

Condições físicas de Chernossolos cultivados com soja na bacia hidrográfica do Rio Santa Maria, RS

Pablo Lacerda Ribeiro¹, Adilson Luís Bamberg², Roberta Jeske Kunde¹,
Cristiane Mariliz Stöcker¹, Alex Becker Monteiro¹, Rosane Martinazzo²

¹ Universidade Federal de Pelotas, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Capão do Leão, RS, Brasil. E-mail: pablorigeolr@gmail.com (ORCID: 0000-0001-7512-1390); roberta_kunde@hotmail.com (ORCID: 0000-0003-3964-9854); crisstocker@yahoo.com.br (ORCID: 0000-0003-0961-5178); alexbeckermonteiro@gmail.com (ORCID: 0000-0002-1903-2454)

² Embrapa Clima Temperado, Pelotas, RS, Brasil. E-mail: adilson.bamberg@embrapa.br (ORCID: 0000-0002-3068-9836); rosane.martinazzo@embrapa.br (ORCID: 0000-0002-1365-6530)

RESUMO: A soja está sendo introduzida recentemente em rotação com arroz irrigado em terras baixas do sul do Brasil, promovendo diversos benefícios, porém, condições edafoclimáticas podem limitar o desenvolvimento pleno da cultura, sobretudo as em razão dos atributos físicos do solo e dos períodos de estiagem. Esse estudo objetivou avaliar as condições físicas de Chernossolos da bacia hidrográfica do Rio Santa Maria, RS, localizados em áreas agrícolas com diferentes tipos de cultivo (preparo convencional e plantio direto) sob sistema irrigado por aspersão (pivô central). Foram coletadas amostras de solo com estrutura preservada e não preservada nas camadas 0,0 a 0,1; 0,1 a 0,2 e 0,2 a 0,4 m para a determinação de atributos como densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), microporosidade (Mi), macroporosidade (Ma), estabilidade de agregados em água (AEA), diâmetro médio ponderado de agregados (DMP) e variáveis derivadas da curva de retenção de água no solo (CRAS). Características naturais do solo como o hidromorfismo e a forma como estes são cultivados resultam em condições físicas classificadas como restritivas ao pleno desenvolvimento da soja em terras baixas.

Palavras-chave: agregação do solo; água disponível; plantio direto; porosidade; solos hidromórficos

Physical conditions of Molisols under soybean cultivation in the Santa Maria River basin, RS, Brazil

ABSTRACT: The soybean has been recently introduced in rotation with irrigated rice in southern Brazilian lowlands, promoting many benefits; however, the soil and climate conditions can limit its full development, mainly the soil physical characteristics and drought periods. This study aimed to evaluate the physical conditions of Molisols located in agricultural areas with different tillage systems (conventional tillage and no-tillage) under sprinkler irrigation system (central pivot) in the Santa Maria River basin, Rio Grande do Sul State. Undisturbed and disturbed soil samples were collected in the 0 to 0,1; 0,1 to 0,2 and 0,2 to 0,4 m soil layers to determine attributes as bulk density (Ds), total porosity (Pt), microporosity (Mi), macroporosity (Ma), water-stable aggregates (AEA), mean weight diameter of aggregates (DMP) and variables derivate from the soil water retention curve (CRAS). Soil natural characteristics as hydromorphism and the way they were conducted result in physical conditions classified as restrictive to the full development of soybean in lowlands.

Key words: soil aggregation; plant available water; no till; porosity; hydromorphic soils

Introdução

Dentre os destinos da água destaca-se a agricultura, pois a irrigação totaliza 70% dos recursos hídricos utilizados no Brasil (ANA, 2013), enquanto que, no Rio Grande do Sul (RS), a agricultura irrigada corresponde a 83,5% da demanda por água aduzida de mananciais (Cabrera et al., 2008). Um exemplo dessa situação é a bacia hidrográfica do Rio Santa Maria, que se situa no sudoeste do Estado e tem área equivalente a 16.000 km², sendo a irrigação de lavouras orizícolas o principal uso consuntivo da água (SEMA, 2010).

O fato do RS destinar maiores volumes de água à irrigação do que a média brasileira se deve a área ocupada pela orizicultura irrigada por inundação em solos de terras baixas. Estima-se que três milhões de hectares são destinados a este sistema de produção, sendo cerca de um milhão de hectares efetivamente cultivados anualmente com a cultura, enquanto que praticamente todo o restante da área, até alguns anos atrás, era destinado à pecuária extensiva de corte ou permanecia em pousio (Verneti et al., 2009).

Como alternativas ao tradicional sistema agropecuário de produção, culturas de sequeiro de retorno econômico atrativo, como a soja, têm sido introduzidas visando a substituição ou rotação com arroz irrigado (Verneti et al., 2009). Porém, as áreas de terras baixas destinadas ao cultivo de arroz são caracterizadas, de maneira geral, por relevo plano a suavemente ondulado e graus de hidromorfismo variáveis (Parfitt et al., 2009).

Tratando-se de Chernossolos com características vérticas, o solo se torna duro quando seco e plástico e pegajoso quando úmido, podendo inviabilizar as operações de preparo do solo, semeadura e estabelecimento das culturas (Streck et al., 2008), indicando limitações, principalmente, derivadas dos atributos físicos desses solos. Por isso, o sucesso de culturas de sequeiro nessas áreas depende não somente de condições climáticas favoráveis, mas também da implantação de técnicas eficientes de drenagem e adaptações nos sistemas de irrigação e tipos de manejo do solo.

O solo com adequada qualidade física deve permitir a infiltração, responder ao manejo, resistir à degradação e promover as trocas de calor e de gases com a atmosfera e raízes de plantas, favorecendo o crescimento e desenvolvimento (Reichert et al., 2003). As características do espaço poroso do solo são fortemente relacionadas à qualidade física e, por isso, os atributos indicadores expressam, direta ou indiretamente, seu volume e/ou funções (Reynolds et al., 2009). Na literatura foram propostos valores de referência para atributos físicos do solo (Reichert et al., 2003; Reichert et al., 2009; Reynolds et al., 2009), permitindo verificar a influência de diferentes tipos de cultivo e parametrizar e comparar as condições físicas de diferentes áreas e a aptidão para uso agrícola.

