 1 voxel of a phase were removed to prevent noise influencing further calculations by applying closing operation in ImageJ. Therefore, macropores and their characteristics are derived from pores with diameter > 120 µm for large cores and > 74 µm for small cores.

From the segmented images, CT-macroporosity, the largest macropore volume, CT-mean macropore diameter and macropore density were calculated using “Particle Analyser” module of the BoneJ plugin (DOUBE et al., 2010) in ImageJ. CT-macroporosity was calculated as the ratio of the number of pore voxels to the total number of voxels within the ROI. The CT-mean macropore diameter was determined with the thickness algorithm (DOUGHERTY; KUNZELMANN, 2007). This algorithm determines the local diameter of each pore at a certain point in 3D, as the largest sphere that fits within the pore structure at a given point along its centerline. The mean was then calculated as the sum of the product of each volume and pore thickness divided by volume of each macropore, i.e. as the volume-weighted average of pore diameters (KATUWAL et al., 2015a). Macropore density was calculated as the ratio of total number of individual macropores and volume of ROI (KATUWAL et al, 2015c).

The “Skeletonise 3D” and “Analyse Skeleton” modules of BoneJ (DOUBE et al., 2010) were used to derive topologic characteristics such as macropore branch density and macropore length density. Macropore branch density was calculated as the total number of all branches/segments (including the isolated macropores) in the ROI (KATUWAL et al., 2015c). The macropore

length density was calculated as the sum of actual lengths of all macropores per unit volume of soil within the ROI (KATUWAL et al., 2015c).

Macropore connectivity, referred to also as genus density, was calculated based on the count of genus per unit volume using “Particle Analyser” module. Genus refers to the total number of redundant connections or loops in the pore network of the ROI (VOGEL; WELLER; SCHLÜTER, 2010). Maximum connectivity of macropores was calculated as the ratio of the largest macropore volume and total macropore volume.

4.2.4. Gas transport analysis

After CT scanning, the small samples were successively drained to matric potentials of -60 and -100 hPa on tension tables, and -300 hPa on ceramic plates (suction system). Air permeability (k_a) and relative gas diffusivity (D_s/D_o) was measured at each matric potential. Air permeability measurements were based on the Forchheimer approach as described in Schjønning and Koppelgaard (2017). In the apparatus, a soil sample was placed in the measuring chamber by an inflatable rubber to avoid air leakage. The convective air flow rates were measured through the soil samples at four pneumatic pressures of ~5, ~2, ~1 and ~0.5 hPa. The true Darcian air permeability is calculated based on a non-linear relation between pressure gradient and flow data (SCHJØNNING; KOPPELGAARD, 2017).

The D_s/D_o was determined using the one-chamber technique described by Schjønning et al. (2013), which is based on the non-steady state method suggested by Taylor (1949). The concentration of O_2 , as the diffusing gas from the end exposed to the atmosphere to the other end into the chamber, was measured every 2 min for 2 h after flushing the chamber with N_2 gas. The diffusion coefficient, D_s , was calculated using Fick’s second law (NEIRA et al., 2015). Then, relative gas diffusivity (D_s/D_o) was determined by relating D_s to the diffusion of O_2 in the air, D_o (Figure 21).



Figure 21. Relative gas diffusivity apparatus used in this study.

Each sample was oven-dried at 105°C for 48 h for further estimation of bulk density (Bd) and total porosity (TP), assuming a particle density of 2.65 g cm⁻³. The microporosity ($\epsilon_{a<30}$) was calculated based on volumetric water retention at -100 hPa (i.e. pores < 30 μm in diameter). Macroporosity ($\epsilon_{a>30}$) (i.e. pores > 30 μm in diameter) was calculated from the difference between TP and $\epsilon_{a<30}$. In addition, air-filled porosity (ϵ_a) was calculated as the difference between TP and volumetric water content at both -60 hPa ($\epsilon_{a>50}$, > 50 μm pore diameter) and -300 hPa ($\epsilon_{a>10}$, > 10 μm pore diameter).

To analyze soil pore functional features, we used k_a and ϵ_a measurements to calculate the index “specific air permeability”, SP (GROENEVELT; KAY; GRANT, 1984). This empirical index was calculated at -60, -100 and -300 hPa matric potential (Equation 10):

$$\text{SP } (\mu\text{m}^2) = k_a / \epsilon_a \quad (10)$$

The SP was used to determine whether differences in k_a are simply related to differences in ϵ_a or whether other air-filled pore geometrical parameters such as pore size distribution, tortuosity and continuity are involved (GROENEVELT; KAY; GRANT, 1984). We also calculated two pore characteristics’ indices derived from the tube model proposed by Ball (1981),

the tortuosity (T_B) and equivalent pore diameter (d_B). The T_B means the ratio of continued pore length to sample length (Equation 11):

$$T_B = \sqrt{\epsilon_a}/(D_s/D_o) \quad (11)$$

The equivalent pore diameter (d_B) is a parameter for quantifying how active pores are in conducting air through the soil sample. This equation was derived by Millington and Quirk (1964) to unify Fick's law for diffusive transport with Poiseuille's law for convective fluid transport (Equation 12):

$$d_B = 2 \cdot \sqrt{8k_a/D_s/D_o} \quad (12)$$

4.2.5. Statistical analysis

All data were submitted to Shapiro-Wilk tests to verify normality and they were log-transformed if needed. A split-plot design model ANOVA was used to test the interaction between main effect (tillage) and subplot effect (crop). Means were tested using Tukey's test at 5% significance level. Statistical analysis was performed using software R 3.40 (R FOUNDATION FOR STATISTICAL COMPUTING) in combination with the package ExpDes (FERREIRA; CAVALCANTI; NOGUEIRA, 2014). Pearson's correlations were performed between CT-macroporosity and macroporosity by water retention. Regressions were performed between gas transport and CT-derived parameters. For these correlations were used the software SigmaPlot version 14.0 (SYSTAT SOFTWARE, San Jose, CA).

4.3. Results

4.3.1. Soil structure and gas transport parameters

There was no significant treatment effect on bulk density (Bd), total porosity (TP) and macroporosity at -100 hPa ($\epsilon_{a>30}$) for both small and large samples (Table 7). However, there was a significant effect of the sample size on these parameters. Soil Bd increased from large to small samples, whereas the opposite was the case for TP and $\epsilon_{a>30}$ ($p < 0.05$). Bd was 1.55 Mg m⁻³ and 1.59 Mg m⁻³ for 5 NT and 18 NT, respectively, for small samples, but was not significantly different between treatments. For large samples, Bd for 5 NT was 1.50 Mg m⁻³ and for 18 NT was 1.55 Mg m⁻³. This was also reflected in a non-significant difference to larger TP for 5 NT (0.43 m³ m⁻³) than for 18 NT (0.41 m³ m⁻³).

m^{-3}). For $\epsilon_{a>30}$, there was no difference between tillage and crops treatments for both sample sizes, neither trends were observed. Microporosity ($\epsilon_{a<30}$) on the small samples was significantly influenced by crops for 18 NT ($p < 0.05$), i.e. 0.24 and 0.26 $m^3 m^{-3}$ for soybean and maize, respectively (Table 7).

Table 7. Physical properties of the investigated soil including bulk density (Bd), total porosity (TP), microporosity ($\epsilon_{a<30}$) and macroporosity ($\epsilon_{a>30}$) in both sample sizes.

Treatment	Bd, Mg m^{-3}	TP, $m^3 m^{-3}$	$\epsilon_{a<30}$, $m^3 m^{-3}$	$\epsilon_{a>30}$, $m^3 m^{-3}$
Small samples				
Tillage				
18 NT	1.59 (0.07) A	0.40 (0.03) B	0.25 (0.01) A	0.15 (0.03) B
5 NT	1.55 (0.06) A	0.41 (0.02) B	0.25 (0.01) A	0.17 (0.03) B
Crop				
Soybean	1.58 (0.07) A	0.40 (0.02) B	0.24 (0.01) A	0.16 (0.03) B
Maize	1.56 (0.08) A	0.41 (0.03) B	0.25 (0.01) A	0.16 (0.04) A
Tillage*crop				
18 NT - Soybean	1.59 (0.09) a	0.40 (0.03) a	0.24 (0.01) b	0.16 (0.04) a
18 NT - Maize	1.60 (0.07) a	0.40 (0.03) a	0.26 (0.01) a	0.14 (0.03) a
5 NT - Soybean	1.57 (0.05) a	0.41 (0.02) a	0.25 (0.01) a	0.16 (0.02) a
5 NT - Maize	1.53 (0.07) a	0.42 (0.03) a	0.25 (0.01) a	0.18 (0.04) a
Large samples				
Tillage				
18 NT	1.55 (0.08) B	0.41 (0.03) A	0.25 (0.02) A	0.16 (0.04) A
5 NT	1.50 (0.10) B	0.43 (0.04) A	0.24 (0.01) B	0.19 (0.05) A
Crop				
Soybean	1.53 (0.07) B	0.42 (0.03) A	0.24 (0.01) A	0.18 (0.03) A
Maize	1.52 (0.11) A	0.43 (0.04) A	0.25 (0.02) A	0.18 (0.05) A

18 NT: 18 years of continuous no-tillage system; 5 NT: 5 years of no-tillage after 13 years of chiseling tillage. Macroporosity and microporosity were determined at -100 hPa matric potential (30 μm pore diameter). $\epsilon_{a<30}$ and $\epsilon_{a>30}$: air-filled porosity of pores respectively $<$ and $>$ 30 μm in diameter. Different uppercase letters in a column indicate significant differences between scales (small and large samples) and lowercase letters compare among treatments on the same scale ($p < 0.05$, Tukey's test). Coefficient of variation is given in parenthesis.

For the gas transport parameters there were no significant differences between treatments (Table 8). Except for soybean at -300 matric potential ($k_a = 22 \mu m^2$), the means of air permeability (k_a) were $< 20 \mu m^2$ in all potentials and treatments. This indicates low or limited k_a (FISH; KOPPI, 1994). There was no tillage effect on gas diffusivity (D_s/D_o). Crops had no significant

effect on k_a and D_s/D_o , either just a tendency towards higher values for soybean. There was also no tillage effect on D_s/D_o . The critical limits of D_s/D_o for aerobic microbial activity have been considered lower than 0.005 (STEPNIEWSKI, 1980, 1981) to 0.02 (STEPNIEWSKI, 1980, 1981; SCHJØNNING et al., 2003), which most means are in safe limits. For air-filled porosity (ϵ_a) there was no differences at any matric potential (Table 8). There was no tillage and crop effects on specific air permeability (SP) and tortuosity (T_B) at all matric potentials. The equivalent pore diameter (d_B) was very similar for all treatments at -60 and -100 hPa (198 - 209 μm) and at -300 hPa (134 - 145 μm) (Table 8).

