Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

O sistema radicular na estruturação do solo avaliada pela argila dispersa em água

Aline Martineli Batista

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestra em Ciências. Área de concentração: Solos e
Nutrição de Plantas

Piracicaba
2018

Aline Martineli Batista
Engenheira Agrônoma

O sistema radicular na estruturação do solo avaliada pela argila dispersa em água

Orientador:
Prof. Dr. **PAULO LEONEL LIBARDI**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestra em Ciências. Área de concentração: Solos e
Nutrição de Plantas

Piracicaba
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Batista, Aline Martineli

O sistema radicular na estruturação do solo avaliada pela argila dispersa em água / Aline Martineli Batista. - - Piracicaba, 2018.

67 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Turbidímetro 2. Agregação do solo 3. Rizosfera 4. Estabilidade de percolação I. Título

DEDICO

Ao Prof. Dr. Álvaro Pires da Silva (*in memoriam*),
pela idealização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pela sua presença diária e vital em minha vida.

Ao Prof. Dr. Álvaro Pires (*in memoriam*), pela ideia inicial deste trabalho e pela orientação durante o primeiro semestre do mestrado.

Ao Prof. Dr. Paulo Leonel Libardi, por ter aceitado a missão de me orientar após já ter concluído um semestre do mestrado e tê-la cumprido com formidável êxito, sempre acreditando em meu potencial e aceitando meus limites e por ver seus alunos não apenas como orientados, mas também como amigos.

À Prof.^a Dr.^a Neyde Fabíola Balarezo Giarolla, por todo apoio prestado desde a definição do estudo até sua conclusão.

Ao Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR) de Ponta Grossa - PR, em especial à Dra. Lutécia Beatriz Canalli, pela concessão da área de estudo.

À minha família, por sempre acreditar em minha capacidade de realizar meus sonhos, em especial à minha querida e amada mãe, Angela de Fátima, e ao meu irmão, Alisson Martineli, que fez algumas das imagens esquemáticas utilizadas neste trabalho.

Aos amigos que a ESALQ me proporcionou e àqueles que estiveram distantes fisicamente, porém próximos em energia. Em especial ao Cezar Rebouças, à Thaís Pessoa, à Regiane Kazmierczak, ao Fábio Prativiera e ao Márcio Nunes, que me ajudaram na realização deste trabalho.

Ao técnico do Laboratório de Física do Solo da ESALQ, Reginaldo Nogueira, vulgo Rossi, por todo auxílio prestado na condução deste trabalho, desde a coleta do solo até a realização das análises físicas.

Ao técnico do Laboratório de Análises Químicas da ESALQ, Luiz Silva, e às estagiárias Daniela e Carla, por todo apoio prestado durante parte deste trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas da ESALQ, por todo apoio técnico e financeiro à realização deste estudo.

Ao CNPq pela concessão da bolsa de mestrado.

Ao DEVATCOM (Divisão de Atendimento à Comunidade), pela residência na Vila Estudantil da Pós-Graduação da ESALQ durante esta fase e aos colegas e amigos que dividiram comigo esse espaço, especialmente ao Antonio Marcos e à Yasmin Florentino.

Enfim, a todos aqueles que contribuíram direta e indiretamente com a realização deste trabalho, meu muito obrigada!

“Não sejas muito justo; nem mais sábio do que é necessário, para que não venhas a ser estúpido.”

ECLESIASTES 7, 16.

SUMÁRIO

RESUMO.....	7
ABSTRACT.....	8
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS.....	11
1. INTRODUÇÃO	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1. Estrutura e agregação do solo	15
2.2. Agentes de formação, estabilização e alteração dos agregados do solo.....	16
2.3. Relação da argila dispersa em água com a estruturação do solo	17
2.4. Relação do sistema radicular com a estruturação do solo.....	18
2.5. Rizosfera versus solo	19
2.6. Propriedades da rizosfera	20
3. MATERIAL E MÉTODOS	23
3.1. Descrição da área experimental	23
3.2. Amostragem do solo	25
3.3. Preparo do solo e análises laboratoriais.....	27
3.3.1. Estabilidade estrutural	27
3.3.2. Análise granulométrica	32
3.3.3. Análises químicas	33
3.4. Análise estatística dos dados	34
4. RESULTADOS.....	35
5. DISCUSSÃO	43
6. CONCLUSÃO	53
REFERÊNCIAS.....	55
APÊNDICE.....	65

RESUMO

O sistema radicular na estruturação do solo avaliada pela argila dispersa em água

Tendo em vista o fato de que o sistema radicular das culturas modifica as propriedades do solo ao seu entorno e da praticamente ausência de trabalhos científicos para avaliação das diferenças estruturais entre solo e rizosfera, o objetivo deste estudo foi aprofundar o conhecimento destas diferenças, avaliando a agregação do solo junto às raízes e fora da sua influência, em diferentes rotações culturais. A amostragem foi realizada na camada superficial do solo (0,00 - 0,05 m) em cada sistema de rotação, considerando como rizosfera o solo aderido às raízes e como solo sem influência das raízes, aquele não aderido a elas. Para avaliar a estabilidade estrutural do solo, foram feitas as análises da argila prontamente dispersa em água, da argila mecanicamente dispersa em água e da estabilidade de percolação. As análises granulométrica e química também foram realizadas. Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e, quando significativo, ao teste de médias Tukey ($p \leq 0,05$). Posteriormente, foram feitas correlações entre os atributos físicos utilizados como indicadores da estabilidade dos agregados e os demais atributos avaliados. A rizosfera apresentou agregados mais estáveis em água do que o solo fora dela, sendo a argila mecanicamente dispersa em água o indicador mais sensível na detecção desse resultado. Foi evidenciado que o sistema radicular de diferentes culturas influenciaram de forma diferente a agregação das partículas do solo. As correlações mais significativas foram para a argila mecanicamente dispersa em água.

Palavras-chave: Turbidímetro; Agregação do solo; Rizosfera; Estabilidade de percolação

ABSTRACT

The root system in soil structuring evaluated by the clay dispersed in water

Considering the fact that the crops root system modifies the soil properties around it and in the almost absence of scientific works to evaluate the structural differences between soil and rhizosphere, the objective of this study was to increase the knowledge of these differences by evaluating soil aggregation close to the root and out of its influence, at different crop rotations. Sampling was performed in the soil surface layer (0.00 - 0.05 m) in each rotation system, considering as rhizosphere the soil adhered to the roots and as soil without influence of the roots, that not adhered to them. To evaluate the structural stability of the soil, analyzes of clay readily and mechanically dispersed in water and of the percolation stability were made. The granulometric and chemical analyzes were also made. Data obtained were analysed by the analysis of variance and, when significant, by Tukey test ($p \leq 0.05$). Then, the correlations were made between the physical attributes used as indicators of the aggregates stability and the other attributes evaluated. Rhizosphere presented more stable aggregates in water than the soil outside it, being the mechanically clay dispersed in water the most sensitive indicator in the detection of this outcome. It was evidenced that the root system of different crops influenced of different way the soil particles aggregation. The more significant correlations were those for clay mechanically dispersed in water.

Keywords: Turbidimeter; Soil aggregation; Rhizosphere; Percolation stability

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Área do experimento na Estação Experimental do IAPAR, em Ponta Grossa - PR....	23
Figura 2 - Croqui da área experimental.....	25
Figura 3 - Coleta da rizosfera (à esquerda) e remoção dos agregados rizosféricos (à direita).	26
Figura 4 - Coleta do solo.....	26
Figura 5 - Desenho esquemático da coleta do solo aderido às raízes (rizosfera) e daquele não aderido a elas (solo).	27
Figura 6 - Amostras de argila prontamente dispersa em água -APDA (à esquerda) e argila mecanicamente dispersa em água - AMDA (à direita) após 16 horas de repouso.....	29
Figura 7 - Turbidímetro modelo Hach 2100AN.....	29
Figura 8 - Diagrama esquemático mostrando o princípio do funcionamento do turbidímetro. Adaptado de Dexter e Czyż (2000).....	29
Figura 9 - Tubo cilíndrico com agregados de solo preparados para avaliação da estabilidade de percolação - EP (à esquerda) e conectado ao frasco de Mariotte (à direita).....	31
Figura 10 - Desenho esquemático do conjunto para a análise de estabilidade de percolação (EP). Adaptado de Siegrist et al. (1998).....	32
Figura 11 - Teores médios de argila mecanicamente dispersa em água (AMDA) para os ambientes avaliados, na profundidade de 0,00 - 0,05 m, com valores sem transformação (à esquerda) e com transformação inversa (à direita).	35
Figura 12 - Teores médios de argila prontamente dispersa em água (APDA) para os ambientes avaliados, na profundidade de 0,00 - 0,05 m. Letras comparam os ambientes pelo teste de Tukey a 5%.....	36
Figura 13 - Teores de argila prontamente dispersa em água (APDA) para os tratamentos avaliados considerando os valores médios de ambos os ambientes, na profundidade de 0,00 - 0,05 m. Letras comparam os tratamentos pelo teste de Tukey a 5%.	37
Figura 14 - Teores de argila prontamente dispersa em água (APDA) para os tratamentos avaliados para ambos os ambientes, na profundidade de 0,00 - 0,05 m. Letras comparam os ambientes pelo teste de Tukey a 5%.....	37
Figura 15 - Teores de argila mecanicamente dispersa em água (AMDA), com valores da transformação inversa, para os tratamentos avaliados, dentro do ambiente solo, na profundidade de 0,00 - 0,05 m. Letras comparam os tratamentos pelo teste de Tukey a 5%.....	38
Figura 16 - Teores de argila mecanicamente dispersa em água (AMDA), com valores da transformação inversa, para os tratamentos avaliados, dentro do ambiente rizosfera, na profundidade de 0,00 - 0,05 m. Letras comparam os tratamentos pelo teste de Tukey a 5%.....	39

- Figura 17 - Teores de argila mecanicamente dispersa em água (AMDA), com valores da transformação inversa, para a interação entre tratamentos e ambientes, na profundidade de 0,00 - 0,05 m. Letras comparam os ambientes para cada um dos tratamentos pelo teste de Tukey a 5%. 39
- Figura 18 - Estabilidade de percolação (EP) para os ambientes avaliados, na profundidade de 0,00 - 0,05 m. Letras comparam os ambientes pelo teste de Tukey a 5%..... 40
- Figura 19 - Estabilidade de percolação (EP) para os tratamentos avaliados, em ambos os ambientes, na profundidade 0,00 – 0,05 m. Letras comparam os ambientes pelo teste de Tukey a 5%..... 40
- Figura 20 - Granulometria do solo para os tratamentos avaliados, na profundidade de 0,00 - 0,05 m. Letras comparam os tratamentos pelo teste de Tukey a 5%..... 41
- Figura 21 - Presença de calcário em superfície numa amostra da rizosfera. 49
- Figura 22 - Culturas do inverno de 2017, no momento em que a amostragem do solo e da rizosfera foi realizada. A) Rotação 1: trigo / soja / canola; B) Rotação 2: trigo / soja / aveia-preta; C) Rotação 3: aveia-preta + centeio + ervilhaca / trigo mourisco / aveia-preta + ervilhaca; D) Rotação 4: trigo / soja / trigo; E) Rotação 5: aveia + azevém / soja / aveia-preta + azevém; F) Rotação 6: aveia-preta + tremoço azul / milho / aveia. 51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Caracterizações granulométrica e química e teor de carbono orgânico (CO) do solo da área experimental na profundidade de 0,00 - 0,05 m.	24
Tabela 2. Cultivos, desde a implantação do experimento até a coleta do solo, de 2016 a 2017, na área experimental.	25
Tabela 3. Significância (valor P) dos atributos físicos indicadores da estabilidade dos agregados do solo.	36
Tabela 4. Correlação de Pearson (r) e significância da correlação entre os atributos físicos e químicos do solo e os atributos físicos utilizados como indicadores da estabilidade dos agregados do solo.	42

1. INTRODUÇÃO

O manejo das áreas agrícolas interfere nas propriedades do solo, podendo acarretar alterações positivas ou negativas. Tendo em vista que aproximadamente 33% dos solos de todo o mundo encontram-se degradados devido ao seu manejo inadequado e que 95% dos alimentos consumidos pelos seres humanos provém do solo (UNITED NATIONS, 2017), práticas de conservação das áreas agrícolas, que visem sua sustentabilidade, vêm sendo cada vez mais importantes.

A avaliação das propriedades físicas do solo é imprescindível na definição destas práticas e, dentre estas propriedades, o estado de agregação do solo é um dos principais índices da qualidade estrutural do solo. Tal estado é altamente afetado pelo manejo e sua boa manutenção é necessária para a preservação e/ou melhoria das propriedades do solo, visando sempre aumentar a produtividade sem comprometer a conservação do solo.

Devido à formação da zona rizosférica no entorno das raízes, onde as propriedades e características do solo podem diferir, o sistema radicular está entre os fatores que interferem na agregação do solo. Porém, os trabalhos em que se avaliam diferenças biológicas e químicas entre o solo desta zona ou fora dela têm sido mais amplamente estudados do que os trabalhos em que se avaliam as alterações físicas (GREGORY; HINSINGER, 1999). No entanto, como as interações que ocorrem na rizosfera resultam numa matriz de solo heterogênea com propriedades físicas diferentes das do solo, é fundamental realizar pesquisas sobre as alterações das propriedades estruturais e hidráulicas da rizosfera e quantificar a importância delas para plantas cultivadas em campo (GREGORY, 2006). Como a maior parte dos trabalhos relacionados às alterações físicas promovidas pelo sistema radicular foi realizada com base em avaliações das propriedades hidráulicas do solo (HALLETT; GORDON; BENGOUGH, 2003; WHALLEY et al., 2005; DALY et al., 2015), permanecem ainda bastante defasados os estudos acerca das diferenças estruturais relacionadas à agregação do solo.