Apesar da existência de cultivares de soja com adequada adaptabilidade, o cultivo da soja vem se expandindo sobre as terras baixas do bioma Pampa sem considerar as peculiaridades regionais de solo e clima. Ademais, as diferenças de atributos do solo relacionados à retenção,

armazenamento e disponibilidade de água, assim como o efeito dos tipos de cultivo sobre estes atributos não têm sido levados em consideração no manejo da irrigação por aspersão. Portanto, em função da importância do manejo e conservação da água e do solo em conjunto com a atividade agrícola, este trabalho objetivou avaliar as condições físicas de Chernossolos por meio de atributos físico-hídricos em quatro áreas agrícolas manejadas com diferentes tipos de manejo (preparo convencional e plantio direto) e irrigadas por aspersão (pivô central) na Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria, RS.

Material e Métodos

O estudo foi desenvolvido em 2014/2015 em quatro áreas agrícolas (P1, P2, P3 e P4) produtoras de soja (*Glycine max* (L.)) nos municípios de Dom Pedrito e Rosário do Sul, RS, sendo as coordenadas geográficas: 30° 56' 24,60" S 54° 52' 00,73" O (P1); 30° 45' 55,57" S 54° 46' 31,20" O (P2); 30° 35' 16,91" S 54° 46' 08,29" O (P3) e 30° 31' 50,99" S 54° 47' 27,77" O (P4).

Na safra 2014/2015 todas as áreas avaliadas foram cultivadas com soja sob irrigação por aspersão em sucessão com azevém semeado e pastejado no inverno, mas adotaram-se distintos tipos de cultivo do solo: A P1 era manejada com preparo convencional do solo há pelo menos três anos; a P2 era manejada com plantio direto (PD) com aproximadamente dois anos de implantação; P3 e P4 eram áreas de campo nativo pastejado após um ano de instalação de sucessão soja/azevém com plantio direto.

Todas as áreas situam-se na margem esquerda do Rio Santa Maria e compreendem Chernossolos formados sobre sedimentos da Bacia do Paraná com diferentes classes texturais (Tabela 1), graus de hidromorfismo e presença de argilas expansivas esmectitas (Streck et al., 2008).

Tabela 1. Argila dispersa em água (ADA) e frações granulométricas de áreas agrícolas produtoras de soja em Chernossolos da bacia hidrográfica do Rio Santa Maria, RS, avaliados em diferentes camadas do solo.

AA	ADA	Argila (%)	Silte	Areia	Classe textural
Camada de 0,0 a 0,1 m					
P1	6,60	17,20	61,65	21,15	Franco Siltoso
P2	6,90	21,88	60,89	17,23	Franco Siltoso
P3	14,30	26,23	51,36	22,41	Franco Siltoso
P4	11,85	26,54	43,10	30,36	Franco Argiloso
Camada de 0,1 a 0,2 m					
P1	8,48	17,60	59,91	22,48	Franco Siltoso
P2	10,14	22,81	58,92	18,27	Franco Siltoso
P3	14,73	25,81	49,83	24,36	Franco Siltoso
P4	19,46	30,61	41,32	28,07	Franco Siltoso
Camada de 0,2 a 0,4 m					
P1	15,99	25,14	54,46	20,40	Franco Siltoso
P2	15,52	29,49	51,44	19,07	Franco Argilo Siltoso
P3	26,60	43,96	37,96	18,08	Argila
P4	20,42	31,68	34,86	33,46	Franco Siltoso

Foram coletadas amostras de solo com estrutura preservada e não preservada em área com equipamento de irrigação por aspersão (pivô central) nas quatro áreas agrícolas, nas camadas de 0,0 a 0,1; 0,1 a 0,2 e 0,2 a 0,4 m em dezembro de 2014, subdividindo a área irrigada em quatro repetições representativas das condições edáficas de cada local.

Foram coletadas 48 amostras de solo com estrutura não preservada (3 camadas x 4 repetições x 4 áreas agrícolas) com o auxílio de pá de corte, sendo acondicionadas em sacos plásticos e transportadas até o Laboratório de Física do Solo da Embrapa Clima Temperado, onde foram espalhadas em bandejas e secas à sombra até atingirem o conteúdo de água correspondente ao ponto de friabilidade.

Cada amostra com estrutura não preservada foi dividida em duas partes iguais, sendo uma parte passada em peneira de malha 2 mm para a determinação da argila dispersa em água (ADA) e granulometria pelo método da pipeta, conforme Embrapa (2011) e a outra foi destorroada manualmente em seus pontos de fraqueza e peneirada em malha de 9,52 mm para a determinação do percentual de agregados estáveis em água (AEA) e do diâmetro médio ponderado dos agregados (DMP) conforme método de Kemper & Rosenau (1986), modificado por Palmeira et al. (1999), com a utilização do aparelho de oscilação vertical de Yoder (1936).

As amostras de solo com estrutura preservada foram coletadas mediante cilindros de aproximadamente 0,05 m de diâmetro e 0,05 m de altura, totalizando 48 amostras (3 camadas x 4 repetições x 4 áreas agrícolas), as quais foram utilizadas para quantificar a densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), microporosidade (Mi), macroporosidade (Ma) e relação micro/macroporos (Mi/Ma). A Ds foi definida pelo método do anel volumétrico (Embrapa, 2011). Para a determinação da Pt, Mi e Ma foi utilizado o método da mesa de tensão a 6 kPa para separar a Mi e Ma.

Para a determinação da curva de retenção de água no solo (CRAS) os cilindros foram saturados por capilaridade e equilibrados nas tensões de 1 e 6 kPa em mesa de tensão; 10; 100 e 300 kPa em câmara de pressão de Richards com placa porosa (Klute, 1986) por meio do processo de secagem. Ademais, utilizou-se um psicrômetro (WP4c, Decagon Devices) em amostras com estrutura não preservada, a fim de obter tensões maiores do que 300 kPa por meio do processo de umedecimento.

Os dados experimentais de tensão de água *versus* conteúdo de água volumétrico das amostras de solo foram ajustados conforme o modelo de van Genuchten (1980) utilizando o software Mathcad 2000 (Mathsoft, 1998).