Table 8. Gas transport and soil pore characteristics evaluated in the small scale including air permeability (k_a , μm^2), relative gas diffusivity (D_s/D_o), air-filled porosity (ϵ_a , $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), specific air permeability (SP, μm^2), tortuosity (T_B) and equivalent pore diameter (d_B , μm) at each matric potential.

	Matric potential, hPa	Tillage		Crop	
		18 NT	5 NT	Soybean	Maize
k_a	-60	15.6 (12.2)	16.5 (11.3)	18.0 (11.8)	14.2 (11.4)
	-100	15.8 (15.1)	16.5 (11.6)	18.5 (14.6)	13.8 (11.6)
	-300	19.2 (16.2)	19.9 (13.7)	22.0 (15.6)	17.0 (13.7)
D_s/D_o	-60	0.0126 (0.0103)	0.0104 (0.0052)	0.0145 (0.0100)	0.0086 (0.0039)
	-100	0.0134 (0.0130)	0.0117 (0.0080)	0.0151 (0.0131)	0.0100 (0.0070)
	-300	0.0265 (0.0120)	0.0271 (0.0079)	0.0293 (0.0095)	0.0242 (0.0101)
ϵ_a	-60	0.14 (0.03)	0.15 (0.03)	0.15 (0.03)	0.14 (0.04)
	-100	0.15 (0.03)	0.17 (0.03)	0.16 (0.03)	0.16 (0.04)
	-300	0.17 (0.03)	0.19 (0.03)	0.18 (0.03)	0.18 (0.04)
SP	-60	103 (61)	99 (60)	115 (59)	87 (58)
	-100	94 (68)	91 (58)	107 (66)	78 (56)
	-300	101 (66)	97 (60)	113 (63)	85 (59)
T_B	-60	3.8 (0.9)	4.1 (0.7)	3.5 (0.8)	4.3 (0.6)
	-100	4.0 (1.2)	4.2 (0.9)	3.8 (1.1)	4.4 (1.0)
	-300	2.7 (0.4)	2.7 (0.3)	2.5 (0.2)	2.8 (0.4)
d_B	-60	198 (49)	209 (57)	201 (45)	206 (60)
	-100	199 (62)	203 (62)	205 (59)	197 (64)
	-300	140 (29)	139 (43)	145 (34)	134 (38)

18 NT: 18 years of continuous no-tillage system; 5 NT: 5 years of no-tillage after 13 years of chiseling tillage. Coefficient of variation is given in parenthesis.

4.3.2. CT-derived pore characteristics

There was no significant treatment effect on CT-macroporosity (Figure 22a), although 5 NT tended to be higher than 18 NT for the small ($p=0.06$) and large scale ($p=0.07$). The largest macropore volume in 5 NT was significantly higher (17 cm^3) than 18 NT (11 cm^3) for large scale (Figure 22b). For small scale was also significantly different, where 5 NT had 6 cm^3 and 18 NT had 5 cm^3 . All CT-derived pore characteristics exhibited significantly scale effect (Figures 22 and 23). Comparing scales, all pore characteristics were significantly higher in the small scale than large ones, except the largest macropore volume (Figure 22b) and CT-mean macropore diameter (Figure 23a), which displayed the opposite trend.

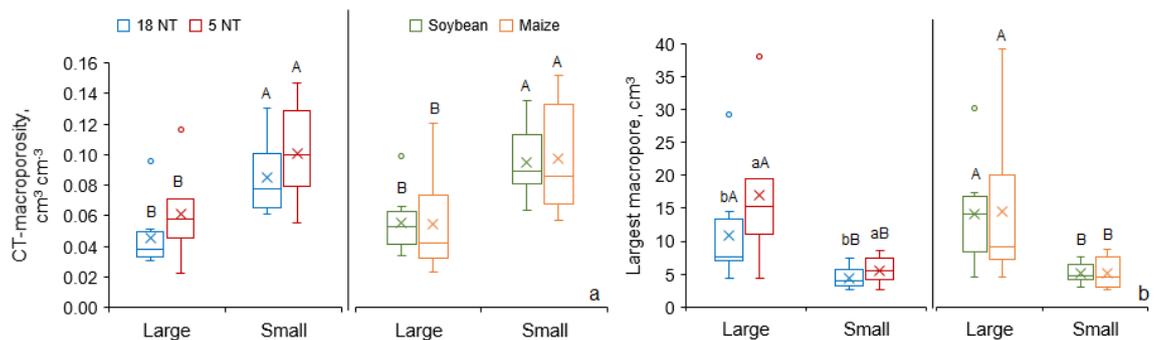


Figure 22. CT-macroporosity (a) and largest macropore volume (b) at large and small scale for tillage and crop.

Different uppercase letters indicate significant differences between scales and lowercase letters compare between treatments in the same scale ($p < 0.05$, Tukey's test). 18 NT: 18 years of continuous no-tillage system; 5 NT: 5 years of no-tillage after 13 years of chiseling tillage.

For CT-mean macropore diameter (Figure 23a), macropore density (Figure 23b), macropore branch density (Figure 23c), macropore length density (Figure 23e) and macropore connectivity (Figure 23f) there were no significant tillage and crop effects for both scales. On the other hand, maximum connectivity of macropores was significantly higher in 5 NT (0.75) than 18 NT (0.65) but only on large scale (Figure 23d).

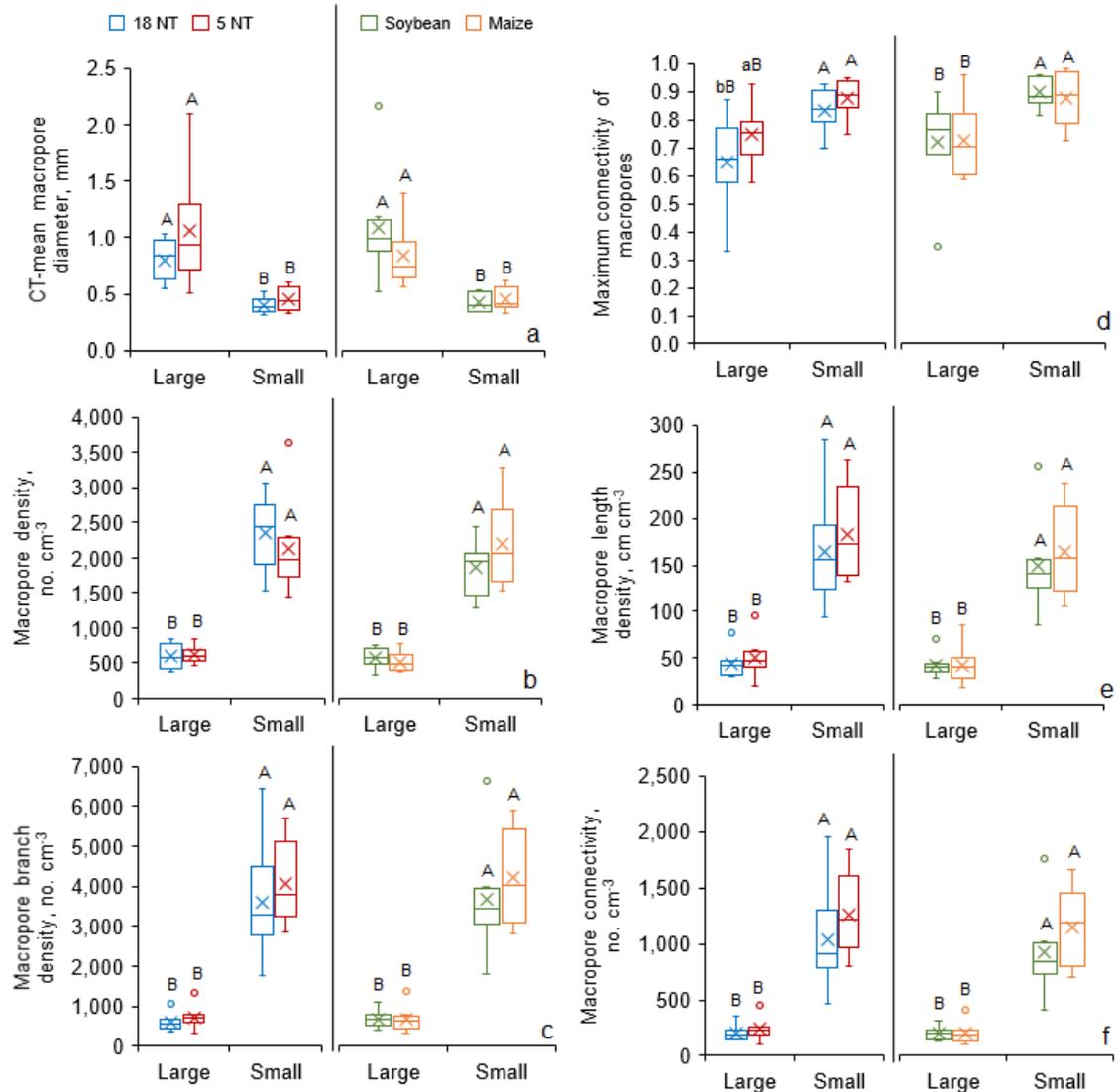


Figure 23. CT-mean macropore diameter (a), macropore density (b) and macropore branch density (c), maximum connectivity of macropores (d), macropore length density (e) and macropore connectivity (f) comparing between large and small scale for each tillage and crop treatment.

Different uppercase letters indicate significant differences between scales and lowercase letters compare between treatments on the same scale ($p < 0.05$, Tukey's test). 18 NT: 18 years of continuous no-tillage system; 5 NT: 5 years of no-tillage after 13 years of chiseling tillage.