A ausência de trabalhos de campo é outro fator importante a ser considerado que evidencia a necessidade de estender os trabalhos a estas condições (CZARNES; DEXTER; BARTOLI, 2000).

No entanto, é importante salientar que os processos e fatores que ocorrem na rizosfera, promovendo as diferenças em relação ao solo, atuam concomitantemente e em conjunto, sendo extremamente difícil segregar seus efeitos. Por exemplo, como a comunidade microbiana na rizosfera é alterada, consequentemente, a taxa de rotatividade da matéria orgânica e a liberação de nutrientes em comparação com o solo também são afetadas (GREGORY, 2006). Outro fator, que

pode interferir na agregação do solo, é a liberação de exsudados pelas raízes que, combinada com os ciclos de umedecimento e secagem, tende a aproximar uma partícula de outra, funcionando como uma força coesiva (CZARNES; DEXTER; BARTOLI, 2000).

Estes efeitos podem alcançar diferentes distâncias em relação a raiz, fazendo que a interface solo-rizosfera seja bastante complexa, podendo até mesmo toda a camada superficial ser considerada rizosfera (GREGORY, 2006), com o que a diferença estrutural entre o solo e a rizosfera pode vir a ser muito sutil, sendo necessária uma metodologia sensível o bastante para detectá-la em pouco tempo de implantação de um experimento.

A argila dispersa em água é um índice muito utilizado para demonstrar alterações advindas do manejo do solo (CASTRO FILHO; MUZILLI; PODANOSCHI, 1998; CASTRO FILHO et al., 2002; MADARI et al., 2005; LIU; MA; BOMKE, 2005; CZYŻ; DEXTER, 2008; CZYŻ; VIZITIU, 2012; AN; DARBOUX; CHENG, 2013; LAGHROUR et al., 2015; NUNES et al., 2017; NUNES et al., 2018) e sua avaliação por meio do método do turbidímetro é mais sensível do que as outras metodologias utilizadas (CZYŻ; DEXTER, 2015). Assim, muitos estudos sobre os agregados do solo têm sido realizados por meio desta técnica para inferir sobre a estabilidade estrutural do solo (CZYŻ; DEXTER, 2008; DEXTER et al., 2011; CZYŻ; VIZITIU, 2012; CZYŻ; DEXTER, 2015; NUNES et al., 2017; PAULA, 2017; NUNES et al., 2018), visto que um solo com baixo teor de argila dispersa em água é mais agregado do que um solo com alto teor e possui, por sua vez, maior estabilidade estrutural. Isto deve-se às forças de dispersão e floculação que ocorrem no solo (TISDALL; OADES, 1982; CZYŻ; DEXTER, 2015).

Desta forma, com a hipótese de que a rizosfera apresenta agregados mais estáveis em água do que os agregados do solo e que diferentes culturas originam diferentes influências sobre a agregação do solo, objetivou-se, com este trabalho, estudar as diferenças estruturais entre a rizosfera e o solo sob diferentes rotações culturais, investigando a agregação de ambos ambientes, por meio da avaliação da argila dispersa em água e da estabilidade de percolação, correlacionadas com as avaliações químicas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Estrutura e agregação do solo

Os agregados do solo consistem na união de partículas minerais (areia, silte e argila) com substâncias orgânicas e inorgânicas, compondo partículas secundárias que podem ter diversas formas e tamanhos (BRONICK; LAL, 2005). Eles formam-se por meio de uma combinação de processos, podendo a agregação ser mediada pelo carbono orgânico do solo, fauna, pontes iônicas, argila e carbonatos (BRONICK; LAL, 2005). Argilas silicatadas, metais solúveis e materiais orgânicos, como as raízes, as mucilagens de fungos e outros exsudados microbianos que mantêm as partículas do solo unidas, atuam como agentes de ligação dos minerais primários e secundários para formar agregados do solo fisicamente estáveis (MARTIN, 2010; ASANO; WAGAI, 2014).

Os agregados do solo podem ser agrupados por tamanho e subdivididos principalmente em macro e microagregados, sendo seus respectivos tamanhos $> 250 \mu\text{m}$ e $< 250 \mu\text{m}$ (TISDALL; OADES, 1982; ASANO; WAGAI, 2014). As partículas primárias e os agregados de tamanho silte ligam-se para formar microagregados, que também podem formar-se pela ligação progressiva de argila, matéria orgânica do solo e cátions (SIX et al., 2004; BRONICK; LAL, 2005). Os macroagregados, por sua vez, podem formar-se por meio da acumulação de microagregados estáveis, ou em torno da matéria orgânica particulada ou colônias bacterianas, podendo sua decomposição ou quebra gerar, posteriormente, microagregados (SIX et al., 2004; BRONICK; LAL, 2005).

A estabilidade destes agregados, que consiste na resistência da estrutura do solo contra agressões físicas destrutivas, é um índice importante para a qualidade física do solo (HOSSEINI et al., 2015), pois é o agrupamento deles que compõem a estrutura do solo. Como o desenvolvimento dessa estrutura e sua agregação ocorrem no contexto de processos pedogenéticos naturais e atividades antrópicas, assim, a série de adições e perdas de solo, a ação de organismos e os efeitos climáticos determinam as propriedades do solo e exercem um equilíbrio dinâmico em sua estrutura (BRONICK; LAL, 2005).

A estrutura do solo pode ser dividida em várias classes, desde a estrutura sem nenhuma agregação, na qual os grãos estão individualizados, até a estrutura na qual as partículas formam uma massa coesa, típica dos solos compactados (MARTIN, 2010). Ela exerce influência em diversos fatores e processos que afetam a produtividade das culturas: retenção e movimento de água, gases e nutrientes no solo; composição da biomassa microbiana do solo; acumulação de substâncias no solo; ciclagem de nutrientes; penetração das raízes; escoamento da água pelo perfil e pela superfície do solo, podendo gerar erosão, formação de crostas e poluição das águas superficiais e

subterrâneas; capacidade de suportar vida vegetal; *habitat* para a fauna e microrganismos (BRONICK; LAL, 2005; GREGORY, 2006; BOTTINELLI et al., 2015; SOROKIN et al., 2016; ZHU et al., 2016).

O ideal para as culturas é que a estrutura do solo seja bem desenvolvida, com agregados bem formados, estáveis em água e com poros suficientes tanto para reter água quanto para permitir rápida infiltração e drenagem do excesso de água (TISDALL; OADES, 1982; GREGORY, 2006; MARTIN, 2010).

2.2. Agentes de formação, estabilização e alteração dos agregados do solo

Diversos agentes, físicos, químicos ou biológicos, podem interferir direta ou indiretamente nos processos de formação, estabilização e alteração dos agregados do solo (TISDALL; OADES, 1982; BRONICK; LAL, 2005).

A granulometria do solo, por exemplo, pode influenciar em sua agregação, pelo fato de a argila ser um dos principais agentes da formação e estabilização dos agregados (TISDALL; OADES, 1982). Dessa forma, os solos argilosos estão mais propensos a sofrerem alterações estruturais, devido ao alto teor de argila, em relação aos solos arenosos (DALY et al., 2015).

A mineralogia dos solos também influencia a agregação, sendo que solos de clima tropical apresentam menor estabilidade de agregados em relação aos de clima temperado, principalmente os Latossolos, devido a sua maior proporção de óxidos de ferro e de alumínio em comparação com a argila silicatada (FERREIRA, FERNANDES; CURI, 1999).

Os elementos químicos presentes no solo, por afetarem o balanço de cargas, influenciando a dispersão e a floculação da argila, também afetam a agregação do solo, sendo, por exemplo, mais dispersivos os solos sódicos, enquanto os solos com grandes teores de cálcio substituível tendem a flocular (CZYŻ; DEXTER, 2015).

O carbono orgânico (CO) também interfere na dinâmica dos agregados do solo, pois seu acréscimo no solo, aumenta a estabilidade dos agregados por consequência da estimulação do aumento dos microrganismos decompositores (COSENTINO; CHENU; LE BISSONNAIS, 2006), já a redução do teor de matéria orgânica do solo faz com que o número de macroagregados estáveis também sejam reduzidos (GREGORY, 2006).

O aumento do CO também aumenta a população de microrganismos (SHARMA et al., 2015) que podem também auxiliar na agregação do solo. Eles têm importância principalmente na formação dos microagregados (BLANKINSHIP et al., 2016) e aumentam a estabilidade da agregação do solo de diversas formas (COSENTINO; CHENU; LE BISSONNAIS, 2006).

A macrofauna também exerce influência na agregação do solo (JOUQUET et al., 2016), sendo os principais agentes responsáveis por estes processos os cupins (JOUQUET et al., 2011, 2016), as formigas (CAMMERAAAT; RISCH, 2008) e as minhocas (MILLERET; LE BAYON; GOBAT, 2009; FONTE et al., 2012; BLOUIN et al., 2013).

Práticas de manejo atuam positivamente ou negativamente na agregação do solo porque interferem na dinâmica do CO (TISDALL; OADES, 1982; OGLE; BREIDT; PAUSTIAN, 2005; ZANATTA et al., 2007), na atividade de microrganismos (SHARMA et al., 2015) e no desenvolvimento das raízes das plantas (LI et al., 2006). Além disso o cultivo frequente do solo expõe os agregados a danos físicos (TISDALL; OADES, 1982), o que não ocorre nos cultivos conservacionistas. Por exemplo, são encontrados agregados maiores e mais estáveis em solos sob pastagem do que em solos sob cultivo frequente (GREGORY, 2006).

Diversas dessas práticas de manejo alteram também o pH dos solos, o que acarreta alterações na dispersão e/ou floculação das partículas de argila e, consequentemente, na agregação do solo (NUNES et al., 2017). Isto ocorre porque a floculação das partículas de argila é máxima no ponto de carga zero (PCZ), ocorrendo a dispersão da fração argila quando o pH aumenta ou diminui.

As raízes e hifas, por sua vez, também consistem em agentes da agregação do solo (BRONICK; LAL, 2005), podendo diferentes espécies resultarem em diferentes efeitos sobre a agregação do solo (DEMENOIS et al., 2018).

Estes e outros diversos fatores atuam na agregação do solo, de formas positivas ou negativas. De forma geral, os processos ou organismos que atuam na agregação do solo influenciam de forma mais ou menos evidenciada tanto a formação, quanto a estabilização e alteração dos agregados do solo.

2.3. Relação da argila dispersa em água com a estruturação do solo

A argila é um dos componentes mais importantes do solo, até mesmo para solos arenosos, pois um dos pré-requisitos para que os agregados estáveis em água sejam formados é a floculação das partículas de argila (TISDALL; OADES, 1982; CZYŻ; DEXTER, 2015).

Devido à carga elétrica dos solos, pode ocorrer tanto a dispersão quanto a floculação dessas partículas. Nos solos em que ocorre a floculação, as partículas de argila se unem formando os agregados estáveis em água, enquanto que nos solos instáveis em água, ocorre a dispersão das partículas de argila, ou seja, elas se separam (TISDALL; OADES, 1982; CZYŻ; DEXTER, 2015).

Devido a esta relação da dispersão e/ou floculação das partículas de argila com a agregação do solo, a argila dispersa em água é considerada um índice da estabilidade dos agregados (CAÑASVERAS et al., 2010), podendo ser utilizada para avaliar a estabilidade do solo (CZYŻ; DEXTER, 2008) e, conseqüentemente, para inferir sobre a qualidade estrutural do solo.

Na avaliação da argila dispersa em água, o material liberado é oriundo da superfície dos agregados expostos à água, por isso, quanto maior a área específica, maior também é o teor de argila dispersa em água, assim, o tamanho do agregado do solo influencia grandemente esta propriedade do solo (KAY; DEXTER, 1990).

A quantidade de argila dispersa em água é de grande importância, pois quanto maior é esta quantidade, maiores são as reduções nas taxas de infiltração de água e na aeração do solo, podendo a estrutura do solo entrar em colapso (DEXTER et al., 2011).

A argila dispersa em água pode ser dividida em argila prontamente dispersa em água (APDA), argila mecanicamente dispersa em água (AMDA) e argila espontaneamente dispersa em água (AEDA).

A APDA consiste na parte da fração argila do solo que é facilmente ou potencialmente dispersa em água quando são aplicadas pequenas quantidades de energia mecânica e a AMDA é dispersa quando a energia mecânica é aplicada em maior quantidade, ou seja, via agitação mecânica (DEXTER et al., 2011). No entanto, quando não há entrada de energia mecânica e ocorre dispersão da argila, esta argila é denominada AEDA (CZYŻ; DEXTER, 2015).

As APDA, AMDA e AEDA correspondem a uma parte da argila total, sendo a AEDA uma parte da APDA e tanto a AEDA quanto a APDA, partes da AMDA (CZYŻ; DEXTER, 2015).