Após a obtenção dos dados ajustados dos parâmetros empíricos do modelo, a capacidade de campo (θ_{cc}) foi considerada como o valor estimado do conteúdo volumétrico de água retido na tensão de 10 kPa, enquanto o ponto de murcha permanente (θ_{pmp}) foi definido como o valor estimado do conteúdo volumétrico de água retido na tensão de 1.500 kPa. A AD foi calculada por meio da expressão:

$$AD = (\theta_{cc} - \theta_{pmp})$$

onde AD é a água disponível às plantas ($m^3 m^{-3}$), θ_{cc} é o conteúdo volumétrico de água na capacidade de campo ($m^3 m^{-3}$) e θ_{pmp} é o conteúdo volumétrico de água no ponto de murcha permanente ($m^3 m^{-3}$).

Os dados foram submetidos à estatística descritiva, sendo calculados a média, desvio-padrão, valores mínimo e máximo, coeficiente de variação, curtose e assimetria. Além disso, por meio dos coeficientes de correlação de Pearson foram analisadas as correlações entre os atributos avaliados. Utilizou-se o programa Winstat 2.0 (Machado & Conceição, 2003) em tais procedimentos.

Resultados e Discussão

Considerando a classificação do coeficiente de variação (CV) em baixo (< 15%), moderado (15% < CV < 35%) e alto (> 35%) (Wilding & Drees, 1983), observou-se que somente a Ds, Pt, Mi e θ_{cc} tiveram CV baixo (Tabela 2), concordando com Andreotti et al. (2010) que encontraram baixo CV para a Ds, Pt e Mi em um Latossolo. Por outro lado, os demais atributos tiveram CV alto ou moderado, o que ocorreu em função da heterogeneidade de atributos intrínsecos do solo, como a textura, e dos distintos modos de cultivo empregados ao longo do tempo nas quatro áreas agrícolas estudadas.

A Ds variou de 1,25 a 1,45 $Mg m^{-3}$ nas camadas avaliadas (Tabela 3). Em função da estreita relação existente entre

Tabela 2. Estatística descritiva dos atributos físicos de áreas agrícolas produtoras de soja em Chernossolos da bacia hidrográfica do Rio Santa Maria, RS.

Atributos ¹	Méd ²	Dp ³	Mín ⁴	Máx ⁵	CV ⁶	Ass ⁷	Curt ⁸
ADA (%)	14,25	7,85	2,58	37,70	55,13	0,80	0,48
Argila (%)	26,58	8,57	14,09	54,73	32,24	1,12	1,48
Silte (%)	50,48	10,13	27,94	65,23	20,07	-0,62	-0,47
Areia (%)	22,95	6,92	10,05	45,88	30,17	1,10	1,64
Ds ($Mg m^{-3}$)	1,36	0,10	1,02	1,54	7,65	-1,03	2,2
Pt (%)	43,44	4,43	36,52	58,27	10,19	1,13	2,25
Ma (%)	6,32	2,52	3,12	12,47	39,96	0,81	-0,31
Mi (%)	37,12	3,43	30,97	45,79	9,23	0,61	0,18
C1 (%)	35,73	19,09	1,75	70,64	53,44	0,07	-0,99
C2 (%)	14,76	6,21	1,22	33,52	42,07	0,81	1,34
C3 (%)	10,59	6,50	1,08	34,26	61,39	1,68	2,4
C4 (%)	10,22	5,35	0,71	22,47	52,35	0,64	-0,09
C5 (%)	7,69	4,71	0,67	18,63	61,27	0,53	-0,53
C6 (%)	21,02	12,46	4,76	56,67	59,30	0,88	0,06
DMP (mm)	3,34	1,27	0,59	5,40	38,16	-0,07	-0,98
θ_{cc} ($m^3 m^{-3}$)	0,386	0,039	0,329	0,502	10,01	0,89	0,90
θ_{pmp} ($m^3 m^{-3}$)	0,178	0,038	0,114	0,255	21,36	0,62	-0,37
AD ($m^3 m^{-3}$)	0,209	0,034	0,141	0,287	16,38	0,37	-0,52

¹ADA: Argila dispersa em água; Ds: Densidade do solo; Pt: Porosidade total; Ma: Macroporosidade; Mi: Microporosidade; C1: classe de agregados entre 9,52-4,76 mm; C2: classe de agregados entre 4,76-2,00 mm; C3: classe de agregados entre 2,00-1,00 mm; C4: classe de agregados entre 1,00-0,50 mm; C5: classe de agregados entre 0,50-0,25 mm; C6: classe de agregados <0,25 mm; DMP: Diâmetro médio ponderado de agregados; θ_{cc} : Conteúdo de água volumétrico na capacidade de campo; θ_{pmp} : Conteúdo de água volumétrico no ponto de murcha permanente; AD: Água disponível às plantas; ²Média; ³Desvio padrão; ⁴Valor mínimo; ⁵Valor máximo; ⁶Coefficiente de variação; ⁷Assimetria; ⁸Curtose.

Tabela 3. Média e desvio padrão de atributos físico-hídricos de áreas agrícolas produtoras de soja em Chernossolos da bacia hidrográfica do Rio Santa Maria, RS, avaliados em diferentes camadas do solo.