4.3.3. Relationship between CT-macroporosity and macroporosity by water retention

Our results showed that $\epsilon_{a>30}$ was positively and strongly correlated to CT-macroporosity at large scale with pores detectable $> 120 \mu\text{m}$ ($R^2 = 0.88$) (Figure 24a) and at small scale with pores detectable $> 74 \mu\text{m}$ ($R^2 = 0.80$) (Figure 24b). Air-filled porosity at -60 hPa ($\epsilon_{a>50}$) was also strongly and positively related to CT-macroporosity at small scale ($R^2 = 0.82$) (Figure 24c). All

data of CT-macroporosity were lower than macroporosity by water retention ($\epsilon_{a>30}$ and $\epsilon_{a>50}$), as shown by the reference 1:1 line. Notice that the slope lines, i.e. b coefficient in the regression equation were closer to 1 when ϵ_a was related to CT-macroporosity at small scale (Figures 24b and 24c).

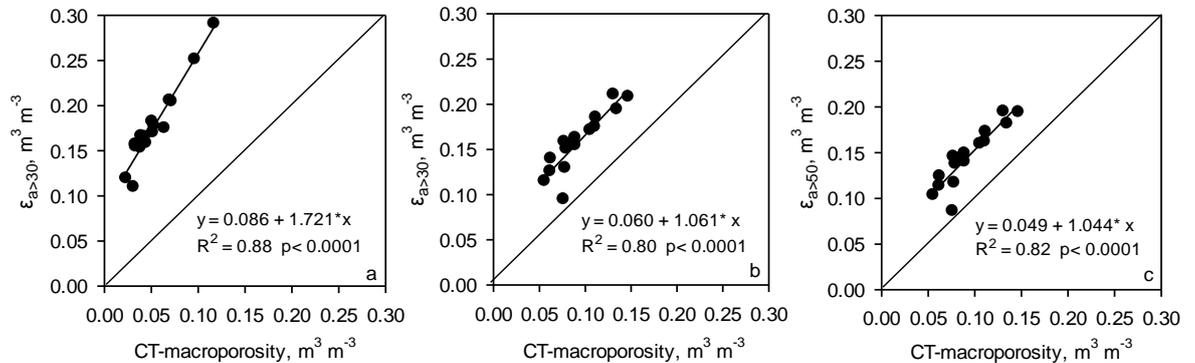


Figure 24. Relationship between air-filled porosity $> 30 \mu\text{m}$ ($\epsilon_{a>30}$) and CT-macroporosity on large scale (a), air-filled porosity $> 30 \mu\text{m}$ ($\epsilon_{a>30}$) and CT-macroporosity on small scale (b), and air-filled porosity $> 50 \mu\text{m}$ ($\epsilon_{a>50}$) and CT-macroporosity on small scale (c).

It is showed just on small samples at $> 50 \mu\text{m}$ (-60 hPa matric potential) since this potential was not carried out in the large ones.

4.3.4. Relationship between CT-derived characteristics and gas transport parameters

There were significant relations between gas transport parameters (D_s/D_o and k_a) measured in pores $> 30 \mu\text{m}$ and CT-derived pore characteristics at higher resolution. There was also significant relation between gas transport and air-filled porosity $> 30 \mu\text{m}$ ($\epsilon_{a>30}$). A significant relationship between D_s/D_o and CT-macroporosity ($R^2 = 0.30$) (Figure 25a) and between D_s/D_o and $\epsilon_{a>30}$ was observed with $R^2 = 0.60$ (Figure 25b). D_s/D_o showed non-significant relation with macropore connectivity ($R^2 = 0.15$) (Figure 25c), maximum connectivity of macropores ($R^2 = 0.24$) (Figure 25d), and macropore length density ($R^2 = 0.24$) (Figure 25e). Air permeability (k_a) showed significant relation with the CT-derived pore characteristics in all cases (Figures 26a-e). As for D_s/D_o , k_a was more strongly correlated to $\epsilon_{a>30}$ ($R^2 = 0.74$) (Figure 26b) than CT-macroporosity ($R^2 = 0.53$) (Figure 26a). k_a was more strongly correlated to macropore connectivity ($R^2 = 0.45$) (Figure 26c), maximum connectivity of macropores ($R^2 =$

0.57) (Figure 26d), and macropore length density ($R^2= 0.55$) (Figure 26e) than D_s/D_0 .

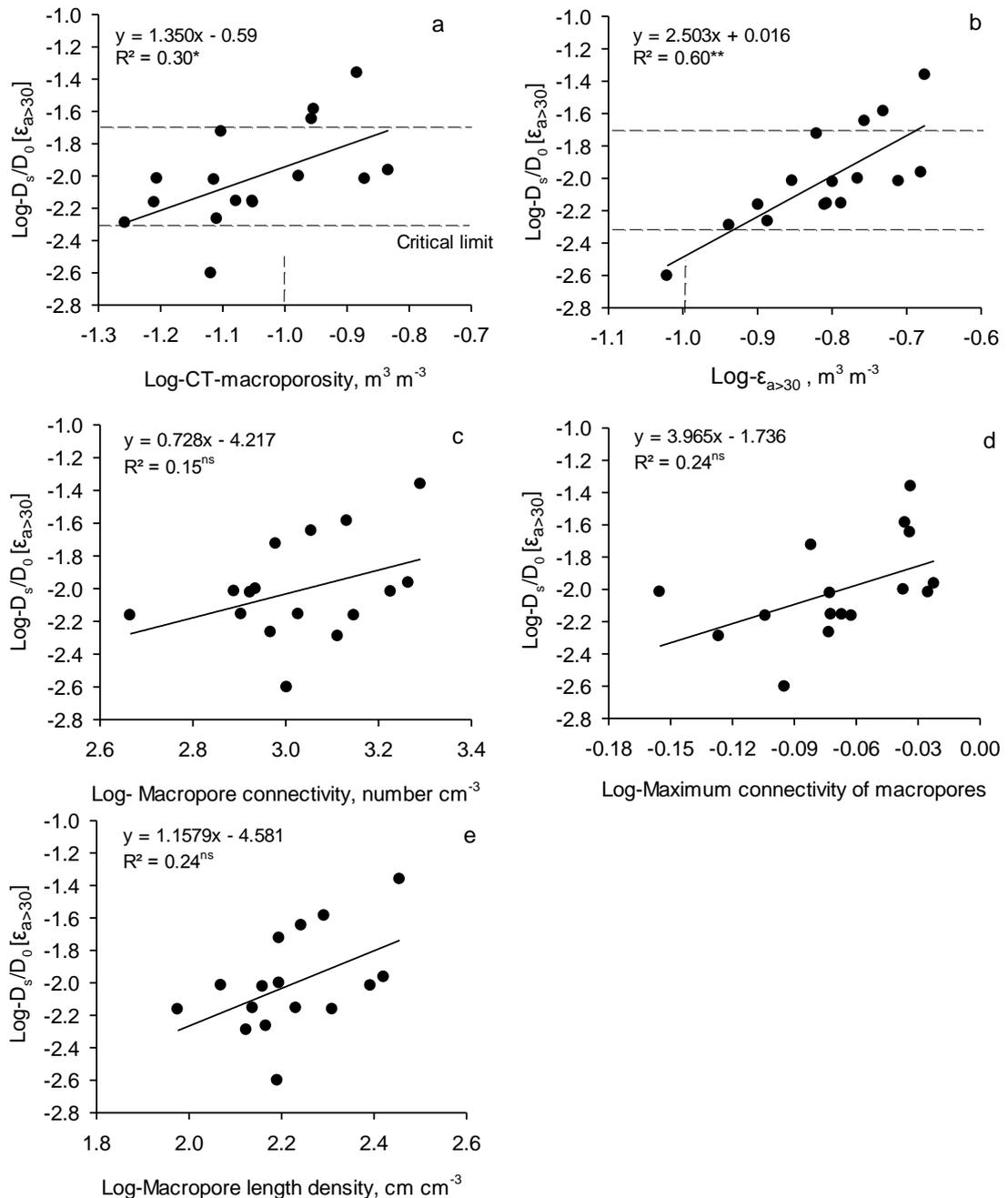


Figure 25. Relative gas diffusivity (D_s/D_0) at -100 hPa as a function of CT-macroporosity at small scale (a), air-filled porosity with pore diameter $> 30 \mu\text{m}$ ($\epsilon_{a>30}$) (b), macropore connectivity (c), maximum connectivity of macropores (d) and macropore length density (e).

Each point represents one repetition of each treatment. The dashed lines represent critical limits for air-filled porosity of $0.10 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ (Gable and Siemer, 1968) and relative gas diffusivity of 0.005 and 0.02 (Stepniowski, 1980 and Schjønning et al., 2003). Significance levels ns: non-significant, ** $p < 0.01$ and * $p < 0.05$.