2.4. Relação do sistema radicular com a estruturação do solo

Dentre os agentes da agregação do solo, merecem destaque as raízes, pois as propriedades do solo influenciam o crescimento das raízes, devido ao fato de que quase todas elas crescem sob algum grau de impedimento mecânico; mas estas propriedades também são modificadas pela presença das raízes (GREGORY, 2006). A estrutura do agregado do solo sofre alterações com a presença das raízes, de forma que os agregados que estão diretamente relacionados com as raízes apresentam microestrutura diferente da observada nos agregados do solo que não estão próximos das raízes (MORENO-ESPÍNDOLA et al., 2007).

As raízes das plantas desempenham um papel importante no processo de desenvolvimento dos agregados estáveis em água (GREGORY, 2006) e têm importância

principalmente na formação dos macroagregados estáveis. A abundância de plantas e o comprimento das raízes podem se relacionar positivamente com a estabilidade dos agregados (BLANKINSHIP et al., 2016), sendo evidente que as raízes melhoram a agregação do solo (MILLERET; LE BAYON; GOBAT, 2009) devido a uma série de processos e fatores que ocorrem ao redor das raízes. Por meio de investigações acerca do efeito das associações simbióticas entre plantas e microrganismos endófitos na estabilidade dos agregados do solo, por exemplo, foi observado que o solo aderido às raízes apresenta maior índice de estabilidade de agregados do que o solo não aderido a elas (HOSSEINI et al., 2015).

No entanto, o efeito das raízes na agregação do solo pode variar com a granulometria do solo. O comportamento do solo arenoso é diferente do argiloso sob o mesmo impacto de raízes, de tal forma que se observam maiores diferenças entre o solo aderido às raízes e o solo não aderido a elas nos solos argilosos do que nos solos arenosos (DALY et al., 2015).

A eficiência das raízes em aderir ao solo pode variar também com a planta que está sendo cultivada, pois diferentes culturas ou genótipos resultam em diferentes efeitos ao redor das raízes (HALLETT; GORDON; BENGOUGH, 2003; WHALLEY et al., 2005; MORENO-ESPÍNDOLA et al., 2007; ZHU; CHENG, 2013). Estas diferenças ocorrem devido à abundância, ao comprimento e à quantidade de partículas de ligação das raízes; por exemplo, as raízes do milho e da grama bermuda demonstraram maior eficiência em aderir ao solo do que as raízes de amaranto e girassol (MORENO-ESPÍNDOLA et al., 2007). Isso ocorre porque, no geral, as raízes promovem um efeito no reforço e na estabilização da agregação do solo, mas, muitas gramíneas tem um efeito adicional que faz como que o solo se agregue mais firmemente às raízes (MCCULLY, 1999).

2.5. Rizosfera versus solo

O volume de solo adjacente a raiz da planta que está sob influência das raízes é chamado de rizosfera. Na rizosfera ocorre intensa interação entre o solo e as raízes das plantas (SHI et al., 2011) e uma série de processos ou fatores distintos dos que ocorrem no solo (GREGORY, 2006). Desta forma, as propriedades do solo destes dois ambientes são consideradas bastante diferentes (DALY et al., 2015) e é atribuído à rizosfera importância crucial no crescimento das plantas, visto que os nutrientes e a água que são absorvidos pelas plantas passam por ela (CZARNES; DEXTER; BARTOLI, 2000).

A rizosfera é considerada por diversos autores como o solo ligado às raízes após agitação destas com as mãos (SMALLA et al., 2001; BAUDOIN; BENIZRI; GUCKERT, 2002; YANAI;

MAJDI; PARK, 2003; WHALLEY et al., 2005; MORENO-ESPÍNDOLA et al., 2007; SHI et al., 2011; GUO et al., 2016), sendo que alguns autores delimitam a espessura da rizosfera para fins de pesquisas, podendo esta ser considerada como a camada de solo de 0 - 2 mm aderida às raízes (YANAI; MAJDI; PARK, 2003), ou ainda de 0 - 1 mm (HALLETT; GORDON; BENGOUGH, 2003).

O solo sem plantas em sua proximidade (SHI et al., 2011) ou o solo não aderido às raízes (YANAI; MAJDI; PARK, 2003) é considerado como o solo que não está sob o efeito das raízes. Este é definido como aquele que se encontra a uma distância mínima de 10 mm de uma raiz (WHALLEY et al., 2005), ou de 20 mm (HALLETT; GORDON; BENGOUGH, 2003).

No entanto, a interface raiz-solo é complexa, sendo um limite mal definido e heterogêneo, pois seu tamanho altera-se espacialmente e temporalmente de acordo com o fator considerado, podendo variar de uma fração de um milímetro, quando se considera apenas populações microbianas e nutrientes imóveis, a poucas dezenas de milímetro, quando são considerados os nutrientes móveis e a água, e até mesmo a várias dezenas de milímetro, considerando compostos voláteis e gases liberados das raízes (GREGORY, 2006).

2.6. Propriedades da rizosfera

A rizosfera pode ter propriedades muito diferentes do solo, pois na interface raiz-solo ocorrem diversos processos dinâmicos, alterando as propriedades físicas, químicas e biológicas (CZARNES; DEXTER; BARTOLI, 2000; GREGORY, 2006). Estas alterações ocorrem em conjunto e são consideradas as interações mais complexas experimentadas pelas plantas terrestres (MCCULLY, 1999).

Interações entre as raízes das plantas e microrganismos ou insetos podem ser positivas ou negativas para a planta (GREGORY, 2006) e são realizadas principalmente pelos microrganismos. Na rizosfera existem diferentes quantidades e tipos de substratos microbianos em comparação com o solo (GREGORY, 2006). Além disso, há diferenças também em relação ao número e intensidade de microrganismos (SHI et al., 2011). Esta microbiota diferenciada da rizosfera promove vários processos dinâmicos que auxiliam o ciclo dos nutrientes e a agregação do solo (DALY et al., 2015).

A comunidade bacteriana da rizosfera pode ser influenciada pelos exsudatos liberados pela raiz, localização na raiz e tipo de solo (GREGORY, 2006). Por isso, a diversidade de espécies é maior na rizosfera, possivelmente devido aos exsudatos radiculares e há diferenças da população bacteriana entre a rizosfera e o solo, sendo algumas bactérias observadas apenas em um destes ambientes (SHI et al., 2011). As populações bacterianas também aumentam no entorno das raízes

com o decorrer do tempo (SMALLA et al., 2001; BAUDOIN; BENIZRI; GUCKERT, 2002), tendo efeito acumulativo no solo, de forma que, em relação ao primeiro ano de cultivo, observa-se maior enriquecimento destas populações no ano seguinte (SMALLA et al., 2001). Mas, não há diferenças significativas da população em relação à região amostrada da raiz (BAUDOIN; BENIZRI; GUCKERT, 2002).

Alguns fungos endófitos infectam as raízes de algumas culturas, alterando a sua rizosfera, proporcionando a ela maior biomassa microbiana, maior potencial de atividade enzimática e maior utilização de oxigênio, porém, observa-se menores concentrações de matéria orgânica particulada, em relação ao solo não rizosférico (GUO et al., 2016). A associação das raízes com alguns fungos micorrízicos arbusculares também modifica a rizosfera, principalmente quanto a eficiência das raízes na absorção de nutrientes, notadamente aqueles pouco móveis, como o fósforo. Na rizosfera de plantas associadas a estes fungos ocorre aumento do pH, redução da concentração de manganês nas plantas e de carboxilatos na rizosfera e a absorção de P é alterada de acordo com a disponibilidade deste elemento no solo (NAZERI et al., 2014). No entanto, a associação das plantas com estes fungos também promove efeitos positivos sobre a agregação do solo (DEMENOIS et al., 2018).

Os compostos liberados pelas raízes alteram as propriedades químicas e físicas do solo e estimulam o crescimento de diversos organismos, alterando também as propriedades biológicas (GREGORY, 2006). Além disso, a principal entrada de carbono na rizosfera vem dos exsudatos da raiz (KUZYAKOV; HILL; JONES, 2007). Estes exsudatos são constituídos principalmente de compostos orgânicos de baixo peso molecular, que são prontamente utilizados pelos microrganismos da rizosfera para crescimento e respiração (KUZYAKOV; HILL; JONES, 2007) e por isso ocorre o aumento da população microbiana. Mucilagem é o nome dado a outra substância secretada pelas raízes, que consiste em um hidrogel secretado pela ponta da raiz no solo (ZAREBANADKOUKI; AHMED; CARMINATI, 2016).

As raízes alteram as características do solo onde crescem e influenciam os processos deste solo (MELE et al., 2003). O crescimento das raízes das plantas em si, pode alterar a estrutura do solo por ser capaz de criar bioporos no solo após a sua decomposição (STIRZAKER; PASSIOURA; WILMS, 1996; HAN et al., 2015), o que ainda aumenta o teor de carbono orgânico no solo (STRUECKER et al., 2016). Isto ocorre porque o solo deforma-se para que a raiz caiba em um poro, que normalmente é menor do que o seu diâmetro, de tal forma que o espaço ocupado pela raiz gera uma perda equivalente do espaço de poros do solo (GREGORY, 2006). Desta forma, as partículas do solo são aproximadas uma das outras, favorecendo a agregação.

Ao modificar a estrutura do solo ao seu entorno, as raízes modificam também suas propriedades hidráulicas, afetando a capacidade de retenção da água no solo e a drenagem, ocorrendo maior quantidade de água retida no solo não rizosférico do que no rizosférico (DALY et al., 2015). A porosidade da rizosfera e da região adjacente a ela pode não diferir, mas observa-se poros maiores no solo rizosférico e estruturas contrastantes entre estas duas regiões do solo (WHALLEY et al., 2005). Mas, devido ao aumento da agregação quando comparado com o solo não rizosférico, o solo da rizosfera pode apresentar menor porosidade (DALY et al., 2015).

Na superfície, os solos são submetidos a rápido umedecimento pela precipitação ou irrigação e, posteriormente, secagem por evaporação, gerando os ciclos de umedecimento e secagem, que podem influenciar uma série de processos que ocorrem nos solos, inclusive a agregação (ZHU; CHENG, 2013). No entanto, os efeitos dessa secagem na estruturação do solo ainda não estão claros, visto que o equilíbrio entre os processos de umedecimento e secagem são determinantes da estabilidade dos agregados em água e tanto o aumento quanto a diminuição desta propriedade têm sido observados após a secagem (DENEFF et al., 2001). No entanto, na maioria dos casos, o umedecimento dos agregados é súbito, o que gera o rompimento deles (COSENTINO; CHENU; LE BISSONNAIS, 2006). Mas, não apenas a água gera estes ciclos de umedecimento e secagem nos solos. As ligações químicas de mucilagens das raízes promovem também este ciclo, ocorrendo, respectivamente, expansão da mucilagem em torno das partículas do solo e contração da mucilagem aproximando as partículas firmemente (MCCULLY, 1999).

A concentração de nutrientes sofre alterações na rizosfera em relação ao solo que não está sob efeitos das raízes. Observa-se acúmulo significativo de potássio, magnésio e sódio e esgotamento de amônio e cálcio na rizosfera em relação ao solo não rizosférico, sendo que em geral ocorre depleção de nutrientes perto da superfície da raiz (YANAI; MAJDI; PARK, 2003). De acordo com a liberação de determinado exsudato pelas raízes, podem ser observadas alterações na mobilização e liberação dos nutrientes na rizosfera (KUZYAKOV; HILL; JONES, 2007). Culturas que possuem raízes profundas podem ainda aumentar o ciclo dos nutrientes absorvendo aqueles que foram lixiviados para fora do alcance de culturas anuais rasas e devolvendo-os às camadas superiores do solo (MELE et al., 2003) e algumas espécies de plantas podem ainda alterar o pH do solo adjacente às suas raízes (WANG et al., 2016), sendo que, os exsudatos das raízes podem estar intimamente ligados às alterações de pH nesta região do solo (KUZYAKOV; HILL; JONES, 2007).

Estas e outras diversas propriedades são responsáveis por diferenciarem a rizosfera do solo e justificam os estudos realizados nestes ambientes.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Descrição da área experimental

A área onde o experimento foi implantado pertence à Estação Experimental do Polo Regional do Instituto Agrônômico do Paraná (IAPAR), localizada na região Centro Oriental do Paraná, em Ponta Grossa - PR, sob as coordenadas geográficas de 25°09' 38" S e 50°09'24" O, com altitude aproximada de 835 m. O solo avaliado foi classificado como LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico, de textura muito argilosa e relevo suave ondulado (EMBRAPA, 2006).

O clima da região, de acordo com a classificação de Köppen, é classificado como subtropical úmido (Cfb), com precipitação pluvial média anual de aproximadamente 1.550 mm e temperatura média anual de 18°C (CAVIGLIONE, 2000).

A área experimental (Figura 1) possui histórico de plantio direto durante 20 anos, onde no inverno foi semeada aveia preta e no verão, de forma alternada, milho e soja. O experimento avaliado foi implantado no inverno de 2016, e inclui dentre as coberturas de verão, milho (*Zea mays* L.), soja (*Glycine max* L.) e trigo mourisco (*Fagopyrum esculentum* L.); e dentre as de inverno, trigo (*Triticum aestivum* L.), aveia-preta (*Avena strigosa* Schreb), ervilhaca (*Vicia sativa* L.), tremoço azul (*Lupinus angustifolius* L.), centeio (*Secale cereale* L.), azevém (*Lolium multiflorum* L.), aveia (*Avena sativa* L.) e canola (*Brassica napus* L.).

Figura 1 - Área do experimento na Estação Experimental do IAPAR, em Ponta Grossa - PR.