AA	Ds ¹ (Mg m ⁻³)	Pt ²	Mi ³ (%)	Ma ⁴	Mi/Ma ⁵	θ_{cc} ⁶	θ_{PMP} ⁷ (m ³ m ⁻³)	AD ⁸	DMP ⁹ (mm)
Camada de 0,0 a 0,1 m									
P1	1,39 ± 0,07	42,52 ± 4,04	38,13 ± 3,59	4,39 ± 0,83	9:1	0,390 ± 0,036	0,134 ± 0,009	0,256 ± 0,027	3,14 ± 0,65
P2	1,31 ± 0,12	45,41 ± 4,63	38,14 ± 4,26	7,28 ± 3,39	5:1	0,398 ± 0,041	0,161 ± 0,010	0,237 ± 0,037	4,13 ± 0,98
P3	1,38 ± 0,08	43,37 ± 2,41	37,10 ± 2,33	6,27 ± 1,19	6:1	0,384 ± 0,024	0,187 ± 0,008	0,196 ± 0,017	4,57 ± 0,54
P4	1,31 ± 0,09	45,52 ± 4,27	36,30 ± 2,72	9,21 ± 1,96	4:1	0,399 ± 0,036	0,169 ± 0,011	0,230 ± 0,027	4,32 ± 1,10
Camada de 0,1 a 0,2 m									
P1	1,41 ± 0,07	39,50 ± 2,30	35,39 ± 2,14	4,11 ± 0,77	9:1	0,357 ± 0,023	0,129 ± 0,010	0,229 ± 0,022	1,95 ± 0,57
P2	1,39 ± 0,06	40,84 ± 1,18	35,83 ± 2,15	5,00 ± 1,21	7:1	0,367 ± 0,017	0,143 ± 0,006	0,224 ± 0,011	3,21 ± 1,35
P3	1,40 ± 0,04	40,82 ± 1,28	33,82 ± 2,74	7,00 ± 2,77	5:1	0,354 ± 0,021	0,173 ± 0,012	0,181 ± 0,010	3,11 ± 0,82
P4	1,30 ± 0,19	45,64 ± 7,97	37,96 ± 5,19	7,68 ± 3,17	5:1	0,404 ± 0,063	0,209 ± 0,027	0,195 ± 0,046	3,42 ± 1,43
Camada de 0,2 a 0,4 m									
P1	1,45 ± 0,08	40,35 ± 1,70	35,36 ± 0,86	4,99 ± 1,88	7:1	0,355 ± 0,014	0,159 ± 0,009	0,196 ± 0,006	2,49 ± 1,97
P2	1,37 ± 0,10	43,74 ± 3,15	37,88 ± 1,92	5,86 ± 2,39	6:1	0,390 ± 0,020	0,191 ± 0,014	0,199 ± 0,020	3,58 ± 1,41
P3	1,30 ± 0,05	44,75 ± 1,43	38,57 ± 2,68	6,18 ± 2,26	6:1	0,401 ± 0,020	0,238 ± 0,022	0,163 ± 0,015	3,55 ± 1,51
P4	1,25 ± 0,13	48,77 ± 6,94	40,93 ± 5,71	7,84 ± 3,64	5:1	0,436 ± 0,060	0,238 ± 0,027	0,199 ± 0,038	2,60 ± 0,93

¹Densidade do solo; ²Porosidade total; ³Microporosidade; ⁴Macroporosidade; ⁵Relação Micro/Macroporos; ⁶Umidade volumétrica na capacidade de campo; ⁷Umidade volumétrica no ponto de murcha permanente; ⁸Água Disponível às plantas; ⁹Diâmetro médio ponderado de agregados.

Ds e a textura do solo, Reichert et al. (2003) estabeleceram valores de Ds críticos em função da classe textural do solo, sendo 1,56 Mg m⁻³ para Franco Siltoso; 1,3 a 1,4 Mg m⁻³ para Argila e 1,4 a 1,5 Mg m⁻³ para Franco Argiloso. Desta forma, os valores de Ds das áreas agrícolas avaliadas não foram considerados como restritivos ao pleno desenvolvimento das plantas. Na área P1 foram obtidos os valores de Ds mais próximos aos considerados limitantes, pois além de terem o menor conteúdo de argila no solo, mesmo que enquadrada na mesma classe textural das demais áreas agrícolas em cada camada, nessa área se utilizava o preparo convencional do solo (PC), fator preponderante para a alteração da estrutura do solo com o tempo, incrementando a Ds.

Na camada superficial de um Vertissolo com 32, 8 e 60% de argila, areia e silte, respectivamente, Wilson et al. (2013) identificaram a densidade de 1,37 Mg m⁻³ como crítica por meio da determinação do Intervalo Hídrico Ótimo (IHO), sendo a porosidade livre de água e resistência mecânica à penetração os limites superior e inferior, respectivamente. Entretanto, os autores relataram que valores de Ds maiores do que o crítico, obtido com IHO, não restringiram o desenvolvimento de plantas de trigo em avaliação aos dois meses após semeadura, evidenciando que é necessário considerar fatores relativos ao solo, como a presença de argilas expansivas, e relativos às plantas, como as peculiaridades de cada cultura, ao interpretar valores críticos de atributos físicos do solo obtidos através de relações empíricas.

A Pt é considerada ideal quando for equivalente a 50% do volume total do solo, sendo 25 a 33% composta de microporos e 25 a 17% de macroporos (Lima et al., 2007), preservando relação Mi/Ma entre 1:1 e 2:1, respectivamente, pois assim haveria adequado armazenamento de água e aeração das raízes. Portanto, em todas as áreas agrícolas estudadas foram observadas a existência de sistema poroso com volume considerado restritivo ao pleno crescimento e

desenvolvimento de culturas de sequeiro, principalmente devido aos baixos valores de Ma e elevada relação Mi/Ma (Tabela 3).

Considerando a Pt e a Mi, foram obtidos valores médios de 40 a 49% e 34 a 41%, respectivamente. Estes resultados estão de acordo com o relatado por Parfitt et al. (2009), que indicaram baixa Pt, com predomínio de microporos em solos de terras baixas, o que os torna mal drenados e com baixa velocidade de infiltração de água, manifestando condições físicas limitantes ao cultivo de culturas de sequeiro.

Os macroporos são responsáveis, essencialmente, pela drenagem do excedente hídrico e pela difusão de oxigênio no solo, auxiliando diretamente no processo respiratório das raízes das plantas. Deste modo, foram sugeridos valores mínimos de Ma, sendo 10% (Reichert et al., 2009; Ferreira, 2010) e 17% (Lima et al., 2007). Entretanto, os dados observados nas quatro áreas agrícolas não alcançaram estes valores, com médias entre 4 e 9%, demonstrando novamente condições restritivas para a aeração, infiltração e drenagem de água no solo (Tabela 3).

Para confirmar esses resultados, os mesmos foram comparados com os de Ghilberto et al. (2015) que avaliaram Chernossolos de 18 locais na Argentina, amostrando 30 horizontes A (n = 30) e 30 horizontes B (n = 30), e identificaram limitações quanto à infiltração do excesso de água e proliferação das raízes na maioria dos casos devido ao baixo volume de macroporos (poros com diâmetro maior do que 0,3 mm foram considerados como macroporos nesse estudo) em função da predominância de frações granulométricas finas (argila ou silte) em detrimento de areia e da presença de poros obstruídos. Isso caracteriza as condições típicas encontradas nesses solos e que são restritivas ao pleno desenvolvimento de culturas de sequeiro.