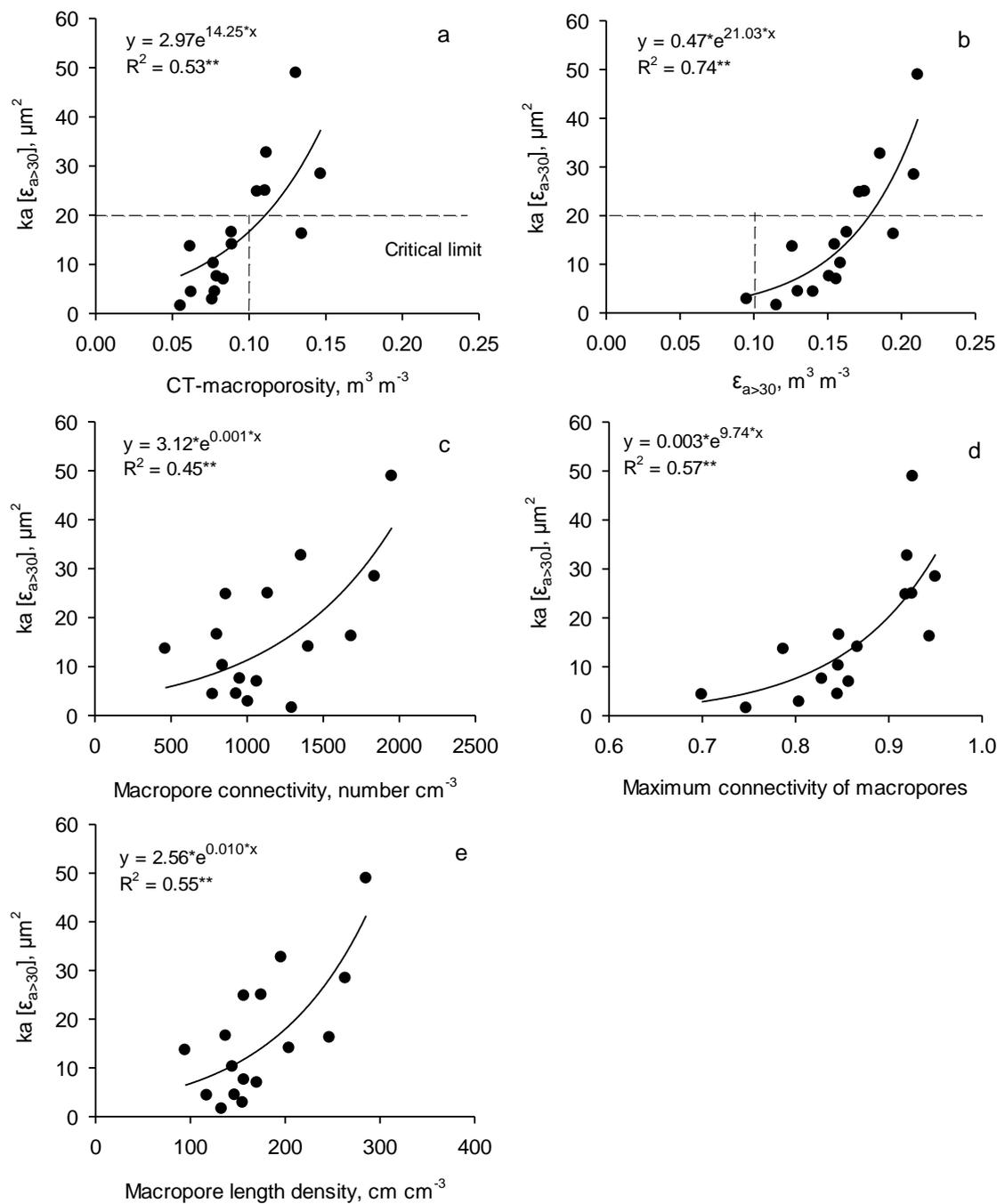


Figure 26. Air permeability (k_a) at -100 hPa as a function of CT-macroporosity at small scale (a), air-filled porosity with pore diameter $> 30 \mu\text{m}$ ($\epsilon_{a>30}$) (b), macropore connectivity (c), maximum connectivity of macropores (d) and macropore length density (e).

The dashed lines represent critical limits for air-filled porosity of $0.10 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ (Grable and Siemer, 1968) and air permeability of $20 \mu\text{m}^2$ (Fish and Koppi, 1994). Each point represents one repetition of each treatment. Significance levels ns: $** p < 0.01$.

4.4. Discussion

4.4.1. Treatment effect

We observed small effect of tillage systems on soil physical parameters in laboratory measurements. This might be due to soil reconsolidation after 5 years of NT (Reichert et al., 2017). These results indicate that five years of NT are already enough to approach a dynamic equilibrium in soil structure formation to which the 18 years NT treatment has already evolved. Therefore, some measurements that still have trends for being higher in 5 NT will vanish completely with time, i.e. continued in NT for more 13 years. Supporting these results, Reichert et al. (2017) working with chiseling tillage on NT with a soil containing 253 g kg⁻¹ of clay found short-term effect after chiseling practice on soil bulk density (Bd) and total porosity (TP) comparing to 13 years of continuous NT, i.e. the differences disappeared in two years of soil tillage practice. Blanco-Canqui and Ruis (2018) reported that changes in Bd and penetration resistance were moderate to strong and negatively correlated with NT duration after conversion. These authors concluded that NT could exert greater and faster changes on soil physical parameters under medium-textured (case of our study) than under sandy or fine-textured soils.

The largest macropore volume results indicated a great contribution of one single pore network and its connections for both scales. These pores accounted for 69 and 81% of porosity in 18 NT and 5 NT, respectively, at the large scale, and for 86 and 90% of porosity, respectively, at the small scale. Galdos et al. (2019) observed a high contribution (~97%) in no-tillage of one single large pore network (70 µm resolution) working with 30 years no-tillage in a Brazilian Oxisol. Ferreira et al. (2018) and Pires et al. (2019) found contribution of around 90% of the largest macropore in the porosity working with 60 and 35 µm resolution, respectively, in silty-clay and clay texture. The effect of tillage on the contribution of the largest macropore volume could be linked with the effects of chiseling tillage performed for 13 years before no-tillage adoption in 5 NT. This is surprising, as several studies have shown only a short-term residual effect of chiseling when converting to no-tillage (MORAES et al., 2016; NUNES et al., 2015; REICHERT et al., 2016), although the experimental fields in these previous studies were in no-tillage before chiseling the soil and used laboratory measurements for evaluation. These studies were carried out

on clayey soils and the chiseling effect was detectable in the soil for two years or less.

The morphometric CT-derived pore characteristics of macropores such as size, macroporosity, connectivity (PÖHLITZ et al., 2019), density, length density (KATUWAL et al., 2015c) and maximum connectivity of macropores are normally well correlated each other. The treatments with higher values of largest macropore volume had higher maximum connectivity of macropores. The 5 NT treatment had 75% and 18 NT 65% of all soil pores connected on large scale. Schlüter et al. (2020) working in a long-term tillage system with 200 g kg⁻¹ of clay found lower maximum connectivity for NT (68%) than for tilled (90%). These authors reported that although NT showed higher earthworm abundance and large biopores, it was not compensated in connectivity by no-tillage.

The lower CT-macroporosity and connectivity for long-term treatment in continuous no-tillage (18 NT) could be related to “no-tillage pan” due to 18 years of agricultural machine traffic. Generally, this pan layer is in ~5-7 to 15-20 cm in the soil (REICHERT et al., 2009), which match with the sampling depth of the present study. According to Pires et al. (2019) this effect of traffic be compensated by biological activities in no-tillage areas. However, it was not observed in our study. Pires et al. (2019) reported similar result working in long-term no-tillage system in Brazil.

The crops had little effects on soil physical parameters and no effects on CT-derived pore characteristics. This finding might be related to the long-term alternate rotation of the summer crops (soybean and maize in entire plots). If the crops had been cultivated separately since 2000, similar to the last two years, the crops more likely would have caused some effect. It worth mentioning that even treatment 5 NT has shown some trends in gas transport parameters and macropore characteristics of favorable soil structure conditions for plants, maize yield was significantly higher for 18 NT than 5 NT.

4.4.2. CT-derived pore characteristics and laboratory measurements

A combination of CT-derived pore characteristics and laboratory measurements provide a more complete picture of soil structure (PÖHLITZ et al., 2019). The CT-macroporosity for small scale was able to detect around 64

and 58% of the air-filled pore volume at -60 and -100 hPa matric potential, respectively. This indicates about one-third of macropores at higher resolution could not be detected because they are between 50 μm (drained pore diameter, -60 hPa) and 74 μm (detectable pores at higher resolution); and 30 μm (drained pore diameter, -100 hPa) and 74 μm . For this reason, the data of CT-macroporosity and macropores by water retention are close to 1:1 line, and not exactly on the line in the Figure 24. This result was also observed by Schlüter et al. (2018).

Most data of gas diffusivity (D_s/D_o) are inside of the critical limits to plant roots. On the other hand, the CT-macroporosity was in 63% (Figure 25a) of the cases below the critical limit level of $0.10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (GRABLE; SIEMER, 1968) for plant growth. However, only one value of $\epsilon_{a>30}$ (6.3%) (Figure 25b) was below $0.10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. The explanation to these results is associated with resolution acquired, with detectable porosity $> 74 \mu\text{m}$ diameter, while porosity drained at -100 hPa are $> 30 \mu\text{m}$ in diameter. Therefore, D_s/D_o was more strongly related to $\epsilon_{a>30}$ than to CT-macroporosity. Macropore connectivity, maximum connectivity of macropores and macropore length density showed that the change in connectivity did not greatly influence the gas diffusion, according to lower and non-significant coefficient of determination compared to air permeability (k_a). On the other hand, when the relation was performed with $\epsilon_{a>30}$ (indicating air-filled pore space) the coefficient of determination was significantly related to D_s/D_o .

The pore characteristics quantifying connectivity and continuity of pore network were better correlated and explained by k_a than D_s/D_o (Figure 26). Regression equations produced between k_a and CT-macroporosity showed that k_a above the critical limit of $20 \mu\text{m}^2$ occurred at CT-macroporosity $> 0.14 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ and at macroporosity by water retention ($\epsilon_{a>30}$) $> 0.18 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Maximum connectivity of macropores shows $k_a > 20 \mu\text{m}^2$ occurring after 0.9, i.e. when the connectivity was at the highest level. Katuwal et al. (2015a) concluded that pore characteristics obtained from gas transport measurements can be linked to the structural parameters derived from segmented CT data. The D_s/D_o and k_a data at -100 hPa (air-filled pores $> 30 \mu\text{m}$) indicated that it is mainly the small tortuous pores that are missing, when relating to the CT-derived pore characteristics where pores $> 74 \mu\text{m}$ are detectable, i.e. the smaller macropores are especially

of importance for diffusion transport. Thus, a large fraction of macroporosity is inside that critical size range. Our results point out that better CT-image resolution and possibly also improved image segmentation techniques are needed to improve the prediction of gas diffusivity at -100 hPa, which is considered as an estimate of field capacity in many countries.

4.4.3. Scale effect

Total porosity (TP) and macroporosity ($\epsilon_{a>30}$) decreased and bulk density (Bd) increased significantly after subsampling possibly due to reduced core volume and therefore increased probability of count more small pores, also called pore size exclusion principle by Dexter (1988). Piccoli et al. (2019) measured at three different scales and found that TP decreased significantly as sample size was decreased.

Largest macropore volume and CT-mean macropore diameter were higher on large scale due to the larger sample size, thus, the average of these parameters was calculated with bigger pores detected. According to Schlüter et al. (2018) there is a lower chance of detecting big pores with small soil cores. It shows the importance in further researches to work with different scales because depending on the parameter analyzed, valuable information can be overlooked. In our study we compare results from two scales. CT-macroporosity, macropore branch density, macropore density, macropore length density, maximum connectivity of macropores and macropore connectivity were better detected at higher resolution. Piccoli et al. (2019) found significant increase in connectivity density from medium (35 μm) to small scale (14 μm). This is because the gain in resolution reveals far more new pore connections between pore objects than objects themselves (LUCAS et al., 2019). It can be noticed that macroporosity increases to a lesser extent than macropore connectivity when decreasing scale and thus increasing resolution. This is because a small change in macroporosity within a critical range of 3-12% can lead to a drastic change in pore connectivity (JARVIS; LARSBO; KOESTEL, 2017; SCHLÜTER et al., 2020). Pore connectivity was higher for the small samples, most likely because small pore throats are resolved better at higher image resolution (SCHLÜTER et al., 2018).