As caracterizações granulométrica e química do solo da área experimental estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Caracterizações granulométrica e química do solo da área experimental na profundidade de 0,00 - 0,05 m.

Atributos físico-químicos do solo	
Areia (kg kg^{-1})	0,097
Silte (kg kg^{-1})	0,237
Argila (kg kg^{-1})	0,666
Classe granulométrica (USDA)	Muito argilosa
CO (g kg^{-1})	49,251
P (mg kg^{-1})	35,343
K^+ ($\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	6,423
Al^{3+} ($\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	0,713
Mg^{2+} ($\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	33,119
Ca^{2+} ($\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	64,286
H+Al ($\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	86,258
SB ($\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	103,828
$\text{CTC}_{\text{pH } 7,0}$ ($\text{mmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	190,086
V (%)	54,391
m (%)	45,609
$\text{pH}_{\text{água}}$	5,992
pH_{KCl}	4,848
ΔpH	-1,144

USDA = Departamento de Agricultura dos Estados Unidos; CO = carbono orgânico; P = fósforo; K^+ = potássio; Al^{3+} = alumínio; Mg^{2+} = magnésio; Ca^{2+} = cálcio; H+Al = acidez potencial; SB = soma de bases; $\text{CTC}_{\text{pH } 7,0}$ = capacidade de troca de cátions potencial (no pH 7,0); V = saturação por bases; m = saturação por alumínio; $\text{pH}_{\text{água}}$ = potencial hidrogeniônico em água; pH_{KCl} = potencial hidrogeniônico em cloreto de potássio; ΔpH = delta pH ($\text{pH}_{\text{KCl}} - \text{pH}_{\text{água}}$).

Os tratamentos consistiram em seis diferentes rotações de cultura, incluindo alguns consórcios em período de inverno, com ciclo de três anos, conforme apresentados na Tabela 2, conduzidos sob o sistema de plantio direto, com o manejo das culturas (espaçamento, densidade de semeadura, época de plantio, adubação, controle de pragas, doenças e plantas daninhas) de acordo com as recomendações técnicas para cada cultura. O monitoramento e o controle de pragas e doenças foram realizados com base no manejo integrado sempre que possível e executados de acordo com orientação da Área de Proteção de Plantas do IAPAR.

Tabela 2. Cultivos, desde a implantação do experimento até a coleta do solo, de 2016 a 2017, na área experimental.

Tratamentos	2016 (inverno)	2017 (verão)	2017 (inverno)
Rotação 1	Trigo	Soja	Canola
Rotação 2	Trigo	Soja	Aveia-preta
Rotação 3	Aveia-preta + centeio + ervilhaca	Trigo mourisco	Aveia-Preta +ervilhaca
Rotação 4	Trigo	Soja	Trigo
Rotação 5	Azevém + Aveia	Soja	Aveia-preta + azevém
Rotação 6	Tremoço azul + aveia- preta	Milho	Aveia

Os tratamentos foram dispostos em quatro blocos, sendo o delineamento experimental de blocos ao acaso, com seis tratamentos, compondo 24 parcelas experimentais, cada uma com 30x10 m e com espaçamento, entre elas, de 8 m no comprimento, para facilitar a manobra das máquinas, e 2 m na largura, como apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Croqui da área experimental.

3.2. Amostragem do solo

A coleta do solo foi realizada em setembro de 2017, na camada superficial (0,00 - 0,05 m) tanto para a rizosfera quanto para o solo. Como rizosfera, foi coletado o solo ligado às raízes após agitação destas com as mãos (SMALLA et al., 2001; BAUDOIN; BENIZRI; GUCKERT, 2002; YANAI; MAJDI; PARK, 2003; WHALLEY et al., 2005; MORENO-ESPÍNDOLA et al., 2007; SHI et al., 2011; GUO et al., 2016) e os agregados do solo aderido às raízes foram cuidadosamente

removidos por escovação (YANAI; MAJDI; PARK, 2003), conforme apresentado na Figura 3. O solo não aderido às raízes (YANAI; MAJDI; PARK, 2003), entre plantas, foi considerado como solo ausente da influência das raízes, chamado apenas de solo, e coletado com auxílio de uma pá (Figura 4). A Figura 5 representa, esquematicamente, como a amostragem da rizosfera e do solo fora dela foi realizada.

Figura 3 - Coleta da rizosfera (à esquerda) e remoção dos agregados rizosféricos (à direita).

Figura 4 - Coleta do solo.

Figura 5 - Desenho esquemático da coleta do solo aderido às raízes (rizosfera) e daquele não aderido a elas (solo).

Em cada uma das parcelas experimentais foram coletadas três amostras para cada um dos ambientes avaliados (rizosfera e solo), totalizando seis amostras por parcela experimental, e 144 amostras para toda a área experimental.

3.3. Preparo do solo e análises laboratoriais

As amostras foram preparadas e processadas nos Laboratórios de Física e Química do Solo da ESALQ/USP (Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”/Universidade de São Paulo), em Piracicaba - SP. Foram conduzidas análises para verificar a estabilidade estrutural dos agregados do solo, bem como as análises granulométricas e químicas, conforme descrito a seguir.

3.3.1. Estabilidade estrutural

Foram avaliadas a argila prontamente dispersa em água (APDA), a argila mecanicamente dispersa em água (AMDA) e a estabilidade de percolação (EP), a fim de verificar a estabilidade estrutural.

As avaliações da APDA e AMDA foram realizadas pelo método da turbidimetria (DEXTER et al., 2011), utilizando-se o turbidímetro modelo HACH 2100 NA, e a avaliação da EP, baseando-se no conteúdo de água percolado através de uma coluna de agregados do solo secos (MBAGWU; AUERSWALD, 1999), sendo a avaliação feita por ponto amostrado, totalizando 144 amostras para cada análise.

Realizou-se a análise da EP a fim de conhecer melhor a estabilidade estrutural do solo em estudo (MBAGWU; AUERSWALD, 1999) e, apesar da EP não ser muito utilizada em estudos de solos tropicais (GUEDES FILHO et al., 2013), existe a necessidade de testar a sua aplicabilidade em outros solos fora da região da Alemanha, onde esta metodologia foi desenvolvida (MBAGWU; AUERSWALD, 1999).

Estas metodologias já foram validadas anteriormente em estudos sobre a estabilidade estrutural do solo (SIEGRIST et al., 1998; MBAGWU; AUERSWALD, 1999; CZYŻ; DEXTER, 2008; DEXTER et al., 2011; CZYŻ; VIZITIU, 2012; GUEDES FILHO et al., 2013; CZYŻ; DEXTER, 2015; NUNES et al., 2017; PAULA, 2017; NUNES et al., 2018).

3.3.1.1. Argila prontamente dispersa em água (APDA)

Parte das amostras de solo coletadas foram processadas logo após a coleta. Estas amostras foram passadas em peneiras de malha de 2 mm e os agregados com diâmetro < 2 mm foram utilizados para avaliação da argila dispersa em água. A umidade inicial da amostra foi determinada e corrigida para massa de solo seco.

Em frascos plásticos com tampa e capacidade para 150 mL, foram adicionados cerca de 5 g destes agregados do solo e, posteriormente, 125 mL de água deionizada. Os frascos foram agitados manualmente, invertendo-os de forma padrão por 4 vezes (cada inversão foi de cerca de 5 s). Em seguida, as amostras foram deixadas em repouso durante 16 horas (Figura 6). Decorrido este tempo, foi pipetada uma alíquota de 30 mL da suspensão do centro do frasco e adicionada à célula de medição do turbidímetro, que foi colocada no turbidímetro modelo Hach 2100AN (Figura 7), o qual realizou a leitura, por meio de dispersão de luz (Figura 8), em NTU (unidades de turbidez nefelométrica), sendo que os valores da turbidez são diretamente proporcionais a quantidade de colóides em suspensão, no caso, argila. O conteúdo de água da amostra também foi medido a fim de calcular a massa de solo seco (ms) contida nos 5 g de agregados utilizados.

Figura 6 - Amostras de argila prontamente dispersa em água -APDA (à esquerda) e argila mecanicamente dispersa em água - AMDA (à direita) após 16 horas de repouso.

Figura 7 - Turbidímetro modelo Hach 2100AN.

Figura 8 - Diagrama esquemático mostrando o princípio do funcionamento do turbidímetro. Adaptado de Dexter e Czyż (2000).

A turbidez foi normalizada para a concentração de 1 g L⁻¹, considerando os efeitos dos diferentes teores de água iniciais e as diferenças de massa inicial de solo úmido, utilizando-se a equação abaixo.

$$TN = \frac{T}{1000 \cdot \frac{ms}{125}}$$

onde:

TN = turbidez normalizada, em NTU/g L⁻¹;

T = turbidez, em NTU;

ms = massa de solo seco;

125 = quantidade de água utilizada na análise (mL);

1000 = fator de correção para transformar mL em L.

3.3.1.2. Argila mecanicamente dispersa em água (AMDA)

Para avaliação da AMDA foram utilizadas as mesmas amostras preparadas para APDA. Após cada leitura da turbidez das amostras de APDA os 30 mL da suspensão utilizados foram devolvidos ao seu respectivo frasco, recompondo os 125 mL iniciais. Foi aplicada maior entrada de energia mecânica, por meio de agitação mecânica horizontal, a 120 oscilações por minuto, durante 30 minutos. Então, as amostras foram deixadas em repouso por 16 horas (Figura 6) e, posteriormente, foram realizadas a leitura e a normalização da turbidez como descrito acima para APDA.

3.3.1.3. Estabilidade de percolação (EP)

Outra parte das amostras coletadas foi deixada para secar ao ar e passada em peneira de malha de 2 mm, compondo a terra fina seca ao ar (TFSA). A TFSA foi passada em outra peneira, porém em malha de 1 mm. Os agregados de tamanho entre 2 - 1 mm foram, então, destinados à avaliação da EP.

Esta foi feita em um tubo cilíndrico com diâmetro interno de 15 mm e comprimento de 105 mm, no qual colocaram-se, na extremidade inferior, um pedaço de tecido de nylon e, logo acima, 2 mm de areia tamanho médio (0,25 - 0,50 mm), a fim de evitar a obstrução dos poros na

saída do tubo. A seguir, foram colocados 10 g dos agregados e acima da coluna de agregados, já na extremidade superior do tudo, 2 mm de areia também de tamanho médio (0,25 – 0,50 mm), a fim de evitar a ruptura dos agregados quando entrarem em contato com a água. A Figura 9 mostra um tubo cilíndrico preparado. Após o preparo dos tubos, eles foram soltos em queda livre sobre uma superfície rígida, de uma altura de 20 mm por 10 vezes, para homogeneizar os agregados em seu interior. Posteriormente, eles foram conectados à saída de água de um frasco de Mariotte e submetidos a percolação de água deionizada, a uma pressão hidrostática de 20 hPa por 10 minutos (Figura 9). O esquema desta análise é apresentado na Figura 10.

O volume de água percolado através da coluna por unidade de tempo, foi considerado como medida da estabilidade dos agregados do solo e denominado estabilidade de percolação (EP), foi expresso em mL min^{-1} e, tendo em vista que a EP é muito positivamente influenciada pelo teor de areia dos solos (o que não implica aumento de estabilidade), a EP medida foi corrigida pela equação abaixo.

$$\text{EP corrigida} = \frac{\text{EP medida} \cdot (100 - \% \text{ areia})}{100}$$

Figura 9 - Tubo cilíndrico com agregados de solo preparados para avaliação da estabilidade de percolação - EP (à esquerda) e conectado ao frasco de Mariotte (à direita).

Figura 10 - Desenho esquemático do conjunto para a análise de estabilidade de percolação (EP). Adaptado de Siegrist et al. (1998).

3.3.2. Análise granulométrica

Para a análise da granulometria (teores de areia total, silte e argila) foram utilizadas três amostras por unidade experimental, totalizando 72 amostras. Estas 72 amostras foram coletadas

do ambiente solo, no entanto, para fins de correlação, o mesmo valor foi considerado para rizosfera, visto que a granulometria do solo não é alterada com o manejo.

O teor de areia foi obtido por pesagem, e os teores de silte e argila pelo método da pipeta (EMBRAPA, 2012). Pesaram-se cerca de 10 g de TFSA em frascos de vidro de 13,5 cm de comprimento por 8,6 de diâmetro, nos quais foram acrescentados 125 mL de solução de hidróxido de sódio e hexametáfosfato de sódio ($0,1 \text{ mol L}^{-1}$). Posteriormente estes frascos foram agitados por 16 horas em um agitador horizontal a 150 ciclos por minuto. Decorrido este tempo, foi realizada a separação da areia total, passando todo o conteúdo dos frascos em uma peneira de $53 \mu\text{m}$. A fração retida na peneira foi transferida para béqueres de vidro previamente tarados e seca em estufa a 105°C , por 24 horas. Após este tempo obteve-se o conteúdo de areia total por pesagem em balança analítica. O conteúdo que passou pela peneira de $53 \mu\text{m}$ foi transferido para uma proveta de 0,5 L e seu volume foi aferido. Agitou-se a suspensão de cada amostra durante 1 minuto. Imediatamente após a agitação, foi pipetada, a 5 cm de profundidade, uma alíquota de 25 mL da suspensão de silte mais argila. Esta alíquota foi acondicionada em béquer de vidro e seca em estufa a 105°C por 24 horas. Em seguida aguardou-se o tempo de sedimentação da fração silte de acordo com a temperatura aferida, considerando-se o solo com densidade de partícula média de 2650 kg m^{-3} , e pipetaram-se, a 5 cm de profundidade, 25 mL da suspensão de argila. Estas últimas alíquotas pipetadas também foram acondicionadas em béqueres previamente tarados e conduzidos a estufa a 105°C por 24 horas. As amostras secas da estufa foram pesadas em balança analítica e realizados os devidos cálculos para obter os teores de areia, silte e argila, em kg kg^{-1} .