Considerando a distribuição de agregados estáveis em água em diferentes classes de tamanho, na camada de 0,0 a 0,1 m se verificou a predominância de macroagregados em

todas as áreas avaliadas, essencialmente daqueles de maior tamanho (C1) (Figura 1). Este procedimento foi repetido para as camadas subjacentes, exceto na P1 onde houve tendência de maior acúmulo de agregados na classe de menor tamanho (C6). Estes resultados indicam que os tipos de cultivo que preconizam a ausência ou diminuição da mobilização do solo favorecem a formação de macroagregados estáveis em água, que são indicadores de uma estrutura de solo mais favorável à cultura da soja.

A fragmentação de agregados através de operações mecânicas proporcionadas por máquinas e implementos

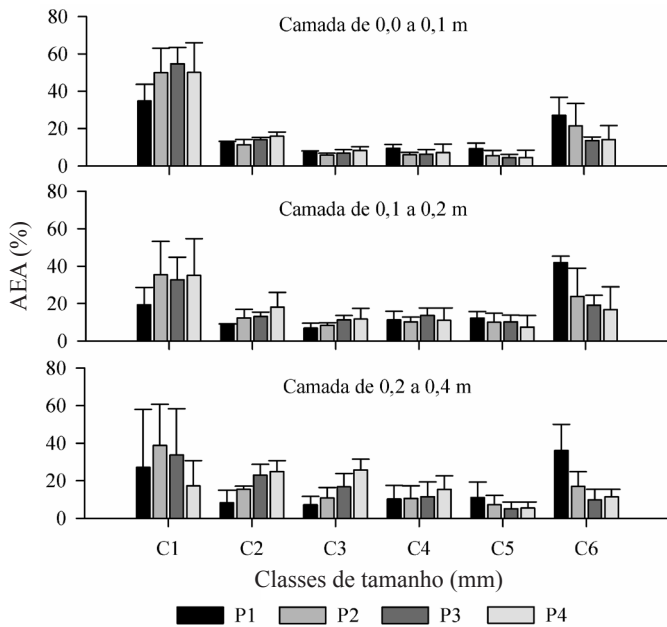


Figura 1. Agregados Estáveis em Água (AEA) distribuídos em diferentes classes de tamanho (mm) de áreas agrícolas produtoras de soja na bacia hidrográfica do Rio Santa Maria, RS, em diferentes camadas de solo. C1: classe de agregados entre 9,52-4,76 mm; C2: classe de agregados entre 4,76-2,00 mm; C3: classe de agregados entre 2,00-1,00 mm; C4: classe de agregados entre 1,00-0,50 mm; C5: classe de agregados entre 0,50-0,25 mm; C6: classe de agregados <0,25 mm.

agrícolas, exposição e aceleração da decomposição da matéria orgânica que ocorrem em PC, comparados à manutenção dos resíduos orgânicos em superfície e preservação da estrutura de solos sob plantio direto, resultam na menor agregação observada em solos manejados com PC (Rosa et al., 2011).

Em conformidade com os resultados obtidos de agregados estáveis em água (AEA), na camada superficial (0,0 a 0,1 m) ocorreu a formação de agregados maiores, que diminuíram de tamanho em profundidade, enquanto a área P1 teve os menores valores médios de DMP em todas as camadas avaliadas (Tabela 3). Apesar de não determinada neste estudo, supõe-se que estes resultados possam ser explicados pelo acúmulo e ação da matéria orgânica na formação e estabilização de agregados (Hati et al., 2015), que é favorecida em tipos de manejo que proporcionam menor mobilização do solo e balanço positivo quanto à manutenção de resíduos culturais na superfície do solo (cobertura morta), como é o caso do PD.

Na camada 0,0 a 0,1 m foi observado conteúdo de água similar entre as áreas avaliadas nas tensões próximas à capacidade de campo, apesar de a P1 possuir textura mais grosseira e ser conduzida com preparo convencional, fato observável pela similaridade de formato e proximidade das curvas de retenção de água das áreas em estudo (Figura 2). Isto pode ser atribuído a um efeito compensatório ocorrido em P2, P3 e P4 proveniente das maiores adições de matéria orgânica em superfície, pois manejadas com PD, se favorece a agregação e a formação de macroporos em detrimento dos microporos (responsáveis pela retenção de água). Porém, nas camadas de 0,1 a 0,2 e 0,2 a 0,4 m, onde o efeito da matéria orgânica é menor, as áreas com maior conteúdo de argila ($P1 < P2 < P3 < P4$) e menor de silte ($P1 > P2 > P3 > P4$) retiveram mais água em tensões menores.

Com o aumento da tensão da água no solo, ou seja, próxima ao ponto de murcha permanente, as áreas com textura mais grosseira retiveram menos água do que aquelas com maior conteúdo de argila em todas as camadas avaliadas, seguindo a seguinte ordem: $P1 < P2 < P3 < P4$.

Como atributos derivados da CRAS, a θ_{cc} e a θ_{PMP} refletem estas implicações, assim sendo, na camada de 0,0 a 0,1 m