4.5. Conclusion

Our study showed that five years of no-tillage system are already enough to observe its effects after conversion. On the other hand, two years of crop system is little time to identify significant changes. We were able to detect pores $> 74 \mu\text{m}$ in diameter with higher resolution and thereby extract 64% and 58% of the air-filled pore volume at -60 and -100 hPa matric potential. The CT-images provided pore characteristics where significant tillage effects were found. Thus, a slight residual effect of chiseling was detected after 5 years of no-tillage, even it was not reflected by higher maize yield. Continued NT (i.e. 13 more years) only changes the soil structure slightly and therefore does not induce significant changes in aeration.

The results also showed significant correlations between the CT-derived pore characteristics and gas transport parameters. The prediction of gas diffusivity was well correlated with air-filled pore space. The air permeability was better predicted by CT-derived pore connectivity indicators. Therefore, it suggests that gas transport can be predicted from CT-derived pore characteristics.

5. CONCLUSÕES GERAIS

Essa pesquisa teve como proposta estudar dois diferentes períodos de plantio direto (PD) ao longo do tempo, chamados de curto e longo prazo. Os tratamentos em curto prazo vieram de um histórico de preparos com escarificação e aração/gradagem intensa, os quais foram convertidos a PD para recuperar a estrutura do solo. Portanto, a ideia foi comparar um PD sob 17-18 anos continuamente, com 4-5 anos em PD após 13 anos de mobilização do solo.

Com intuito de testar o potencial da braquiária nas condições de solo e clima do experimento, uma das hipóteses do trabalho foi que a braquiária contribuiria positivamente na estruturação do solo. Assim, foi atingida no segundo ano de uso dessa cultura na área, pois observou-se um efeito sobre a densidade do solo e a porosidade total. No primeiro ano de cultivo da braquiária, não foram observados efeitos sobre os parâmetros físicos analisados. A cultura do milho se destacou em relação às demais culturas, apresentando maior potencial de estruturação do solo. A produtividade de milho foi maior no PD contínuo nos dois anos avaliados, assim como em anos anteriores antes da adoção do PD em área total, analisados em teses e dissertações na mesma área experimental. De maneira geral, as culturas também precisam permanecer mais tempo nas áreas para detectar maiores diferenças.

O segundo estudo desse trabalho foi motivado pelos resultados do primeiro, com o objetivo de investigar a estrutura do solo em uma escala “micro” e explorar os sistemas de manejo e de culturas. O uso da tomografia computadorizada de raio-X mostrou algumas características indicando maior rede de macroporos conectados para o tratamento a curto prazo em PD. Esse resultado se mostra oposto à primeira hipótese deste estudo, onde se esperava que o PD em longo prazo apresentaria essa condição.

Como considerações finais para trabalhos futuros, sugere-se ter, por exemplo, mais dois tratamentos para serem comparados com esses resultados. Um tratamento chamado “0 anos - recém preparado”, e comparar se as diferenças entre o “0 PD” e o 4 anos em PD são maiores que as diferenças entre os 4 anos em PD e o 17 anos em PD. Além desses, um tratamento com campo natural, para se ter uma condição onde o solo nunca foi mobilizado, mostrando a condição de estrutura natural do solo. Outra perspectiva que se poderia buscar seria a avaliação das culturas de grãos sobre a palhada de braquiária, a fim de testar a eficiência dessa gramínea perene como antecessora de milho e soja, e incluir como uma opção em áreas de plantio direto no Sul do Brasil, se apresentar resultados satisfatórios.

Sugere-se também que a avaliação do sistema radicular das culturas seja realizada de forma diferente da utilizada nesse estudo. Dependendo dos objetivos da pesquisa, a possibilidade da coleta de monólitos poderia ser uma alternativa mais adequada, embora seja mais trabalhosa e demorada. Além dessa, outra opção seria uma simples visualização e caracterização a campo, em um perfil de solo em maiores profundidades, o que forneceria uma boa estimativa de morfologia e distribuição do sistema radicular.

6. REFERÊNCIAS

- ABDOLLAHI, L.; MUNKHOLM, L. J. Eleven years' effect of conservation practices for temperate sandy loams: II. Soil pore characteristics. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 81, n. 2, p. 392-403, 2017.
- ABREU, S. L.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Mechanical and biological chiseling to reduce compaction of a sandy loam alfisol under no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, n. 3, p. 519-531, 2004.
- ALAKUKKU, L. Subsoil compaction due to wheel traffic. **Agricultural and Food Science**, Jokioinen, v. 8, n. 4/5, p. 333-351, 1999.
- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS – ASABE. **ASAE S313.3**: Soil cone penetrometer. St. Joseph: ASABE, 1999. 834 p.
- ATHMANN, M. *et al.* Root growth in biopores - evaluation within situ endoscopy. **Plant and Soil**, The Hague, v. 371, n. 1/2, p. 179-190, 2013.
- BAGARELLO, V.; IOVINO, M.; ELRICK, D. A simplified falling-head technique for rapid determination of field-saturated hydraulic conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 68, n. 1, p. 66-73, 2004.
- BALBINOT JÚNIOR, A. A. *et al.* Analysis of phenotypic plasticity in indeterminate soybean cultivars under different row spacing. **Australian Journal of Crop Science**, Brisbane, v. 12, n. 4, p. 648-654, 2018.
- BALL, B. C. Modelling of soil pores as tubes using gas permeabilities, gas diffusivities and water release. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 32, n. 4, p. 465-481, 1981.
- BATISTA, K.; MONTEIRO, F. A. Sistema radicular do Capim-Marandu, considerando as combinações de doses de nitrogênio e de enxofre. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 30, n. 5, p. 821-828, 2006.
- BENGOUGH, A. G. *et al.* Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 62, n. 1, p. 59-68, 2011.
- BERGAMASCHI, H. *et al.* Distribuição hídrica no período crítico do milho e produção de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 39, n. 9, p. 831-839, 2004.

BERGAMASCHI, H. *et al.* **Boletins agrometeorológicos da Estação Experimental Agrônômica da UFRGS: série histórica 1970-2012.** Porto Alegre: UFRGS. Faculdade de Agronomia, 2013. 8 p.

BERISSO, F. E. *et al.* Gas transport and subsoil pore characteristics: anisotropy and long-term effects of compaction. **Geoderma**, Amsterdam, v. 195/196, p. 184-191, 2013.

BERLATO, M.A. **Modelo de relação entre o rendimento de grãos de soja e o déficit hídrico para o Estado do Rio Grande do Sul.** 1987. 93 f. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Curso de Pós-graduação em Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São Paulo, 1987.

BERTOLLO, A. M. **Qualidade física de latossolo vermelho em função de plantas e cargas em sistema plantio direto com e sem escarificação.** 2018. 117 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

BESCANSA, P. *et al.* Soil water retention as affected by tillage and residue management in semiarid Spain. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 87, n. 1, p. 19-27, 2006.

BEUTLER, A. N. *et al.* Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo na produtividade de arroz de sequeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 39, n. 6, p. 575-580, 2004.

BLACKWELL, P. S. *et al.* The use of air-filled porosity and intrinsic permeability to air to characterize structure of macropore space and saturated hydraulic conductivity of clay soils. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 41, n. 2, p. 215-228, 1990.

BORGES, E. N. *et al.* Respostas de variedades de soja à compactação de camadas de solo. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 35, p. 553-568, 1988.

BORGES, J. A. R. *et al.* X-ray computed tomography for assessing the effect of tillage systems on topsoil morphological attributes. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 189, p. 25-35, 2019.

BUADES, A.; COLL, B.; MOREL, J-M. Non-local means denoising. **IPOL Journal - Image Processing On Line**, [France], v. 1, p. 208-212, 2011.

BUSARI, M. A. *et al.* Conservation tillage impacts on soil, crop and the environment. **International Soil and Water Conservation Research**, Beijing, v. 3, n. 2, p. 119-129, 2015.

CARMINATI, A. *et al.* Do roots mind the gap? **Plant and Soil**, The Hague, v. 367, n. 1/2, p. 651-661, 2012.

CASSOL, E. A.; DENARDIN, J. E.; KOCHHANN, R. A. Sistema plantio direto: evolução e implicações sobre a conservação do solo e da água. *In: SBCS. Tópicos em ciência do solo*. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. v. 1, p. 333-369.

CAVALIERI, K. M. V. *et al.* Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a Rhodic Ferrasol in Paraná, Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 103, n. 1, p. 158-164, 2009.

CHEN, G.; WEIL, R. R.; HILL, R. L. Effects of compaction and cover crops on soil least limiting water range and air permeability. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 136, p. 61-69, 2014.

COLOMBI, T. *et al.* Feedbacks between soil penetration resistance, root architecture and water uptake limit water accessibility and crop growth – A vicious circle. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 626, p. 1026-1035, 2018.

CUNHA, F. F. D. *et al.* Sistema radicular de seis gramíneas irrigadas em diferentes adubações nitrogenadas e manejos. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 32, n. 2, p. 351-357, 2010.

DAL FERRO, N. *et al.* Soil macro- and microstructure as affected by different tillage systems and their effects on maize root growth. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 140, p. 55-65, 2014.

DANTAS, G. D. F. *et al.* Produtividade e qualidade da brachiaria irrigada no outono/inverno. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 36, n. 3, p. 469-481, 2016.

DENARDIN, J. E.; FAGANELLO, A.; SANTI, A. Falhas na implementação do sistema plantio direto levam a degradação do solo. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v. 18, p. 33-34, 2008.

DENARDIN, J. E. *et al.* **Sistema plantio direto: evolução e implementação**. *In: PIREZ, J. L. F.; VARGAS, L.; CUNHA, G. R. (ed.). Trigo no Brasil: bases para produção competitiva e sustentável*. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2011. cap. 7, p. 185-215.

DEXTER, A. R. Advances in characterization of soil structure. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 11, n. 3/4, p. 199-238, 1988.