3.3.3. Análises químicas

Foram determinados o pH em água ($\text{pH}_{\text{água}}$) e em cloreto de potássio ($\text{KCl } 1 \text{ mol L}^{-1}$) (pH_{KCl}); os teores de cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}), extraídos com cloreto de potássio ($\text{KCl } 1 \text{ mol L}^{-1}$) e determinados por absorção; alumínio (Al^{3+}), extraído com cloreto de potássio ($\text{KCl } 1 \text{ mol L}^{-1}$) e determinado por titulação com NaOH , utilizando-se azul de bromotinol; acidez potencial ($\text{H}+\text{Al}$), extraída por acetato de cálcio e determinada por titulação com hidróxido de sódio (NaOH), utilizando-se fenolftaleína; fósforo (P) e potássio (K^+), extraídos por Mehlich 1 e determinados por colorimetria e absorbância, respectivamente; e o carbono orgânico (CO) pela metodologia de Walkley-Black (DONAGEMA et al., 2011).

O delta pH (ΔpH), a soma de bases (SB), a capacidade de troca de cátions no pH 7,0 ($\text{CTC}_{\text{pH } 7,0}$), a saturação por bases ($\text{V}\%$) e a saturação em alumínio ($\text{m}\%$) foram obtidas pelas equações seguintes (DONAGEMA et al., 2011).

$$\Delta\text{pH} = \text{pH}_{\text{KCl}} - \text{pH}_{\text{água}}$$

$$\text{SB} = \text{K}^+ + \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + [\text{Na}^+]$$

$$\text{CTC}_{\text{pH } 7,0} = \text{SB} + (\text{H} + \text{Al})$$

$$\text{V}\% = (100 \cdot \text{SB}) / \text{CTC}_{\text{pH } 7,0}$$

$$\text{m}\% = 100 \cdot \text{Al}^{3+} / (\text{SB} \cdot \text{Al}^{3+})$$

3.4. Análise estatística dos dados

Os resíduos dos dados obtidos foram submetidos às análises de normalidade (Shapiro-Wilk) e Homocedasticidade (Bartlett). Para os dados com resíduos muito distantes da normalidade e/ou da homocedasticidade foram realizadas transformações adequadas visando seguir com uma análise paramétrica. Desta forma os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, quando significativas ao nível de 5%, as médias foram avaliadas pelo teste de Tukey.

Foi testada a correlação de Pearson (r) entre AMDA, APDA, EP e as propriedades físico-químicas avaliadas.

Foi realizada uma análise descritiva dos dados referentes as propriedades físico-químicas avaliadas (Apêndice).

4. RESULTADOS

Dos atributos físicos indicadores da estruturação do solo avaliados, foi realizada transformação dos dados de APDA e AMDA, visando obter uma distribuição normal ou homogeneidade de variância dos resíduos.

No entanto, comparando-se o teste de médias dos dados com e sem transformação, obtiveram-se diferenças estatísticas distintas entre as médias apenas para o desdobramento dos tratamentos dentro do ambiente rizosfera da interação entre tratamentos e ambientes na variável resposta AMDA.

Para APDA a não normalidade não impediu que o teste de médias Tukey detectasse as mesmas diferenças estatísticas entre as médias observadas para os dados transformados. Desta forma, considerando-se a dificuldade de interpretação de dados transformados e a não alteração dos resultados quando adotado o teste paramétrico para os dados sem transformações, consideraram-se os dados transformados apenas para AMDA, sendo adotada a transformação inversa (PINO, 2014).

É importante salientar que a interpretação dos dados com transformação inversa deve ser também inversa, assim, quanto maior o valor da média dos dados transformados, menor o valor da média dos dados observados, como apresentado na Figura 11.

Figura 11 - Teores médios de argila mecanicamente dispersa em água (AMDA) para os ambientes avaliados, na profundidade de 0,00 - 0,05 m, com valores sem transformação (à esquerda) e com transformação inversa (à direita).

A Tabela 3 apresenta o grau de significância dos atributos físicos indicadores da estabilidade dos agregados do solo avaliados neste estudo (APDA, AMDA e EP), para tratamentos, ambientes e também para a interação entre estas duas fontes de variação: tratamentos X ambientes.

Tabela 3. Significância (valor P) dos atributos físicos indicadores da estabilidade dos agregados do solo.

Atributos físicos do solo	FV					
	Tratamentos		Ambientes		Tratamentos X Ambientes	
APDA (NTU/g L ⁻¹)	2,370.10 ⁻⁵	***	3,113.10 ⁻⁵	***	0,833	ns
AMDA (NTU/g L ⁻¹)	6,749.10 ⁻⁷	***	5,153.10 ⁻⁵	***	0,028	*
EP (mL min ⁻¹)	0,276	ns	0,022	*	0,533	ns

APDA = argila prontamente dispersa em água; AMDA = argila mecanicamente dispersa em água; EP = estabilidade de percolação. Códigos de significância: ns = não significativo; * = significativo à 0,05; *** = significativo à 0,001.

Foi observado que para a APDA, o ambiente rizosfera apresentou significativamente ($p \leq 0,05$) menor teor de argila dispersa em água do que o solo (Figura 12), sendo observadas diferenças também entre as rotações avaliadas, conforme apresentado na Figura 13.

Figura 12 - Teores médios de argila prontamente dispersa em água (APDA) para os ambientes avaliados, na profundidade de 0,00 - 0,05 m. Letras comparam os ambientes pelo teste de Tukey a 5%.

Figura 13 - Teores de argila prontamente dispersa em água (APDA) para os tratamentos avaliados considerando os valores médios de ambos os ambientes, na profundidade de 0,00 - 0,05 m. Letras comparam os tratamentos pelo teste de Tukey a 5%.

Mas considerando os valores médios de cada ambiente, apesar da não diferença estatística, observam-se menores valores de APDA para rizosfera em relação ao solo para todas as rotações avaliadas (Figura 14).

Figura 14 - Teores de argila prontamente dispersa em água (APDA) para os tratamentos avaliados para ambos os ambientes, na profundidade de 0,00 - 0,05 m. Letras comparam os ambientes pelo teste de Tukey a 5%.

Para AMDA, a interação entre tratamentos e ambientes foi significativa, observando-se que para o ambiente solo não ocorreram diferenças entre os tratamentos avaliados (Figura 15), no entanto, para o ambiente rizosfera observaram-se teores de AMDA diferentes ($p \leq 0,05$) para estes tratamentos (Figura 16). Avaliando-se isoladamente cada tratamento, obtiveram-se diferenças significativas para as rotações 1, 3, 5 e 6, com os teores de AMDA significativamente menores na rizosfera do que no solo (Figura 17). Lembrando que os dados apresentados nas Figuras 15, 16 e 17 estão com transformação inversa.

Figura 15 - Teores de argila mecanicamente dispersa em água (AMDA), com valores da transformação inversa, para os tratamentos avaliados, dentro do ambiente solo, na profundidade de 0,00 - 0,05 m. Letras comparam os tratamentos pelo teste de Tukey a 5%.

Figura 16 - Teores de argila mecanicamente dispersa em água (AMDA), com valores da transformação inversa, para os tratamentos avaliados, dentro do ambiente rizosfera, na profundidade de 0,00 - 0,05 m. Letras comparam os tratamentos pelo teste de Tukey a 5%.

Figura 17 - Teores de argila mecanicamente dispersa em água (AMDA), com valores da transformação inversa, para a interação entre tratamentos e ambientes, na profundidade de 0,00 - 0,05 m. Letras comparam os ambientes para cada um dos tratamentos pelo teste de Tukey a 5%.

Em relação aos dados de EP, não houve diferença significativa para a interação entre tratamentos e ambientes (Tabela 3). No entanto, no geral, a rizosfera apresentou significativamente maior percolação do que o solo (Figura 18).

Figura 18 - Estabilidade de percolação (EP) para os ambientes avaliados, na profundidade de 0,00 - 0,05 m. Letras comparam os ambientes pelo teste de Tukey a 5%.

Porém, apesar da não significância, observa-se na Figura 19, que os valores da EP apresentam tendência de serem maiores na rizosfera, exceto para a rotação 1.

Figura 19 - Estabilidade de percolação (EP) para os tratamentos avaliados, em ambos os ambientes, na profundidade 0,00 – 0,05 m. Letras comparam os ambientes pelo teste de Tukey a 5%.

A Figura 20 apresenta a distribuição das partículas minerais do solo, nas classes de tamanhos areia, silte e argila.

Figura 20 - Granulometria do solo para os tratamentos avaliados, na profundidade de 0,00 - 0,05 m. Letras comparam os tratamentos pelo teste de Tukey a 5%.

Houve correlações lineares fracas e moderadas ($p \leq 0,05$) entre os atributos químico-físicos do solo com os atributos físicos indicadores da estabilidade dos agregados do solo (APDA, AMDA e EP) avaliados (Tabela 4). Enquanto para estes últimos, houve correlação positiva entre APDA e AMDA, porém, estas correlações, não apresentadas na Tabela 4, foram fracas, sendo r igual a 0,260 para a rizosfera e 0,264 para o solo.

Tabela 4. Correlação de Pearson (r) e significância da correlação entre os atributos físicos e químicos do solo e os atributos físicos utilizados como indicadores da estabilidade dos agregados do solo.

Atributos físico-químicos do solo	Atributos físicos indicadores da estabilidade dos agregados do solo					
	APDA (NTU/g L ⁻¹)		AMDA (NTU/g L ⁻¹)		EP (mL min ⁻¹)	
	Rizosfera	Solo	Rizosfera	Solo	Rizosfera	Solo
Areia (kg kg ⁻¹)	-0,056 ns	-0,147 ns	-0,410 ***	-0,159 ns	-0,269 *	-0,151 ns
Silte (kg kg ⁻¹)	0,083 ns	-0,121 ns	0,003 ns	-0,261 *	0,071 ns	0,095 ns
Argila (kg kg ⁻¹)	-0,060 ns	-0,165 ns	0,129 ns	0,304 **	0,018 ns	-0,044 ns
CO (g kg ⁻¹)	-0,069 ns	0,051 ns	-0,476 ***	-0,251 *	-0,039 ns	-0,159 ns
P (mL kg ⁻¹)	-0,014 ns	0,346 **	0,078 ns	0,154 ns	-0,003 ns	-0,202 .
K ⁺ (mmol _c kg ⁻¹)	0,166 ns	0,280 *	-0,144 ns	0,055 ns	-0,203 .	0,059 ns
Al ³⁺ (mmol _c kg ⁻¹)	-0,052 ns	-0,119 ns	0,560 ***	0,263 *	-0,044 ns	-0,085 ns
Mg ²⁺ (mmol _c kg ⁻¹)	-0,098 ns	0,053 ns	-0,363 **	-0,279 *	-0,243 *	-0,020 ns
Ca ²⁺ (mmol _c kg ⁻¹)	-0,101 ns	0,007 ns	-0,537 ***	-0,371 **	-0,125 ns	-0,009 ns
H+Al (mmol _c kg ⁻¹)	-0,031 ns	-0,052 ns	0,323 **	0,314 **	0,074 ns	-0,053 ns
SB (mmol _c kg ⁻¹)	-0,061 ns	0,066 ns	-0,437 ***	-0,339 **	-0,223 .	-0,006 ns
CTC _{pH 7,0} (mmol _c kg ⁻¹)	-0,104 ns	0,044 ns	-0,309 **	-0,184 ns	-0,230 .	-0,068 ns
V (%)	-0,021 ns	0,067 ns	-0,459 ***	-0,355 **	-0,157 ns	0,022 ns
m (%)	-0,064 ns	-0,101 ns	0,583 ***	0,228 .	-0,046 ns	-0,089 ns
pH _{água}	-0,011 ns	0,038 ns	-0,468 ***	-0,358 **	0,100 ns	0,123 ns
Δ pH	-0,057 ns	0,068 ns	0,156 ns	0,045 ns	-0,421 ***	-0,154 ns

CO = carbono orgânico; P = fósforo; K⁺ = potássio; Al³⁺ = alumínio; Mg²⁺ = magnésio; Ca²⁺ = cálcio; H+Al = acidez potencial; SB = soma de bases; CTC_{pH 7,0} = capacidade de troca de cátions potencial (no pH 7,0); V = saturação por bases; m = saturação por alumínio; pH_{água} = potencial hidrogeniônico em água; ΔpH = delta pH (pH_{KCl} - pH_{água}). Códigos de significância: ns = não significativo; . = significativo à 0,10; * = significativo à 0,05; ** = significativo à 0,01; *** = significativo à 0,001.

5. DISCUSSÃO

Usualmente a avaliação da estrutura do solo é realizada por meio de análises da densidade do solo, porosidade, distribuição de partículas e distribuição de agregados (GERKE et al., 2013), porém, devido ao solo ser um meio bastante heterogêneo e complexo, a avaliação da sua estrutura é sempre um desafio (MUNKHOLM; HECK; DEEN, 2013). No que respeita às diferenças entre o solo e a rizosfera, o desafio é ainda maior, visto que a interface raiz-solo não tem um limite bem definido (GREGORY, 2006), pois a rizosfera é muitas vezes conceituada como um pequeno volume de solo que se agrega a segmentos de raiz, mas, na realidade, ela se estende após a associação física de raiz-solo a um volume mais complexo de zonas sobrepostas e funcionalmente integradas (YORK et al., 2016).