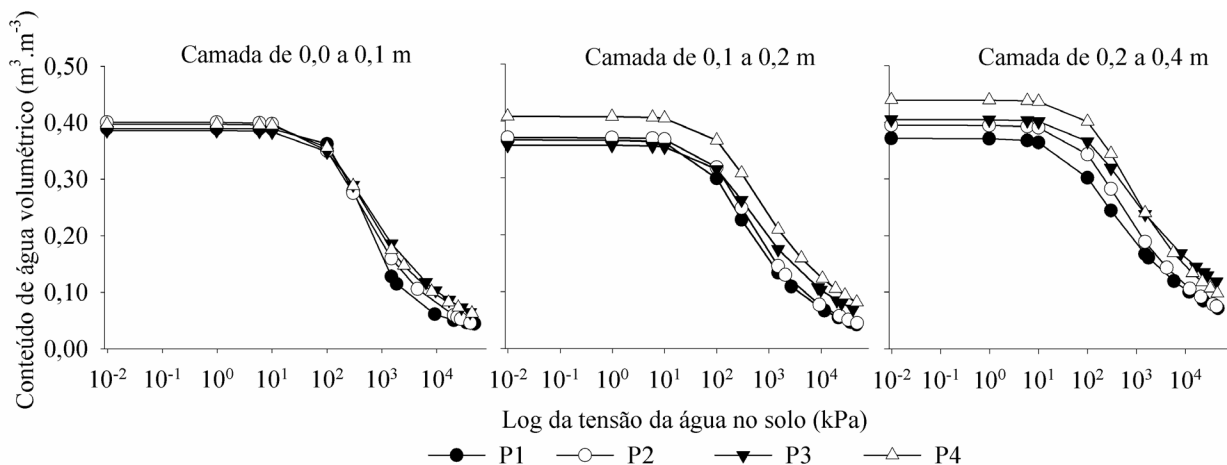


Figura 2. Curvas de retenção de água no solo em áreas agrícolas produtoras de soja em Chernossolos da bacia hidrográfica do Rio Santa Maria, RS, em diferentes camadas do solo.

identificou-se valores de θ_{cc} semelhantes entre as áreas avaliadas. Em relação à θ_{pmp} , os valores foram maiores nas áreas com maior conteúdo de argila. Nas demais camadas (0,1 a 0,2 m e 0,2 a 0,4 m), tanto a θ_{cc} quanto a θ_{pmp} foram maiores quanto maior o teor de argila e menor o teor de silte dos solos avaliados.

Deste modo, na camada de 0,0 a 0,1 m, as diferenças de AD entre as áreas agrícolas avaliadas ocorreram em resposta às oscilações na θ_{pmp} , sendo $P1 < P2 < P3$ e $P4$. Entretanto, a maioria das culturas sofre com estresse hídrico muito antes do solo atingir a θ_{pmp} . Ressalta-se que P1, P2, P3 e P4 tiveram valores de θ_{cc} semelhantes, apesar de a P1 ter textura mais grosseira, contrariando a lógica encontrada nas camadas subjacentes. Isto provavelmente se deve à transição de Mi para Ma devido ao menor revolvimento e às adições superficiais de matéria orgânica promovidas em solos sob PD e pelo aumento da Mi em áreas sob PC mediante desestruturação e compactação do solo causada pelo revolvimento e tráfego de máquinas mais intenso, respectivamente.

Na camada de 0,1 a 0,2 m, a AD seguiu a tendência $P1 > P2 > P3$ e $P4$ e na camada de 0,2 a 0,4 m a AD foi similar em todas áreas agrícolas. Estes resultados foram consequência, provavelmente, da influência da argila, que, ao aumentar, gerou da mesma forma maiores valores de θ_{cc} e θ_{pmp} , atenuando as diferenças entre AD conforme a classe textural de cada área agrícola e sugerindo que, nestas camadas, a classe textural desses solos é mais determinante para a disponibilidade hídrica do que os tipos de cultivo utilizados.

Ghilberto et al. (2015) sugeriram valores de Pt, θ_{cc} e θ_{pmp} de 0,514; 0,361 e 0,136 $m^3 \cdot m^{-3}$ a partir de uma curva de retenção de água no solo de referência obtida da seleção de 5 horizontes de Chernossolos de um total de 60 (horizontes A (n=30) e B (n=30)), considerados com melhor qualidade estrutural e baseando-se em um índice de qualidade do solo calculado com valores da avaliação de diversos atributos físicos do solo, conforme Reynolds et al. (2009).

Os valores de Pt obtidos nesse estudo foram menores do que os encontrados por Ghilberto et al. (2015), enquanto que para a θ_{cc} e a θ_{pmp} , em geral, foram maiores. Isso indica restrições quanto a qualidade física devido à pequena proporção de poros ocupados por ar na θ_{cc} e pela retenção de água em elevadas tensões mesmo quando em quantidades relevantes, apesar dos valores de AD poderem ser considerados ideais ($0,20 m^3 m^{-3} < AD$) ou adequados ($0,15 < AD < 0,20 m^3 m^{-3}$) (Reynolds et al., 2009).

Um impacto direto, prático e relevante gerado pelos atributos físico-hídricos do solo induzidos pelos tipos de cultivo é a recomendação de irrigação para estas áreas, a qual pode demonstrar diferenças que não são percebidas ao avaliar os atributos físico-hídricos usuais e, tratando-se de áreas irrigadas, é mais importante a quantidade e frequência de reposição da água do que a quantidade que permanece disponível.

Como exemplo, se for considerada a necessidade de irrigação quando a solução do solo estiver submetida à tensão de 60 kPa, a camada 0,0 a 0,4 m e a eficiência de aplicação de água do pivô central igual a 75%, seria necessário fornecer 18, 15, 12 e 12 mm de água para P1, P2, P3 e P4, respectivamente. Deste modo, o PC adotado na P1 resultou em recomendação de lâmina de irrigação 20, 50 e 50% maior do que nas áreas P2, P3 e P4, que eram manejadas com PD sem considerar os efeitos da cobertura do solo na redução do escoamento superficial e da evaporação no início do ciclo das culturas.

Os teores de argila e silte tiveram correlação com diversas características referentes à porosidade, retenção e disponibilidade de água (Tabela 4). O teor de argila correlacionou-se positivamente com a Pt, Mi, θ_{cc} e θ_{pmp} e negativamente com a Ds e AD, enquanto o silte demonstrou efeito contrário. Estes resultados reafirmam que nos Chernossolos, a Pt é composta principalmente por

Tabela 4. Coeficiente de correlação de Pearson entre os atributos avaliados em áreas agrícolas produtoras de soja em Chernossolos da bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria, RS.