DÖRNER, J.; SANDOVAL, P.; DEC, D. The role of soil structure on the pore functionality of an Ultisol. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, Chillán, v. 10, n. 4, p. 495-508, 2010.

DOUBE, M. *et al.* BoneJ: free and extensible bone image analysis in ImageJ. **Bone**, New York, v. 47, n. 6, p. 1076–1079, 2010.

DOUGHERTY, R.; KUNZELMANN, K. H. Computing local thickness of 3D structures with ImageJ. **Microscopy and Microanalysis**, New York, v. 13, n. S02, p. 1678-1679, 2007.

DRESCHER, M. S. *et al.* Duração das alterações em propriedades físico-hídricas de Latossolo argiloso decorrentes da escarificação mecânica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 51, n. 2, p. 159-168, fev. 2016 .

EHLERS, W. *et al.* Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 3, n. 3, p. 261-275, 1983.

ELLIOTT, E. T.; COLEMAN, D. C. Let the soil work for us. **Ecological Bulletins**, Lund, v. 39, p. 23-32, 1988.

ELLISON, W. D. Soil erosion studies. Part II: Soil detachment hazard by raindrop splash. **Agricultural Engineering**, St. Joseph, v. 28, p. 197-201, 1947.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2006. 306 p.

FERREIRA, E. B.; CAVALCANTI, P. P.; NOGUEIRA, D. A. ExpDes: an R Package for ANOVA and experimental designs. **Applied Mathematics**, Irvine, v. 5, n. 19, p. 2952-2958, 2014.

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

FERREIRA, T. R. *et al.* X-ray microtomography analysis of lime application effects on soil porous system. **Geoderma**, Amsterdam, v. 324, p. 119-130, 2018.

FIGUEIREDO, G. C. **Avanços metodológicos e instrumentais em física do solo**. 2010. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

FIORINI, A. *et al.* Effects of no-till on root architecture and root-soil interactions in a three-year crop rotation. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 99, p. 156-166, 2018.

FISH, A. N.; KOPPI, A. J. The use of a simple field air permeameter as a rapid indicator of functional soil pore space. **Geoderma**, Amsterdam, v. 63, n. 3, p. 255-264, 1994.

FOLONI, J. S. S.; LIMA, S. L. D.; BÜLL, L. T. Crescimento aéreo e radicular da soja e de plantas de cobertura em camadas compactadas de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 30, n. 1, p. 49-57, 2006.

FRANCHINI, J. C. *et al.* **Manejo do solo para redução das perdas de produtividade pela seca.** Londrina: Embrapa Soja, 2009. 40 p. (Embrapa Soja. Documentos, 314).

FRANCHINI, J. C. *et al.* Evolution of crop yields in different tillage and cropping systems over two decades in southern Brazil. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 137, p. 178-185, 2012.

GAJRI, P. R.; ARORA, V. K.; PRIHAR, S. S. **Tillage for sustainable cropping.** New York: The Haworth Press, 2002. 195 p.

GALDOS, M. V. *et al.* Brachiaria species influence nitrate transport in soil by modifying soil structure with their root system. **Scientific Reports**, London, v. 10, n. 1, p. 5072, 2020.

GALDOS, M. V. *et al.* Assessing the long-term effects of zero-tillage on the macroporosity of Brazilian soils using X-ray computed tomography. **Geoderma**, Amsterdam, v. 337, p. 1126-1135, 2019.

GARBOUT, A.; MUNKHOLM, L. J.; HANSEN, S. B. Tillage effects on topsoil structural quality assessed using X-ray CT, soil cores and visual soil evaluation. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 128, p. 104-109, 2013.

GRABLE, A. R.; SIEMER, E. G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potentials, and elongation of corn roots. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 32, n. 2, p. 180-186, 1968.

GROENEVELT, P. H.; KAY, B. D.; GRANT, C. D. Physical assessment of a soil with respect to rooting potential. **Geoderma**, Amsterdam, v. 34, n. 2, p. 101-114, 1984.

GRZESIAK, S. *et al.* Changes in root system structure, leaf water potential and gas exchange of maize and triticale seedlings affected by soil compaction. **Environmental and Experimental Botany**, Amsterdam, v. 88, p. 2-10, 2013.

HAMAMOTO, S. *et al.* Pore network structure linked by X-ray CT to particle characteristics and transport parameters. **Soils and Foundations**, Tokyo, v. 56, n. 4, p. 676-690, 2016.

HAMAMOTO, S. *et al.* Two-region extended archie's law model for soil air permeability and gas diffusivity. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 75, p. 795-806, 2011.

HILLEL, D. **Introduction to environmental soil physics.** Amsterdam: Academic Press, 2004. 494 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Censo Agropecuário 2017.** Rio de Janeiro, 2017. Disponível em:

https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/3096/agro_2017_resultados_definitivos.pdf. Acesso em: 15 maio 2020.

IVERSEN, B. V. *et al.* Macropores and macropore transport: relating basic soil properties to macropore density and soil hydraulic properties. **Soil Science**, Brunswick, v. 177, n. 9, p. 535-542, 2012.

IVERSEN, B. V. *et al.* In situ, on-site and laboratory measurements of soil air permeability: boundary conditions and measurement scale. **Soil Science**, Brunswick, v. 166, n. 2, p. 97-106, 2001.

JACKSON, R. B. *et al.* A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. **Oecologia**, Berlin, v. 108, p. 389–411, 1996. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF00333714>. Acesso em: 15 maio 2020.

JARVIS, N.; LARSBO, M.; KOESTEL, J. Connectivity and percolation of structural pore networks in a cultivated silt loam soil quantified by X-ray tomography. **Geoderma**, Amsterdam, v. 287, p. 71-79, 2017.

JORGE, L. A. C.; RODRIGUES, A. F. O. **Safira**: sistema de análise de fibras e raízes. São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2008. 21 p. (Embrapa Instrumentação Agropecuária. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 24).

KADŽIENĖ, G.; MUNKHOLM, L. J.; MUTEGI, J. K. Root growth conditions in the topsoil as affected by tillage intensity. **Geoderma**, Amsterdam, v. 166, n. 1, p. 66-73, 2011.

KATUWAL, S. *et al.* Quantification of soil pore network complexity with x-ray computed tomography and gas transport measurements. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 79, p. 1577-1589, 2015a.

KATUWAL, S. *et al.* Effects of CT number derived matrix density on preferential flow and transport in a macroporous agricultural soil. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 14, n. 7, p. 1-13, 2015b.

KATUWAL, S. *et al.* Linking air and water transport in intact soils to macropore characteristics inferred from X-ray computed tomography. **Geoderma**, Amsterdam, v. 237/238, p. 9-20, 2015c.

KAWAMOTO, K. *et al.* Gas transport parameters in the vadose zone. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 5, p. 1194-1204, 2006.

KAY, B. V.; MUNKHOLM, L. J. Managing the interactions between soil biota and their physical habitat in agroecosystems. *In*: RITZ, K.; YOUNG, I. (ed.). **The architecture and biology of soils: life in inner space**. Wallingford: CAB International, 2011. p. 170– 195.

KUNCORO, P. H. *et al.* A study on the effect of compaction on transport properties of soil gas and water I: relative gas diffusivity, air permeability, and

saturated hydraulic conductivity. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 143, p. 172-179, 2014.

KUTILEK, M.; NIELSEN, D. R. **Soil hydrology**. Cremlingen-Destedt: Catena Verlag, 1994.

LILLEY, J. M.; KIRKEGAARD, J. A. Benefits of increased soil exploration by wheat roots. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 122, n. 2, p. 118-130, 2011.

LUCAS, M. *et al.* Soil structure formation along an agricultural chronosequence. **Geoderma**, Amsterdam, v. 350, p. 61-72, 2019.

LUCAS, M. *et al.* Revealing pore connectivity across scales and resolutions with X-ray CT. **European Journal of Soil Science**, Oxford, 18 Mar. 2020.
Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/ejss.12961>.
Acesso em: 15 maio 2020.

MARIANI, F. *et al.* Estabelecimento de gramíneas forrageiras tropicais perenes simultaneamente com as culturas de milho e soja no Norte do RS. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 42, n. 8, p. 1471-1476, 2012.

MARTÍNEZ, I. *et al.* Two decades of no-till in the Oberacker long-term field experiment. Part II. Soil porosity and gas transport parameters. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 163, p. 130-140, 2016.

MATERECHERA, S. A.; DEXTER, A. R.; ALSTON, A. M. Penetration of very strong soils by seedling roots of different plant species. **Plant and Soil**, The Hague, v. 135, n. 1, p. 31-41, 1991.

MENEZES, A. S. *et al.* Functionality of the porous network of Bt horizons of soils with and without cohesive character. **Geoderma**, Amsterdam, v. 313, p. 290-297, 2018.

MESQUITA, M. G. B. F.; MORAES, S. O.; CORRENTE, J. E. More adequate probability distributions to represent the saturated soil hydraulic conductivity. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 59, n. 4, p. 789-793, 2002.

MILLINGTON, R. J.; QUIRK, J. M. Formation factor and permeability equations. **Nature**, London, v. 202, p. 143-145, 1964.

MISRA, R. K.; DEXTER, A. R.; ALSTON, A. M. Maximum axial and radial growth pressures of plants roots. **Plant and Soil**, The Hague, v. 95, n. 3, p. 315-326, 1986.

MOLDRUP, P. *et al.* Tortuosity, diffusivity, and permeability in the soil liquid and gaseous phases. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, p. 613-623, 2001.