Neste trabalho, os resultados das análises físicas da estabilidade estrutural dos agregados do solo (APDA, AMDA e EP) comprovaram as diferenças estruturais entre os ambientes rizosfera e solo (Figuras 12, 17 e 18), sendo que a AMDA representou melhor as diferenças avaliadas, pois a interação entre os ambientes (solo e rizosfera) e os tratamentos foi significativa ($p \leq 0,05$) (Tabela 3). Em um estudo anterior foi evidenciado que amostras oriundas de diferentes Latossolos apresentaram resultados de dispersão de argila mais expressivos e significativos com alta aplicação de energia mecânica do que com baixa aplicação de energia (FONTES et al., 1995).

Avaliando-se apenas os ambientes, a rizosfera apresentou menores teores médios ($p \leq 0,05$) de APDA do que o solo (Figura 12) e, apesar de não significativo, menores teores médios de APDA foram observados para a rizosfera de todas as rotações avaliadas (Figura 14). No entanto, os valores de APDA para todos os pontos amostrados neste trabalho resultaram em valores entre 0,082 e 0,462 NTU/g L⁻¹, indicando que o solo avaliado apresenta boa qualidade física tanto para a rizosfera, quanto para o solo. Isto porque, em um trabalho realizado na Polônia, estudando-se a relação da APDA com um índice da qualidade física do solo (índice S), cuja análise da APDA foi realizada pela mesma metodologia utilizada neste estudo, foi observada boa qualidade física do solo para valores de APDA menores do que 1 NTU/g L⁻¹ (CZYŻ; VIZITIU, 2012; CZYŻ; DEXTER, 2015).

Valores de AMDA foram superiores aos valores de APDA para todos os pontos amostrados, sendo que estes variaram de 4,836 a 21,539 NTU/g L⁻¹. No entanto, a rizosfera também apresentou teores médios de AMDA menores do que o solo para quase todos os tratamentos avaliados (Figura 17). Isto porque a estabilidade dos agregados em água diminui com o acréscimo da energia aplicada, o que é verificado pelo acréscimo nos teores de argila dispersa em

água quando a energia aplicada na agitação é aumentada (WATTS; DEXTER, 1997; CZYŻ; DEXTER, 2015). O que resultou em correlação positiva entre APDA e AMDA.

Estes resultados demonstram uma melhor estruturação da rizosfera em relação ao solo (CZYŻ; VIZITIU, 2012), visto que altos teores de argila dispersa em água indicam que a argila está fracamente ligada aos agregados do solo, de tal forma que este solo é suscetível a dispersão e cimentação durante os ciclos de umedecimento e secagem (ELMHOLT et al., 2000).

Em relação a análise da EP, diferenças significativas foram observadas somente entre as médias dos ambientes, sendo que a rizosfera apresentou maior percolação em relação ao solo (Figura 18). Averiguando cada tratamento isoladamente, apesar de não significativo, valores médios mais altos de percolação foram observados para quase todos os tratamentos, exceto para a rotação 1 (Figura 19), que foi a única que consistiu em duas rotações seguidas com leguminosa (trigo / soja / canola). Isso porque, no geral, gramíneas apresentam maior poder de agregação do que as leguminosas, devido ao seu sistema radicular (GREGORY, 2006).

A permeabilidade do solo tem relação com a estabilidade dos agregados e os resultados obtidos da EP indicam que os agregados da rizosfera são mais estáveis do que os agregados do solo (Figura 18). A EP, ao entrar em contato com a água, os agregados secos são molhados externamente e a água é puxada para dentro por força adesiva (potencial mátrico); durante este processo a água comprime o ar dentro dos poros dos agregados, isto é, sendo o agregado molhado de todos os lados, ocorre uma compressão do ar dentro dos poros, acumulando pressão (MBAGWUA; AUERSWALD, 1998). Com a geração desta pressão intra-agregados, os agregados podem se quebrar em microagregados que se deslocam para o fundo da coluna do solo e bloqueiam os poros condutores de água, ocorrendo redução do volume de água percolada por unidade de tempo (MBAGWUA; AUERSWALD, 1998; GUEDES FILHO et al., 2013), demonstrando que o solo é dispersivo e pode estar mais suscetível a erosão (PHAM et al., 2014).

Apesar de ser esperado (HALLETT; GORDON; BENGOUGH, 2003; WHALLEY et al., 2005; MORENO-ESPÍNDOLA et al., 2007; ZHU; CHENG, 2013), em alguns estudos avaliando-se a estabilidade dos agregados via peneiramento úmido, em área com rotação de culturas sob mesmo tipo de solo e mesma região, não foi observado efeito das diferentes rotações na estabilidade dos agregados (CASTRO FILHO et al., 2002; MADARI et al., 2005). Neste estudo, diferenças causadas pelas rotação de culturas sobre a agregação do solo foram detectadas por meio da avaliação da argila dispersa em água via turbidimetria, o que demonstra a maior sensibilidade desta análise em relação as análises de peneiramento úmido, que são largamente utilizadas (CASTRO FILHO; MUZILLI; PODANOSCHI, 1998; CASTRO FILHO et al., 2002; MADARI

et al., 2005; LIU; MA; BOMKE, 2005; AN; DARBOUX; CHENG, 2013, LAGHROUR et al., 2015).

Sabendo-se que o efeito das raízes no solo, pode ser cumulativo, ou perdurar por um tempo (TISDALL; OADES, 1982; SMALLA et al., 2001; BAUDOUIN; BENIZRI; GUCKERT, 2002), para a avaliação da influência das raízes sobre a agregação do solo, deve-se considerar toda a rotação, desde a instalação do experimento até o momento da coleta do solo. Esta influência das raízes das plantas ficou bastante evidente com a avaliação da AMDA, com a qual os tratamentos no ambiente solo não apresentaram diferenças significativas (Figura 15), enquanto no ambiente rizosfera as diferentes rotações adotadas resultaram em diferentes teores de AMDA (Figura 16), sendo que somente as rotações 2 e 4 não apresentaram diferença entre a AMDA no solo e na rizosfera (Figura 17). Esta não diferença para estas duas rotações pode ser devida ao fato de, pelo menos durante uma parte considerável do crescimento de algumas plantas, a maior parte do solo contido na camada de 0,00 - 0,10 m de profundidade pode ter sido considerado como rizosfera (GREGORY, 2006).

A Figura 16 mostra as diferenças ($p \leq 0,05$) na AMDA causadas pela influência dos diferentes sistemas radiculares nas diferentes rotações de cultura adotadas, lembrando que os dados estão com transformação inversa e a interpretação destes também deve ser inversa, de forma que, os maiores valores transformados representam menores valores reais (OSBORNE, 2002). As rotações 6 e 5 apresentaram menores teores ($p \leq 0,05$) de AMDA do que as rotações 2 e 4, igualando-se às rotações 1 e 3, que apresentaram diferença em relação à rotação 4, porém foram iguais à rotação 2 (Figura 16). Em relação à APDA, dentre os tratamentos avaliados, as rotações 5 e 6 apresentaram menores valores ($p \leq 0,05$) de argila dispersa em água em relação aos demais tratamentos (Figura 13). Desta forma, pode-se inferir, com base nos resultados da AMDA e da APDA, que as rotações 5 e 6 são as mais recomendadas do ponto de vista de sustentabilidade do solo.

A rotação 5 é a única que incluiu azevém nas culturas de inverno e isto pode ter acarretado os teores mais baixos de argila dispersa em água, demonstrando maior estabilidade estrutural. O azevém pode aumentar a estabilidade dos agregados em água gradualmente e o seu efeito na agregação do solo pode persistir por vários meses (TISDALL; OADES, 1982). Em um estudo da estabilidade dos agregados em água, por meio de peneiramento úmido, o solo cultivado com azevém apresentou maior teor de polissacarídeos do que o com centeio e cevada e a estabilidade dos agregados foi fortemente correlacionada com estes polissacarídeos, sendo que se obteve maior estabilidade dos agregados para o azevém e o centeio num primeiro momento, e somente para o azevém numa segunda amostragem (LIU; MA; BOMKE, 2005). Em relação ao trevo-branco

(*Trifolium repens*), observou-se que as raízes do azevém apresentaram maior população de hifas micorrízicas vasculares e arbusculares, sendo esta cultura mais eficiente na estabilização dos agregados do solo (TISDALL; OADES, 1979). Já a rotação 6 foi a única constituída de gramíneas em todas as estações, desde a implantação do experimento e, como já dito anteriormente, devido ao seu sistema radicular, as gramíneas apresentam maior poder de agregação (GREGORY, 2006).

Os valores de r (Tabela 4) demonstram correlações lineares fracas e moderadas entre alguns atributos avaliados tanto para a rizosfera, quanto para o solo, sendo que a rizosfera apresentou maior número de correlações ($p \leq 0,05$) do que o solo. A AMDA foi o atributo que apresentou o maior número e as mais altas correlações tanto no solo, como na rizosfera. No entanto, nenhuma correlação entre a APDA e os demais atributos na rizosfera apresentaram-se significativos, enquanto que no solo, a APDA correlacionou-se positivamente com P e K^+ , porém, as correlações com estes elementos nutrientes não foram observadas para AMDA e EP (Tabela 4).

Observa-se que com o aumento da APDA houve aumento nos teores de P. Esta correlação, ainda que baixa, pode ter ocorrido devido ao fato de a adsorção de P e a agregação do solo serem interdependentes (LIMA; ANDERSON; CURI, 2000), de forma que, eventualmente, a adsorção de fósforo pode interferir no equilíbrio de cargas, o que pode acarretar maior dispersão dos colóides do solo (SHANMUGANATHAN; OADES, 1983; ILG et al., 2008; PHAM et al., 2014). No entanto, P não apresentou correlação com AMDA (Tabela 4). Isto porque já foi evidenciado que a adição de P pode não exercer influência nos atributos físicos do solo, inclusive na dispersão dos agregados (ALBUQUERQUE et al., 2000), assim como foi demonstrado, para um Latossolo Vermelho, que o P não promoveu alterações na dispersão de argila no horizonte A, mas a causou no horizonte B (LIMA; ANDERSON; CURI, 2000). Em outro estudo, com diferentes tipos de Latossolo, também no município de Ponta Grossa - PR, correlação positiva entre a APDA e P também foi observada, quando este elemento não apresentou correlação significativa com a AMDA (PAULA, 2017).

Houve correlação positiva entre APDA e K^+ (Tabela 4), pois o aumento da concentração do cátion K^+ pode aumentar a dispersão da argila (IGWE, 2005). Apesar de não ser tão eficiente e amplamente utilizado como o Na^+ , o K^+ é considerado dispersante de argila e o hidróxido de potássio (KOH) ou o cloreto de potássio (KCl) é comumente utilizado em estudos envolvendo a dispersão química da argila (LIEFFERING; MCLAY, 1996; BATISTA et al., 2015), pois na análise granulométrica a sequência que representa a ordem esperada de eficiência como dispersantes é $Li^+ > Na^+ > K^+ > Rb^+ > Cs^+$ (CUNHA et al., 2014). Porém, com o incremento da energia aplicada na agitação mecânica, K^+ não mais apresentou efeito significativo sobre a argila dispersa em água, ou seja, K^+ não apresentou correlação com AMDA.

Foi observado que o aumento de areia resultou em redução da EP (Tabela 4). Apesar dos solos com maior teor de areia apresentarem maior drenagem do que os solos com maior teor de argila (DALY et al., 2015), sendo já observado correlação positiva da EP com a fração areia (SIEGRIST et al., 1998), na realidade a estabilidade dos agregados é menor em solos com maiores teores de areia, como demonstrado neste estudo por meio das correlações negativas de areia com a EP e com a AMDA.

O aumento dos teores da areia do solo também resultou em redução da AMDA na rizosfera, sendo que, no solo, esta correlação não foi significativa. Devido à ação abrasiva da areia durante a agitação, uma correlação positiva entre a argila dispersa em água e os teores de areia poderiam ser esperados, de forma que ao acrescentar areia à diferentes tipos de solo, os teores de argila dispersa em água tendem a aumentar (ASHFORD; SHIELDS; DREW, 1972). No entanto, possivelmente esta correlação negativa ocorreu devido ao solo apresentar teores de areia muito baixos (média de $0,097 \text{ kg kg}^{-1}$) em relação aos teores de argila (média de $0,666 \text{ kg kg}^{-1}$), de tal forma que a quantidade de areia, com a energia mecânica aplicada, não foi suficiente para provocar uma abrasão com consequente aumento nos teores de argila dispersa em água. Ainda mais se tratando de um Latossolo, pois solos desta classe possuem maior estabilidade estrutural, devido aos altos teores de óxidos de ferro e de alumínio, que promovem maior agregação do solo (SILVA et al.; 1998; FERREIRA; FERNANDES; CURI, 1999); e ainda com altos teores de CO (média de $52,02 \text{ g kg}^{-1}$ na rizosfera), que também auxilia grandemente na estabilidade dos agregados do solo (TISDAL; OADES, 1982). Assim, na obtenção da argila dispersa em água, na qual não há utilização de dispersante químico e, considerando a baixa energia aplicada na sua agitação em relação à energia aplicada para obtenção da argila total ou mesmo da argila dispersa em água por outras metodologias, a correlação observada é coerente, mesmo porque, maiores teores da fração areia, implicam em menores teores da fração argila e/ou silte, havendo menos argila para ser dispersa. Possivelmente por esta mesma razão observou-se também correlação negativa do silte com a AMDA (Tabela 4).