Atributos ¹	Argila	Silte	Areia	Ds	Pt	Ma	Mi	C1	C2	C3	C4	C5	C6	DMP	θ_{cc}	θ_{pmp}	AD
ADA	0,87**	-0,70**	-0,06 ^{ns}	-0,25 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,02 ^{ns}	0,33*	0,13 ^{ns}	0,57**	0,46**	0,00 ^{ns}	-0,42**	-0,56**	0,25 ^{ns}	0,36*	0,72**	-0,39**
Argila		-0,74**	-0,16 ^{ns}	-0,47**	0,43**	0,16 ^{ns}	0,44**	0,13 ^{ns}	0,60**	0,50**	0,00 ^{ns}	-0,44**	-0,60**	0,27 ^{ns}	0,46**	0,78**	-0,34*
Silte			-0,55**	0,41**	-0,48**	-0,35*	-0,36*	-0,04 ^{ns}	-0,75**	-0,67**	-0,07 ^{ns}	0,46**	0,63**	-0,20 ^{ns}	-0,48**	-0,80**	0,35*
Areia				-0,01 ^{ns}	0,17 ^{ns}	0,32*	-0,02 ^{ns}	-0,11 ^{ns}	0,35*	0,35*	0,10 ^{ns}	-0,13 ^{ns}	-0,18 ^{ns}	-0,03 ^{ns}	0,13 ^{ns}	0,21 ^{ns}	-0,09 ^{ns}
Ds					-0,91**	-0,58**	-0,74**	0,14 ^{ns}	-0,50**	-0,55**	-0,18 ^{ns}	0,18 ^{ns}	0,33*	0,03 ^{ns}	-0,83**	-0,48**	-0,41**
Pt						0,64**	0,82**	-0,10 ^{ns}	0,48**	0,54**	0,14 ^{ns}	-0,21 ^{ns}	-0,35*	0,01 ^{ns}	0,93**	0,56**	0,43**
Ma							0,09 ^{ns}	-0,14 ^{ns}	0,15 ^{ns}	0,31*	0,22 ^{ns}	0,01 ^{ns}	-0,13 ^{ns}	-0,09 ^{ns}	0,36*	0,27 ^{ns}	0,11 ^{ns}
Mi								-0,03 ^{ns}	0,51**	0,47**	0,02 ^{ns}	-0,27 ^{ns}	-0,36*	0,08 ^{ns}	0,94**	0,53**	0,47**
C1									-0,03 ^{ns}	-0,54**	-0,87**	-0,80**	-0,56**	0,98**	0,00 ^{ns}	0,03 ^{ns}	-0,04 ^{ns}
C2										0,74**	0,11 ^{ns}	-0,45**	-0,71**	0,17 ^{ns}	0,56**	0,70**	-0,15 ^{ns}
C3											0,64**	0,01 ^{ns}	-0,34*	-0,36*	0,53**	0,64**	-0,11 ^{ns}
C4												0,72**	0,25 ^{ns}	-0,82**	0,05 ^{ns}	0,10 ^{ns}	-0,06 ^{ns}
C5													0,75**	-0,88**	-0,33*	-0,41**	0,09 ^{ns}
C6														-0,71**	-0,45**	-0,62**	0,19 ^{ns}
DMP															0,12 ^{ns}	0,19 ^{ns}	-0,08 ^{ns}
θ_{cc}																0,60**	0,46**
θ_{pmp}																	-0,43**

¹ADA: argila dispersa em água; Ds: densidade do solo; Pt: porosidade total; Ma: macroporosidade; Mi: microporosidade; C1: classe de agregados estáveis em água entre 9,52-4,76 mm; C2: classe de agregados estáveis em água entre 4,76-2,00 mm; C3: classe de agregados estáveis em água entre 2,00-1,00 mm; C4: classe de agregados estáveis em água entre 1,00-0,50 mm; C5: classe de agregados estáveis em água entre 0,50-0,25 mm; C6: classe de agregados estáveis em água <0,25 mm; DMP: diâmetro médio ponderado de agregados; θ_{cc} : conteúdo de água volumétrico na capacidade de campo; θ_{pmp} : conteúdo de água volumétrico no ponto de murcha permanente; AD: Água disponível às plantas. ^{ns}: não significativo na $p < 0,05$; *: significativo na $p < 0,05$; **: significativo na $p < 0,01$.

microporos que retêm água em elevadas tensões (tensões > 1.500 kPa) e, com o aumento da argila, a quantidade de água indisponível é conseqüentemente maior. Por outro lado, áreas com maior teor de silte tiveram maior disponibilidade de água, resultante de menores valores de θ_{PMP} . A θ_{PMP} correlacionou-se negativamente com o silte e positivamente com a areia, concordando com Ghilberto et al. (2015) que apontaram o baixo teor de areia como um dos responsáveis pela baixa macroporosidade nos Chernossolos.

As classes de agregados C2, C3, C5 e C6 tiveram correlação com a argila, silte e areia, sendo positiva entre C2 e C3 com argila e areia e entre C5 e C6 com o silte, ao mesmo tempo que foi negativa entre C2 e C3 e silte e entre C5 e C6 com argila.

Portanto, pode-se ponderar que, apesar do uso atual do solo das áreas agrícolas avaliadas nesse estudo estar estreitamente vinculado ao cultivo de soja, foram identificadas condições físicas restritivas a esses cultivos nos Chernossolos da bacia hidrográfica do Rio Santa Maria, RS, sendo estas mais ou menos intensas em função do tipo de cultivo do solo em cada área agrícola, porém não solucionadas definitivamente com a adoção tanto de manejo com PC como de PD. Dessa forma, as condições físico-hídricas impõem riscos significativos de perda de rendimento de grãos em anos de excedente hídrico durante o ciclo produtivo.

Conclusão

As áreas avaliadas não têm condições físicas adequadas para o pleno desenvolvimento da soja devido à drenagem e à aeração deficientes dos Chernossolos manejados tanto sob preparo convencional quanto sob plantio direto em função, principalmente, de valores de macroporosidade abaixo dos limites críticos estabelecidos na literatura.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Associação dos Usuários da Água da Bacia do Rio Santa Maria (AUSM) e produtores que gentilmente disponibilizaram suas áreas agrícolas para o presente estudo. Os autores agradecem também à Embrapa Clima Temperado (CPACT), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Rio Grande do Sul (FAPERGS), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Universidade Federal de Pelotas (UFPel) pelo auxílio financeiro, suporte técnico e profissional.