- MORAES, M. T. *et al.* Critical limits of soil penetration resistance in a Rhodic Eutrudox. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 38, n. 1, p. 288-298, 2014.
- MORAES, M. T. *et al.* Soil physical quality on tillage and cropping systems after two decades in the subtropical region of Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 155, p. 351-362, 2016.
- MORAES, M. T. *et al.* Age-hardening phenomena in an oxisol from the subtropical region of Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 170, p. 27-37, 2017.
- MÜLLER, K. *et al.* Effect of long-term irrigation and tillage practices on X-ray CT and gas transport derived pore-network characteristics. **Soil Research**, Collingwood, v. 57, n. 6, p. 657-669, 2019.
- MUNKHOLM, L. J. **The spade analysis - a modification of the qualitative spade diagnosis for scientific use**. Tjele: Danish Institute of Agricultural Sciences, 2000. (DIAS Report, Plant Production, No. 28). 73 p.
- MUNKHOLM, L. J.; HECK, R.; DEEN, B. Long-term effects of rotation and tillage on soil structure and crop yield. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 127, p. 85-91, 2013.
- MUNKHOLM, L. J.; HANSEN, E. M.; OLESEN, J. E. The effect of tillage intensity on soil structure and winter wheat root/shoot growth. **Soil Use and Management**, v. 24, n. 4, p. 392-400, 2008.
- MUNKHOLM, L. J.; HECK, R. J.; DEEN, B. Long-term rotation and tillage effects on soil structure and crop yield. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 127, p. 85-91, 2012a.
- MUNKHOLM, L. J.; HECK, R. J.; DEEN, B. Soil pore characteristics assessed from X-ray micro-CT derived images and correlations to soil friability. **Geoderma**, Amsterdam, v. 181-182, p. 22-29, 2012b.
- MUNKHOLM, L. J. *et al.* Relationship between soil aggregate strength, shape and porosity for soils under different long-term management. **Geoderma**, Amsterdam, v. 268, p. 52-59, 2016.
- MUNKHOLM, L. J. Soil friability: a review of the concept, assessment and effects of soil properties and management. **Geoderma**, Amsterdam, v. 167/168, p. 236-246, 2011.
- MUNKHOLM, L. J.; SCHJØNNING, P.; RASMUSSEN, K. J. Non-inverting tillage effects on soil mechanical properties of a humid sandy loam. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 62, p. 1-14, 2001.
- NAVEED, M. *et al.* Correlating gas transport parameters and x-ray computed tomography measurements in porous Media. **Soil Science**, Brunswick, v. 178, n. 2, p. 60-68, 2013a.

- NAVEED, M. *et al.* Revealing soil structure and functional macroporosity along a clay gradient using x-ray computed tomography. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 77, p. 403-411, 2013b.
- NEIRA, J. *et al.* Oxygen diffusion in soils: understanding the factors and processes needed for modeling. **Chilean Journal of Agricultural Research**, v. 75, p. 35-44, 2015.
- NOURI, A. *et al.* Thirty-four years of no-tillage and cover crops improve soil quality and increase cotton yield in Alfisols, Southeastern USA. **Geoderma**, Amsterdam, v. 337, p. 998-1008, 2019.
- NUNES, M. R. **Mitigação da compactação do solo em plantio direto**. 2014. 125 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2014.
- NUNES, M. R. *et al.* Mitigation of clayey soil compaction managed under no-tillage. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 148, p. 119-126, 2015.
- OADES, J. M. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. *In*: BRUSSAARD, L.; KOOISTRA, M. J. (ed.). **Soil Structure/Soil Biota Interrelationships**. Wageningen: Elsevier, 1993. p. 377-400.
- PICCOLI, I. *et al.* Challenges of conservation agriculture practices on silty soils. Effects on soil pore and gas transport characteristics in North-eastern Italy. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 172, p. 12-21, 2017.
- PICCOLI, I. *et al.* Coupling gas transport measurements and X-ray tomography scans for multiscale analysis in silty soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 338, p. 576-584, 2019.
- PIRES, L. F.; BACCHI, O. O. S. Soil structure changes evaluated with computed tomography. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 45, n. 4, p. 391-400, 2010.
- PIRES, L. F. *et al.* Soil structure changes induced by tillage systems. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 165, p. 66-79, 2017.
- PIRES, L. F. *et al.* X-ray microtomography to quantify morphological sandstones properties. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 62, [art.] e19180125, 2019.
- PÖHLITZ, J. *et al.* Computed tomography as an extension of classical methods in the analysis of soil compaction, exemplified on samples from two tillage treatments and at two moisture tensions. **Geoderma**, Amsterdam, v. 346, p. 52-62, 2019.
- PREVEDELLO, C. L.; ARMINDO, R. A. **Física do solo: com problemas resolvidos**. 2. ed. rev. e ampl. Curitiba: C. L. Prevedello, 2015. 474 p.

PREVEDELLO, J. *et al.* A funcionalidade do sistema poroso do solo em floresta de eucalipto sob Argissolo. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 41, n. 100, p. 557-566, 2013.

PULIDO-MONCADA, M. *et al.* Impact of potential bio-subsoilers on pore network of a severely compacted subsoil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 363, p. 114-154, 2020.

RAB, M. A. *et al.* Evaluation of X-ray computed tomography for quantifying macroporosity of loamy pasture soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 213, p. 460-470, 2014.

RABOT, E. *et al.* Soil structure as an indicator of soil functions: a review. **Geoderma**, Amsterdam, v. 314, p. 122-137, 2018.

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. *et al.* Is chiseling or inverting tillage required to improve mechanical and hydraulic properties of sandy clay loam soil under long-term no-tillage? **Geoderma**, Amsterdam, v. 301, p. 72-79, 2017.

REICHERT, J. M. *et al.* Ground-based harvesting operations of *Pinus taeda* affects structure and pore functioning of clay and sandy clay soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 331, p. 38-49, 2018.

REICHERT, J. M. *et al.* Conceptual framework for capacity and intensity physical soil properties affected by short and long-term (14 years) continuous no-tillage and controlled traffic. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 158, p. 123-136, 2016.

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.

RESZKOWSKA, A. *et al.* Influence of grazing on soil water and gas fluxes of two Inner Mongolian steppe ecosystems. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 111, n. 2, p. 180-189, 2011.

REYNOLDS, W. D.; ELRICK, D. E. Hydraulic conductivity of saturated soils, constant head method. *In: METHODS of Soil Analyses*. Madison: Soil Science Society of America, 2002. (Book Series, 5). pt. 4, p. 694-700.

REYNOLDS, W. D. *et al.* Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. **Geoderma**, Amsterdam, v. 110, n. 1, p. 131-146, 2002.

REYNOLDS, W. D. *et al.* Impacts of 48 years of consistent cropping, fertilization and land management on the physical quality of a clay loam soil. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 94, n. 3, p. 403-419, 2014.

REYNOLDS, W. D. *et al.* Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions. **Geoderma**, Amsterdam, v. 146, n. 3, p. 466-474, 2008.

ROSEBERG, R. J.; MCCOY, E. L. Measurement of soil macropore air permeability. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 54, n. 4, p. 969-974, 1990.

ROSOLEM, C. A.; ALMEIDA, A. C. S.; SACRAMENTO, L. V. S. Sistema radicular e nutrição da soja em função da compactação do solo. **Bragantia**, Campinas, v. 53, p. 259-266, 1994.

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

SANTOS, H. G. *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2013. 353 p.

SANTOS, K. S. *et al.* Variabilidade espacial de atributos físicos em solos de vale aluvial no semiárido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campinas, v. 16, n. 8, p. 828–835, 2012.

SCANLON, B. R.; ANDRASKI, B. J.; BILSKIE, J. Water potential: miscellaneous methods for measuring matric or water potential. *In*: DANE, J. H.; TOPP, C. (ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: Soil Science Society of America, 2002. pt. 4, p. 643-670.

SCHERPINSKI, C. *et al.* Variabilidade espacial da condutividade hidráulica e da infiltração da água no solo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 32, p. 7-13, 2010.

SCHJØNNING, P. *et al.* Two-chamber, two-gas and one-chamber, one-gas methods for measuring the soil-gas diffusion coefficient: validation and intercalibration. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 77, n. 3, p. 729-740, 2013.

SCHJØNNING, P.; KOPPELGAARD, M. The forchheimer approach for soil air permeability measurement. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 81, p. 1045-1053, 2017.

SCHJØNNING, P. *et al.* Modelling soil pore characteristics from measurements of air exchange: the long-term effects of fertilization and crop rotation. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 53, n. 2, p. 331-339, 2002.

SCHJØNNING, P. *et al.* Linking soil microbial activity to water- and air-phase contents and diffusivities. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 67, p. 156-165, 2003.

SCHLÜTER, S. *et al.* Long-term effects of conventional tillage and no-tillage on saturated and near-saturated hydraulic conductivity – Can their prediction be improved by pore metrics obtained with X-ray CT? **Geoderma**, Amsterdam, v. 361, p. 114-082, 2020a.

SCHLÜTER, S. *et al.* Long-term effects of conventional and reduced tillage on soil structure, soil ecological and soil hydraulic properties. **Geoderma**, Amsterdam, v. 332, p. 10-19, 2018.

SCHLÜTER, S.; SAMMARTINO, S.; KOESTEL, J. Exploring the relationship between soil structure and soil functions via pore-scale imaging. **Geoderma**, Amsterdam, v. 370, [art.] 114370, p. 114-370, 2020b.

SCHLÜTER, S.; WELLER, U.; VOGEL, H.-J. Soil-structure development including seasonal dynamics in a long-term fertilization experiment. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 174, n. 3, p. 395-403, 2011.

SCHNEIDER, C. A.; RASBAND, W. S.; ELICEIRI, K. W. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. **Nature Methods**, New York, v. 9, n. 7, p. 671-675, 2012.

SILVA, A. P. *et al.* Determinação da permeabilidade ao ar em amostras indeformadas de solo pelo método da pressão decrescente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 33, p.1535-1545, 2009.

SILVA, I. F.; MIELNICZUK, J. Avaliação do estado de agregação do solo afetado pelo uso agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 21, p. 313-319, 1997.

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

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Densidade do solo, atributos químicos e sistema radicular do milho afetados pelo pastejo e manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 24, p. 191-199, 2000.

SMET, S. *et al.* Can the pore scale geometry explain soil sample scale hydrodynamic properties? **Frontiers in Environmental Science**, Lausanne, v. 6, [art.] 20, 2018.

SMUCKER, A. J. M. Carbon utilization and losses by plant root systems. *In*: BARBER, S. A.; BOULDIN, D. R. (ed.). **Roots, nutrient and water influx and plant growth**. Madison: SSSA/CSSA/ASA, 1986. p. 27-46.

SOANE, B. D. *et al.* No-till in northern, western and south-western Europe: a review of problems and opportunities for crop production and the environment. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 118, p. 66–87, 2012.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to soil taxonomy**. 12th ed. Washington, DC: USDA-Natural Resources Conservation Service, 2014.

STEPNIEWSKI, W. Oxygen diffusion and strength as related to soil compaction. I. ODR. **Polish Journal of Soil Science**, Lublin, v. 13, n. 1, p. 3-12, 1980.