Por outro lado, a AMDA, no ambiente solo, correlacionou-se positivamente com os teores de argila, enquanto que, na rizosfera, esta correlação não foi significativa (Tabela 4). Poder-se-ia esperar que a estabilidade dos agregados aumentasse com o acréscimo dos teores de argila total, visto que a argila tem importância na estabilização dos agregados do solo, agindo como agente cimentante (TISDALL; OADES, 1982; BRONICK; LAL, 2005). Todavia, solos com elevados teores de argila podem apresentar elevados teores de argila dispersa em água. Tanto isso é verdade que foi observada correlação positiva entre a argila dispersa em água e o teor de argila para solos com diferentes classes texturais (IGWE, 2005). Isto porque o efeito da argila na

estabilidade dos agregados do solo pode variar com o tipo de argila existente no solo. Neste estudo, todos os pontos amostrados são de mesma classe textural, mas com pequenas e não significativas diferenças nos teores de argila (Figura 20). Assim, considerando o mesmo nível de aplicação de energia para todos os pontos, maiores teores de argila em um dado ponto apresentaram maior dispersão de argila neste ponto.

Foi observado que o aumento dos teores de CO acarretou redução da AMDA, tanto para o solo quanto para a rizosfera (Tabela 4). Isto ocorreu porque o CO exerce diversas influências positivas na agregação do solo, agindo como um dos principais agentes cimentantes dos agregados (TISDAL; OADES, 1982; WATTS, DEXTER, 1997; BRONICK; LAL, 2005; COSENTINO; CHENU; LE BISSONNAIS, 2006; GREGORY, 2006). Além disto, o aumento de CO ao solo, estimula a atividade microbiana, que também exerce influência positiva sobre a estabilidade dos agregados do solo (COSENTINO; CHENU; LE BISSONNAIS, 2006; SHARMA et al., 2015; BLANKINSHIP et al., 2016).

A AMDA teve seus valores acrescidos ($p \leq 0,05$), tanto para a rizosfera quanto para o solo, com o aumento dos teores de Al^{3+} e os acréscimos de Mg^{2+} e Ca^{2+} demonstraram redução na AMDA, enquanto que o $pH_{\text{água}}$ correlacionou-se negativamente com os valores de AMDA, tanto no solo como na rizosfera. Ao contrário do observado, num estudo na região sul do Brasil, realizado com Latossolo Vermelho distrófico típico, foi verificado que a adição de calcário em superfície aumentou o pH e a eletronegatividade do solo, resultando em dispersão da argila (NUNES et al., 2018). Isso deve-se ao fato de que a calagem aumenta o pH do solo, gerando cargas negativas dependentes do pH, que podem reduzir o efeito flocculante dos cátions trivalentes com maior espessura da dupla camada difusa, como é o caso do Al^{3+} e, conseqüentemente, estes solos podem ficar suscetíveis à desagregação física (PRADO, 2003), pois o Al^{3+} , que mantinha a dupla camada comprimida é substituído por Ca^{2+} e Mg^{2+} no complexo de troca, provocando um espessamento dessa camada (FONTES et al., 1995; SPERA et al., 2008). Todavia, os efeitos desta dispersão química provocada pela calagem tendem a prevalecer apenas por um curto período, pois, com o aumento da produção de fitomassa e da adição de CO ocorre maior estabilização dos agregados (SPERA et al., 2008). Além disso, a própria calagem estimula também a atividade microbiana e o desenvolvimento das raízes (AZEVEDO; BONUMÁ, 2004), que também influenciam positivamente a agregação do solo (BRONICK; LAL, 2005; COSENTINO; CHENU; LE BISSONNAIS, 2006; SHARMA et al., 2015; BLANKINSHIP et al., 2016; DEMENOIS et al., 2018).

A EP apresentou-se menor para os pontos com maior Mg^{2+} , no ambiente rizosfera (Tabela 4), demonstrando que o maior teor de Mg^{2+} na rizosfera acarretou menor estabilidade dos

agregados avaliados por esta metodologia. Isto possivelmente ocorreu porque o acréscimo nos teores de Mg^{2+} pode reduzir a infiltração e a condutividade hidráulica do solo (VYSHPOLSKY et al., 2008), sendo esperado que reduza também a EP.

Observou-se correlação negativa entre a EP e o ΔpH na rizosfera. Isto indica que a agregação do solo é favorecida com a redução do ΔpH , como foi também demonstrado pela correlação negativa entre o grau de floculação e o ΔpH em um estudo com Latossolo Vermelho distroférico muito argiloso (ALBUQUERQUE et al., 2005).

Correlações entre os atributos químicos e $CTC_{pH\ 7,0}$, SB, $H+Al$, V% e m% não foram discutidas porque condizeram com as correlações dos cátions utilizados em suas obtenções.

As correlações fracas e moderadas apresentadas na Tabela 4 possivelmente não foram mais altas pela grande variabilidade apresentada na área, evidenciada pelos altos CVs observados (Apêndice). Além disso, a composição química do solo afeta a estabilidade dos agregados por promover floculação ou dispersão das partículas de argila, porém o efeito observado é resultado de uma combinação de inúmeros atributos e processos que ocorrem no solo, o que torna o estudo da relação do balanço de cargas com a estabilidade do solo bastante complexo.

Foi observado, durante as coletas, a presença de calcário em superfície de forma não homogênea (Figura 21). Isto ocorreu devido a última e recente calagem realizada na área experimental, que é de sistema de plantio direto, e possivelmente afetou os resultados aumentando a variabilidade experimental. Além disso, a calagem pode exercer influência sobre algumas propriedades eletroquímicas do solo, devido a alteração da composição química do solo, o que pode afetar algumas propriedades físicas do solo (ALBUQUERQUE et al., 2000; PRADO, 2003; ROSA JÚNIOR et al., 2006; SPERA et al., 2008).

Figura 21 - Presença de calcário em superfície numa amostra da rizosfera.

Apesar disso, a análise granulométrica apresentou diferença ($p \leq 0,05$) para os teores de areia, não havendo esta diferença para as demais frações (Figura 21). No entanto, é importante salientar que, na análise granulométrica, deveria ter sido adotado algum pré-tratamento, pois os teores de silte avaliados foram altos, incompatíveis com o grau de intemperismo dos Latossolos. Isto ocorre devido à constituição de uma fração denominada pseudo-silte (VITORINO et al., 2003), causada pelo fato da dispersão adequada da amostra de solo consistir em um fator limitante na obtenção da granulometria de alguns Latossolos com altos teores de óxidos de ferro e de alumínio (DONAGEMMA, 2000) ou devido, neste caso, principalmente aos altos teores de CO (média de $50,64 \text{ g kg}^{-1}$), que atua como agente da agregação do solo impedindo a completa dispersão, sendo necessário um pré-tratamento com peróxido de hidrogênio (H_2O_2) (MIYAZAWA; BARBOSA, 2011).

Outro ponto observado foi em relação ao espaçamento das plantas adotado no campo (Figura 22) que, muito embora sigam as recomendações, dificultam estudos como este. No entanto, ainda assim, obtiveram-se resultados significativos que comprovam a maior agregação na rizosfera em relação ao solo.

Figura 22 - Culturas do inverno de 2017, no momento em que a amostragem do solo e da rizosfera foi realizada. A) Rotação 1: trigo / soja / canola; B) Rotação 2: trigo / soja / aveia-preta; C) Rotação 3: aveia-preta + centeio + ervilhaca / trigo mourisco / aveia-preta + ervilhaca; D) Rotação 4: trigo / soja / trigo; E) Rotação 5: aveia + azevém / soja / aveia-preta + azevém; F) Rotação 6: aveia-preta + tremço azul / milho / aveia.

6. CONCLUSÃO

A rizosfera apresentou agregados mais estáveis em água do que o solo fora dela, o que foi evidenciado pelo estudo da argila prontamente dispersa em água, argila mecanicamente dispersa em água e estabilidade de percolação.

A argila mecanicamente dispersa em água foi mais sensível na detecção das diferenças estruturais entre rizosfera e solo.

A rotação adotada influencia a agregação do solo, sendo necessário mais estudos neste sentido.

Baseando-se tanto na argila prontamente dispersa em água, quanto na argila mecanicamente dispersa em água, as rotações 5 (aveia + azevém / soja / aveia-preta + azevém) e 6 (aveia-preta + tremoço azul / milho / aveia) mostraram-se mais sustentáveis do ponto de vista da conservação do solo, por apresentarem menores teores de argila dispersa em água, ou seja, melhor estruturação do solo.

Correlações entre os atributos físicos indicadores da estabilidade dos agregados do solo (argila prontamente dispersa em água, argila mecanicamente dispersa em água e estabilidade de percolação) e os demais atributos físico-químicos apresentaram-se mais significativas para argila mecanicamente dispersa em água.

Apesar de algumas correlações apresentarem-se significativas apenas para a rizosfera ou apenas para o solo, nenhum dos atributos físico-químicos correlacionados com a argila prontamente dispersa em água, a argila mecanicamente dispersa em água e a estabilidade de percolação apresentaram comportamento contrário entre estes ambientes.

REFERÊNCIAS

- Albuquerque, J.A., C. Bayer, P.R. Ernani, E.C. Fontana. 2000. Propriedades físicas e eletroquímicas de um Latossolo Bruno afetadas pela calagem. *Rev. Bras. Cienc. Solo*, 24:295-300. doi:10.1590/S0100-06832000000200006
- Albuquerque, J.A.; J. Argenton, C. Bayer, L.P. Wildner, M.A.G. Kuntze. 2005. Relação de atributos do solo com a agregação de um Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo e plantas de verão para cobertura do solo. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, 29:415-424. doi:10.1590/S0100-06832005000300012.
- An, S., F. Darboux, M. Cheng. 2013. Revegetation as an efficient means of increasing soil aggregate stability on the Loess Plateau (China). *Geoderma*, 209-210:75-85. doi:10.1016/j.geoderma.2013.05.020
- Asano, M., R. Wagai. 2014. Evidence of aggregate hierarchy at micro- to submicron scales in an allophanic andisol. *Geoderma*, 216:62-74. doi:10.1016/j.geoderma.2013.10.005
- Ashford, E.M., L.G. Shields, J.V. Drew. 1972. Influence of sand on the amount of water-dispersible clay in soil. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 36:848-849.
- Azevedo, A.C., A.S. Bonumá. 2004. Partículas coloidais, dispersão e agregação em Latossolos. *Cienc. Rural*, 34:609-617. doi:10.1590/S0103-84782004000200046
- Batista, A.M., A.R.S. Viana, B.M. Silva, S.P. Caixeta, S.G. Moreira. 2015. Análise granulométrica influenciada pela qualidade da água e dispersantes químicos. *Enciclopédia Biosfera*, 11:127-133.
- Baudoin, E., E. Benizri, A. 2002. Guckert. Impact of growth stage on the bacterial community structure along maize roots, as determined by metabolic and genetic fingerprinting. *Appl. Soil Ecol.*, 19:135-145. doi:10.1016/S0929-1393(01)00185-8
- Blankinship, J.C., S.J. Fonte, J. Six, J.P. Chimel. 2016. Plant versus microbial controls on soil aggregate stability in a seasonally dry ecosystem. *Geoderma*, 272:39-50. doi:10.1016/j.geoderma.2016.03.008
- Blouin, M., M.E. Hodson, E.A. Delgado, G. Baker, L. Brussaard, K.R. Butt, J. Dai, L. Dendooven, G. Peres, J.E. Tondoh, D. Cluzeau, J.J. Brun. 2013. A review of earthworm impact on soil function and ecosystem services. *Eur. J. Soil. Sci.*, 64:161-182. doi:10.1111/ejss.12025

- Bottinelli, N., P. Jouquet, Y. Capowiez, P. Podwojewski, M. Grimaldi, X. Peng,. 2015. Why is the influence of soil macrofauna on soil structure only considered by soil ecologists? *Soil and Tillage Res.*, 146:118-124. doi:10.1016/j.still.2014.01.007
- Bronick, C.J., R. Lal. 2005. Soil structure and management: A review. *Geoderma*, 124:3-22. doi:10.1016/j.geoderma.2004.03.005
- Cammeraat, E.L.H., A.C. Risch,. 2008. The impact of ants on mineral soil properties and processes at different spatial scales. *J. Appl. Entomol.*, 132:285-294. doi:10.1111/j.1439-0418.2008.01281.x
- Cañasveras, J.C., V. Barrón, M.C. Del Campillo, J. Torrent, J.A. Gómez. 2010. Estimation of aggregate stability indices in Mediterranean soils by diffuse reflectance spectroscopy. *Geoderma*, 158:78-84. doi:10.1016/j.geoderma.2009.09.004
- Castro Filho, C., O. Muzilli; A. L. Podanoschi. 1998. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num latossolo roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. *Rev. Bras. Cienc. Solo*, 22:527-538. doi:10.1590/S0100-06831998000300019
- Castro Filho, C., A. Lourenço, M.F. Guimarães, I.C.B. Fonseca. 2002. Aggregate stability under different soil management systems in a red latosol in the state of Parana, Brazil. *Soil and Tillage Res.*, 65:45-51. doi: 10.1016/S0167-1987(01)00275-6
- Caviglione, J.H., L.R.B. Kiihl, P.H. Caramori, D. Oliveira. Cartas climáticas do Paraná. Londrina, IAPAR, 2000. CD-ROM.
- Cosentino, D., C. Chenu, Y. Le Bissonnais. 2006. Aggregate stability and microbial community dynamics under drying-wetting cycles in a silt loam soil. *Soil Biol. Biochem.*, 38:2053-2062. doi: 10.1016/j.soilbio.2005.12.022
- Cunha J.C., M.B.G.S. Freire, H.A. Ruiz, R.B.A. Fernandes, V.H. Alvarez V. 2014. Comparação de dispersantes químicos na análise granulométrica de solos do Estado de Pernambuco. *R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental*, 18:783-789. doi: 10.1590/1807-1929/agriambi.v18n08p783-789
- Czarnes, S., A.R. Dexter, F. Bartoli. Wetting and drying cycles in the maize rhizosphere under controlled conditions. *Mechanics of the root-adhering soil*. 2000. *Plant Soil*, 221:253-271. doi:10.1023/A:1004747323220