Literatura Citada

Agência Nacional de Águas - ANA. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil. Brasília: ANA, 2013. 432p. http://arquivos.ana.gov.br/institucional/spr/conjuntura/ANA_Conjuntura_Recurso_Hidricos_Brasil/ANA_Conjuntura_Recurso_Hidricos_Brasil_2013_Final.pdf. 20 mar. 2016.

- Andreotti, M.; Carvalho, M.D.P.; Montanari, R.; Basso, F.C.; Pariz, C.M.; Azenha, M. V.; Vercese, F. Produtividade da soja correlacionada com a porosidade e a densidade de um Latossolo Vermelho do cerrado brasileiro. *Ciência Rural*, v.40, n.3, p.520-526, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782010005000032>.
- Cabrera, L.D.C.; Costa, F.P.; Primel, E.G. Estimativa de risco de contaminação das águas por pesticidas na região sul do estado do RS. *Química Nova*, v.31, n.8, p.1.982-1.986, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422008000800012>.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. Manual de métodos de análise de solos. 2ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 2011. 212p.
- Ferreira, M.M. Caracterização física do solo. In: Lier, Q.J. van (Ed.). Física do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. p.1-27.
- Ghilberto, P.J.; Imhoff, S.; Libardi, P.L.; Silva, A.P. da; Tormena, C.A.; Pilatti, M.A. Soil physical quality of Mollisols quantified by a global index. *Scientia Agricola*, v.72, n.2, p.67-174, 2015. <https://doi.org/10.1590/0103-9016-2013-0414>.
- Hati, K.M.; Chaudhary, R.S.; Mandal, K.G.; Bandyopadhyay, K.K.; Singh, R.K.; Sinha, N.K.; Saha, R. Effects of tillage, residue and fertilizer nitrogen on crop yields, and soil physical properties under soybean-wheat rotation in Vertisols of Central India. *Agricultural Research*, v.4, n.1, p.48-56, 2015. <https://doi.org/10.1007/s40003-014-0141-7>.
- Kemper, W.D.; Rosenau, R.C. Aggregate stability and size distribution. In: Klute, A. (Ed.). *Methods of soil analysis*. 2ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p.425-440.
- Klute, A. Water retention: Laboratory methods. In: Klute, A. (Ed.). *Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods*. 2ed. Madison: American Society Agronomy, 1986. p.635-660.
- Lima, C.G.R.; Carvalho, M.P.; Mello, L.M.M.; Lima, R.C. Correlação linear e espacial entre a produtividade de forragem, a porosidade total e densidade do solo de Pereira Barreto (SP). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.31, n.6, p.1.233-1.244, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000600002>.
- Machado, A.A.; Conceição, A.R. Sistema de análise estatística para Windows. Winstat, versão 2.0. Pelotas: Universidade Federal de Pelotas, 2003. 42p.
- Mathsoft. Mathcad 8 Professional Academic. Cambridge: Mathsoft, 1998. <http://www.mathsoft.com>. 10 Mai. 2015.
- Palmeira, P.R.T.; Pauletto, E.A.; Teixeira, C.F.A.; Gomes, A.D.S.; Silva, J.D. Agregação de um Planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.23, n.2, p.189-195, 1999. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180218287002>. 21 Abr. 2016.
- Parfitt, J.M.B.; Timm, L.C.; Pauletto, E.A.; Sousa, R.O.D.; Castilhos, D.D.; Ávila, C.L.D.; Reckziegel, N.L. Spatial variability of the chemical, physical and biological properties in lowland cultivated with irrigated rice. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.33, n.4, p.819-830, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000400007>.
- Reichert, J.M.; Reinert, D.J.; Braida, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. *Ciência & Ambiente*, v.27, p.29-48, 2003. http://www.fisicadosolo.ccr.ufsm.whoos.com.br/downloads/Producao_Artigos/5.pdf. 21 Abr. 2016.

- Reichert, J.M.; Suzuki, L.E.A.S.; Reinert, D.J.; Horn, R.; Håkansson, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil & Tillage Research*, v.102, n.2, p.242-254, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.07.002>.
- Reynolds, W.D.; Drury, C.F.; Tan, C.S.; Fox, C.A.; Yang, X.M. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma*, v.152, n.3-4, p.252-263, 2009. <https://doi.org/doi:10.1016/j.geoderma.2009.06.009>.
- Rosa, C.M.; Castilhos, R.M.V.; Pauletto, E.A.; Pillon, C.N.; Leal, O.A. Conteúdo de carbono orgânico em Planossolo Háplico sob sistemas de manejo do arroz irrigado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.35, n.5, p.1.769-1.776, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000500031>.
- Secretaria do Ambiente e Desenvolvimento Sustentável – SEMA. U070 - Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria. Porto Alegre: SEMA, 2010. <http://www.sema.rs.gov.br/u070-bacia-hidrografica-do-rio-santa-maria>. 20 Mar. 2016.
- Streck, E.V.; Kämpf, N.; Dalmolin, R.S.D.; Klamt, E.; Nascimento, P.D.; Schneider, P.; Giasson, E.; Pinto, L.F.S. Solos do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: UFRGS, 2008. 222p.
- van Genuchten, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, v.44, n.5, p.892-898, 1980. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>.
- Verneti, F.J.; Gomes, A.S.; Schuch, L.O.B. Sucessão de culturas em solos de várzea implantadas nos sistemas plantio direto e convencional. *Revista Brasileira de Agrociência*, v.15, n.1-4, p.37-42, 2009. <https://www.periodicos.ufpel.edu.br/ojs2/index.php/CAST/article/view/1984/1805>. 21 Abr. 2016.
- Wilding, L.P.; Drees, L.R. Spatial variability and pedology. In: Wilding, L.P.; Smeck, N.E.; Hall, G.F. (Org.). *Pedogenesis and soil taxonomy: concepts and interactions*. New York: Elsevier, 1983. p.83-116.
- Wilson, M.G.; Sasal, M.G.; Caviglia, O.P. Critical bulk density for a Mollisol and a Vertisol using least limiting water range: Effect on early wheat growth. *Geoderma*, v.192, p.354-361, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.05.021>.
- Yoder, R.E. A direct method of aggregate analysis of soil and a study of the physical nature of erosion losses. *Journal American Society of Agronomy*, v.28, n.5, p.337-351, 1936. <https://doi.org/10.2134/agronj1936.00021962002800050001x>.