STEPNIEWSKI, W. Oxygen diffusion and strength as related to soil compaction. II. Oxygen diffusion rate. **Polish Journal of Soil Science**, Lublin, v. 14, n. 1, p. 3-13, 1981.

STIRZAKER, R. J.; PASSIOURA, J. B.; WILMS, Y. Soil structure and plant growth: impact of bulk density and biopores. **Plant and Soil**, The Hague, v. 185, n. 1, p. 151-162, 1996.

STUMPF, L. **Desenvolvimento radicular de gramíneas perenes e sua eficiência na recuperação de atributos físicos de um solo construído compactado em área de mineração de carvão**. 2015. 122 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Solos, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2015.

STUMPF, L. *et al.* Gramíneas perenes e sua relação com a recuperação de atributos físicos de um solo degradado construído. **Interciência**, Caracas, v. 42, p. 101-107, 2017.

STÜRMER, S. L. K. **Atributos químicos, físico-mecânicos e mineralógicos de um Argissolo Vermelho submetido a manejos de solo sob plantio direto**. 2012. 165 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

SUZUKI, L. E. A. S. **Compactação do solo e sua influência nas propriedades físicas**. 2005. 149 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

TAINA, I. A.; HECK, R. J.; ELLIOT, T. R. Application of X-ray computed tomography to soil science: a literature review. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 88, p. 1–20, 2008.

TAYLOR, S. A. Oxygen diffusion as a measure of soil aeration. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 14, p. 55–60, 1949.

TAYLOR, S. A. Use of mean soil moisture tension to evaluate the effect of soil moisture on crop yields. **Soil Science**, Brunswick, v. 74, p. 217–226, 1952.

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

TEIXEIRA, P. C. *et al.* **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 573 p.

TERRY, T. A.; CASSEL, D. K.; WOLLUM, A. G. Effects of soil sample size and included root and wood on bulk density in forested soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 45, p. 135-138, 1981.

TOPP, G. C. *et al.* Physical attributes of soil quality. *In*: GREGORICH, E. G.; CARTER, M. R. (ed.). **Soil quality for crop production and ecosystem health**. Amsterdam: Elsevier Science, 1997. p. 21-58.

TORMENA, C. A. *et al.* Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférrico sob sistemas de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, p. 211-219, 2007.

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

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

TRACY, S. R. *et al.* Soil compaction: a review of past and present techniques for investigating effects on root growth. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, London, v. 91, n. 9, p. 1528-1537, 2011.

TSAI, W-H. Moment-preserving thresholding: a new approach. **Computer Vision, Graphics, and Image Processing**, New York, v. 29, n. 3, p. 377-393, 1985.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, p. 892-898, 1980.

VAZ, C. *et al.* New perspectives for the application of high-resolution benchtop X-ray microCT for quantifying void, solid and liquid phases in soils. *In*: TEIXEIRA, W. *et al.* (ed.). **Application of soil physics in environmental analyses**. Cham: Springer, 2014. p. 261– 281.

VEZZANI, F. M. *et al.* The importance of plants to development and maintenance of soil structure, microbial communities and ecosystem functions. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 175, p. 139-149, 2018.

VOGEL, H. J.; WELLER, U.; SCHLÜTER, S. Quantification of soil structure based on Minkowski functions. **Computers & Geosciences**, Oxford, v. 36, n. 10, p. 1236-1245, 2010.

WEIL, A.; MUNKHOLM, L. J. Describing soil structures, rooting and biological activity and recognising tillage effects, damage and recovery from damage in fine and coarse-textured soils. *In*: BALI, B. C.; MUNKHOLM, L. J. (ed.). **Visual soil evaluation: realising potential crop production with minimum environmental impact**. Wallingford: CABI Publishing, 2015. p. 1-14.

WHITE, R. E. **Principles and practice of soil science**: the soil as a natural resource. 4th ed. New York: Blackwell Science, 2006.

YASSEEN, B. T.; ALOMARY, S. S. An analysis of the effects of water-stress on leaf growth and yield of 3 barley cultivars. **Irrigation Science**, New York, v. 14, n. 3, p. 157-162, 1994.

ZÚÑIGA, F. *et al.* Anisotropy of intensity–capacity parameters on Aquands with contrasting swelling–shrinkage cycles. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 193, p. 101-113, 2019.

7. APÊNDICES

Apêndice 1. Descrição morfológica geral do solo estudado (Stürmer, 2012).

PERFIL: 1

DATA: 07/07/2011

CLASSIFICAÇÃO: ARGISSOLO VERMELHO Distrófico típico

SITUAÇÃO: descrito e coletado em trincheira escavada em trecho médio da coxilha

LOCALIZAÇÃO: Estação Experimental Agronômica UFRGS/PRONEX, no município de Eldorado do Sul (COORDENADA – 22J – S 6670331S; E 434395)

ALTITUDE: 40m

SITUAÇÃO E DECLIVE DO PERFIL: 1 – 3%

RELEVO LOCAL: Plano a suave ondulado

RELEVO REGIONAL: Suave ondulado

EROSÃO: não aparente

DRENAGEM: bem drenado

PEDREGOSIDADE: Não pedregoso

ROCHOSIDADE: não rochoso

LITOLOGIA: Rochas ígneas/Rochas metamórficas

MATERIAL DE ORIGEM: Granito/Gnaise

CRONOLOGIA: Pré-Cambriano/Paleozóico

FORMAÇÃO GEOLÓGICA: Escudo Sul riograndense

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA: Estepe (Campos do sul do Brasil) - Arborizada com florestas de galeria

USO ATUAL: Campo Nativo

CLIMA: Cfa, da classificação de Köppen.

DESCRITO E COLETADO POR: NASCIMENTO, P. C.; MAZURANA, M.; FINK, J. R.; SILVEIRA, V. H.

Apêndice 2. Descrição morfológica da área (Stürmer, 2012).

A1: 0 – 8 cm; 7,5YR 3/3 (úmido); franca arenosa; fraca, pequena, granular; friável, não plástico e não pegajoso a ligeiramente pegajoso; transição plana e clara; raízes muitas.

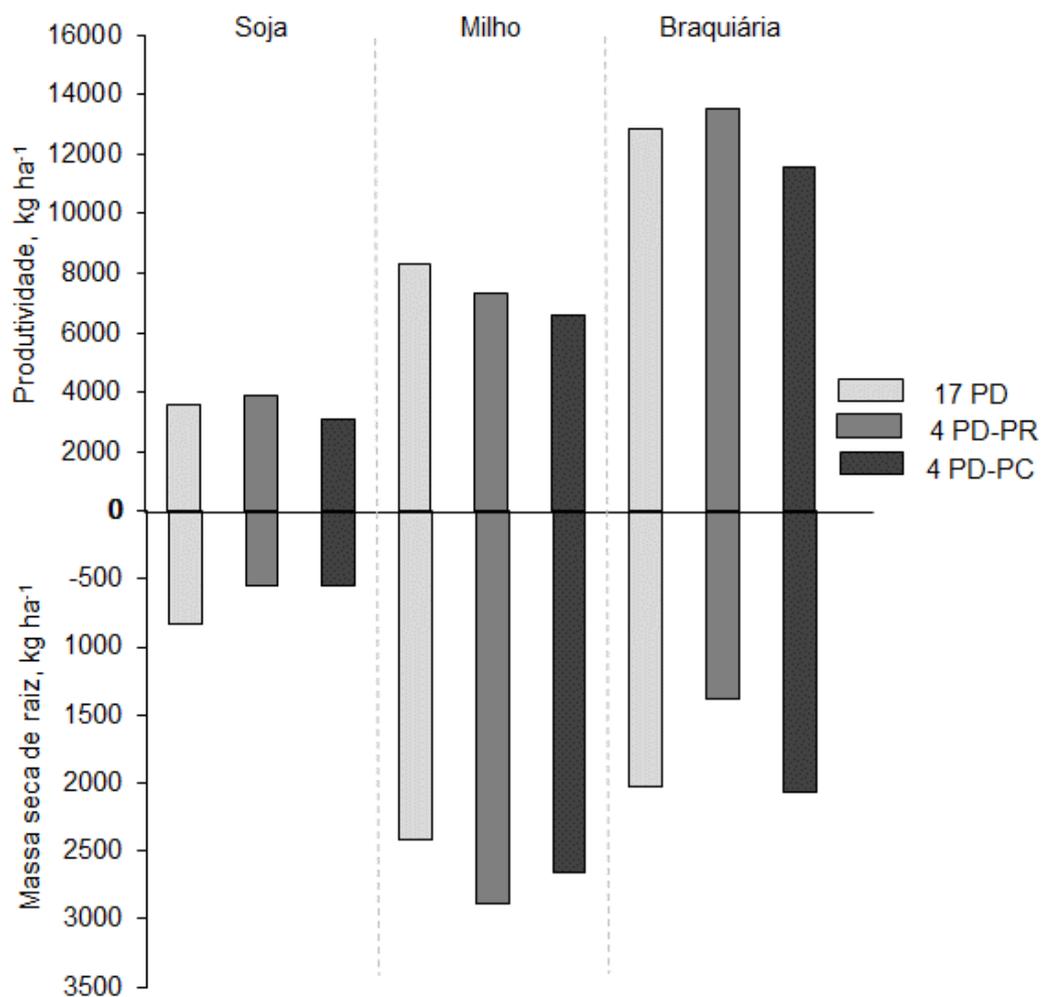
A2: 8 – 35 cm; 7,5YR 3/4 (úmido); franca arenosa; fraca, pequena, blocos angulares e subangulares; friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição plana e gradual; raízes comuns.

AB: 35 – 60 cm; 5YR 3/4 (úmido); franco argilo arenosa; moderada, pequena a média, blocos angulares e subangulares; friável, ligeiramente plástico, ligeiramente pegajoso a pegajoso; transição plana e gradual; poucas raízes.

BA: 60 – 85 cm; 5YR 4/6 (úmida); franco argilo arenosa; moderada, média, blocos subangulares; friável a firme, ligeiramente plástico, pegajoso; transição gradual; raízes raras.

Bt1: 85 – 110 cm; 2,5YR 3/4 (úmida); franca argilosa; firme, ligeiramente plástico, pegajoso; transição gradual.

Bt2: 110 – 130 + cm; 2,5YR 4/6 (úmida); argilosa; muito firme, plástico, pegajoso.



Apêndice 3. Produtividade das culturas e massa seca de raiz separadamente nos três sistemas de manejo do solo (2017/18).