- Czyż, E.A., A.R. Dexter. 2008. Soil physical properties under winter wheat grown with different tillage systems at selected locations. *Int. Agrophys.*, 22:191-200.
- Czyż, E.A., A.R. Dexter. 2015. Mechanical dispersion of clay from soil into water: Readily-dispersed and spontaneously-dispersed clay. *Int. Agrophys.*, 29:31-37. doi:10.1515/intag-2015-0007
- Czyż, E.A., O.P. Vizitiu. 2012. Soil physical quality in relation to readily-dispersible clay, friability and saturated hydraulic conductivity. In: *Practical Applications of Environmental Research* (Eds J. Kostecka, J. Kaniuczak), Science for Economy, University of Rzeszów, Poland.
- Daly, K.R., S.J. Mooney, M.J. Bennett, N.M.J. Crout, T. Roose, S.R. Tracy. 2015. Assessing the influence of the rhizosphere on soil hydraulic properties using X-ray computed tomography and numerical modelling. *J. Exp. Bot.*, 66:2305-2314. doi:10.1093/jxb/eru509
- Demenois, J., F. Carriconde, P. Bonaventure, J.L. Maeght, A. Stokes, F. Reyf. 2018. Impact of plant root functional traits and associated mycorrhizas on the aggregate stability of a tropical Ferralsol. *Geoderma*, 312:6-16. doi: 10.1016/j.geoderma.2017.09.033
- Denef, K., J. Six, H. Bossuyt, S.D. Frey, E.T. Elliott, R. Merckx, K. Paustian. 2001. Influence of dry-wet cycles on the interrelationship between aggregate, particulate organic matter, and microbial community dynamics. *Soil Biol. Biochem.*, 33:1599-1611, 2001. doi: 10.1016/S0038-0717(01)00076-1
- Dexter, A.R., E.A. Czyż. 2000. Effects of soil management on the dispersibility of clay in a sandy soil. *Int. Agrophys.*, 14:269-272.
- Dexter, A.R., G. Richard, J. Davy, M. Hardy, O. Duval. 2011. Clay dispersion from soil as a function of antecedent water potential. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 75:444-455. doi: doi:10.2136/sssaj2010.0088
- Donagema, G.K., D.V.B. Campos, S.B. Calderano, W.G. Teixeira, J.H.M. Viana. 2011. *Manual de métodos de análise de solos*. 2 ed. Rio de Janeiro:Embrapa Solos. 230p.
- Donagema, G. K. 2000. *Pré-tratamento na análise textural visando a minimização do pseudo-silte em Latossolos de Minas Gerais [Dissertação]*. Universidade Federal de Viçosa. 89p.
- Elmholt, S., L.J. Munkholm, K. Debosz, P. Schjønning. 2000. Biotic and abiotic binding and bonding mechanisms in soils with long-term differences in management. In: *Elmholt, S., B.*

- Stenberg, A. Grønlund, V. Nuutinen. (Eds.) DIAS report, Danish Institute of Agricultural Sciences, 38:53-62.
- Embrapa. 2006. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 2 ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos.
- Embrapa. 2012. Comunicado Técnico 66. Padronização de métodos para análise granulométrica no Brasil. 1 ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 11p.
- Ferreira, M.M., B. Fernandes, N. Curi. 1999. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de latossolos da região sudeste do Brasil. *Rev. Bras. Cienc. Solo*, 23:515-524. doi: 10.1590/S0100-06831999000300004
- Fonte, S.J., D.C. Quintero, E. Velásquez, P. Lavelle. 2012. Interactive effects of plants and earthworms on the physical stabilization of soil organic matter in aggregates. *Plant Soil*, 359:205-214. doi: 10.1007/s11104-012-1199-2
- Fontes, M.P.F., G.B. Gjorup, R.C. Alvarenga, P.G.S. Nascif. 1995. Calcium salts and mechanical stress effects on water-dispersible clay of oxisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59:224-227. doi:10.2136/sssaj1995.03615995005900010034x
- Gerke, K.M., E.B. Skvortsova, D.V. Korost. 2012. Tomographic method of studying soil pore space: Current perspectives and results for some Russian soils. *Eurasian Soil Science*, 45:700-709. doi:10.1134/S1064229312070034
- Gregory, P.J., P. Hinsinger. 1999. New approaches to studying chemical and physical changes in the rhizosphere: an overview. *Plant Soil*, 211:1-9. doi:10.1023/A:1004547401951
- Gregory, P.J. 2006. Roots, rhizosphere and soil: The route to a better understanding of soil science? *Eur. J. Soil Sci.*, 57:2-12. doi:10.1111/j.1365-2389.2005.00778.x
- Guedes Filho, O., A.P. Silva, N.F.B. Giarola, C.A. Tormena. 2013. Structural properties of the soil seedbed submitted to mechanical and biological chiseling under no-tillage. *Geoderma*, Volumes 204-205:94-101. doi: 10.1016/j.geoderma.2013.04.017
- Guo, J., R.L. McCulley, T.D. Phillips, D.H. McNear. 2016. Fungal endophyte and tall fescue cultivar interact to differentially effect bulk and rhizosphere soil processes governing C and N cycling. *Soil Biol. Biochem.*, 101:165-174. doi:10.1016/j.soilbio.2016.07.014

- Hallett, P.D., D.C. Gordon, A.G. Bengough. 2003. Plant influence on rhizosphere hydraulic properties: Direct measurements using a miniaturized infiltrometer. *New Phytol.*, 157:597-603. doi: 10.1046/j.1469-8137.2003.00690.x
- Han, E., T. Kautz, U. Perkons, D. Uteau, S. Peth, N. Huang, R. Horn, U. Köpke, U. 2015. Root growth dynamics inside and outside of soil biopores as affected by crop sequence determined with the profile wall method. *Biol. Fertil. Soils*, 51:847-856. doi:10.1007/s00374-015-1032-1
- Hosseini, F., M.R. Mosaddeghi, M.A. Hajabbasi, M.R. Sabzalian. 2015. Influence of tall fescue endophyte infection on structural stability as quantified by high energy moisture characteristic in a range of soils. *Geoderma*, 249-250:87-99, doi:10.1016/j.geoderma.2015.03.013
- Igwe, C.A. 2005. Erodibility in relation to water-dispersible clay for some soils of eastern Nigeria. *Land Degrad. Develop.*, 16:87-96. doi: 10.1002/ldr.647
- Ilg, K., P. Dominik, M. Kaupenjohann, J. Siemens. 2008. Phosphorus-induced mobilization of colloids: model systems and soils. *Eur. J. Soil Sci.*, 59:233-246. doi:10.1111/j.1365-2389.2007.00982.x
- Jouquet, P., S. Chintakunta, N. Bottinelli, S. Subramanian, L. Caner. 2016. The influence of fungus-growing termites on soil macro and micro-aggregates stability varies with soil type. *App. Soil Ecol.*, 101:117-123, 2016. doi:10.1016/j.apsoil.2016.02.001
- Jouquet, P., S. Traoré, C. Choosai, C. Hartmann, D. Bignell. 2011. Influence of termites on ecosystem functioning. Ecosystem services provided by termites. *Eur. J. Soil Biol.*, 47:215-222. doi: 10.1016/j.ejsobi.2011.05.005
- Kay, B.D., A.R. Dexter. 1990. Influence of aggregate diameter, surface area and antecedent water content on the dispersibility of clay. *Can. J. Soil Sci.*, 70:655-671. doi: 10.4141/cjss90-068
- Kuzyakov, Y., P.W. Hill, D.L. Jones. 2007. Root exudate components change litter decomposition in a simulated rhizosphere depending on temperature. *Plant Soil*, 290:293-305. doi:10.1007/s11104-006-9162-8
- Laghrou, M., R. Moussadek, M. Mekkaoui, A. Zouahri, R. Dahan, M. El Mourid. 2015. Impact du Semis Direct sur les propriétés physiques d'un sol argileux au Maroc Central. *Journal of Materials and Environmental Science*, 6:391-396.

- Lieffering, R.E., C.D.A. McLay. 1996. The effect of strong hydroxide solutions on the stability of aggregates and hydraulic conductivity of soil. *Eur. J. Soil Sci.*, 47:43-50. doi:10.1111/j.1365-2389.1996.tb01370.x
- Li, L., J. Sun, F. Zhang, T. Guo, X. Bao, A. Smith, S. Smith. Root distribution and interactions between intercropped species. *Oecologia*, 147:280-290, 2006. doi: 10.1007/s00442-005-0256-4
- Lima, J.M., S.J. Anderson, N. Curi. 2000. Phosphate-induced clay dispersion as related to aggregate size and composition in Hapludoxs. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64:892-897. doi: 10.2136/sssaj2000.643892x
- Liu, A., B.L. Ma, A.A. Bomke. 2005. Effects of cover crops on soil aggregate stability, total organic carbon, and polysaccharides. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 69:2041-2048. doi:10.2136/sssaj2005.0032
- Madari, B., P.L.O.A. Machado, E. Torres, A.G. Andrade, L.I.O. Valencia. 2005. No tillage and crop rotation effects on soil aggregation and organic carbon in a Rhodic Ferralsol from southern Brazil. *Soil Tillage Res.*, 80:185-200. doi:10.1016/j.still.2004.03.006
- Martin, S. 2010. Quantifying the effect of microbial diversity and plant roots on soil structural development. [Thesis]. University of Nottingham. 373p.
- Mbagwu, J.S.C., K. Auerswald. 1999. Relationship of percolation stability of soil aggregates to land use, selected properties, structural indices and simulated rainfall erosion. *Soil Tillage Res.*, 50:197-206. doi: 10.1016/S0167-1987(99)00006-9
- McCully, M.E. 1999. Roots in soil: Unearthing the complexities of roots and their rhizospheres. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.*, 50:695-718. doi: 10.1146/annurev.arplant.50.1.695
- Mele, P.M., I.A.M. Yunusa, K.B. Kingston, M.A. Rab. 2003. Response of soil fertility indices to a short phase of Australian woody species, continuous annual crop rotations or a permanent pasture. *Soil Tillage Res.*, 72:21-30. doi: 10.1016/S0167-1987(03)00063-1
- Milleret, R., R.C. Le Bayon, J.M. Gobat. 2009. Root, mycorrhiza and earthworm interactions: Their effects on soil structuring processes, plant and soil nutrient concentration and plant biomass. *Plant Soil*, 316:1-12. doi:10.1007/s11104-008-9753-7
- Miyazawa, M., Barbosa, G.M.C. 2011. Efeitos da agitação mecânica e matéria orgânica na análise granulométrica do solo. *Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambient.*, 15:680-685.

- Moreno-Espíndola, I.P.; F. Rivera-Becerril, M.J. Ferrara-Guerrero, F. De León-González. 2007. Role of root-hairs and hyphae in adhesion of sand particles. *Soil Biol. Biochem.*, 39:2520-2526. doi:10.1016/j.soilbio.2007.04.021
- Munkholm, L.J., R.J. Heck, B. Deen. 2013. Long-term rotation and tillage effects on soil structure and crop yield. *Soil Tillage Res.*, 127:85-91. doi:10.1016/j.still.2012.02.007
- Nazeri, N.K., H. Lambers, M. Tibbett, M.H. Ryan. 2014. Moderating mycorrhizas: Arbuscular mycorrhizas modify rhizosphere chemistry and maintain plant phosphorus status within narrow boundaries. *Plant Cell Environ.*, 37:911-921. doi:10.1111/pce.12207
- Nunes, M.R., A.P. Silva, J.E. Denardin, N.F.B. Giarola, C.M.P. Vaz, H.M. van Es, A.R. Silva. 2017. Soil chemical management drives structural degradation of Oxisols under a no-till cropping system. *Soil Res.*, 55:819-831. doi:10.1071/SR17063
- Nunes, M.R., C.M.P. Vaz, J.E. Denardin, H.M. van Es, P.L. Libardi, A.P. Silva. 2018. Physicochemical and structural properties of an Oxisol under the addition of straw and lime. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 81:1328-1339. doi:10.2136/sssaj2017.07.0218
- Ogle, S.M., F.J. Breidt, K. Paustian. 2005. Agricultural management impacts on soil organic carbon storage under moist and dry climatic conditions of temperate and tropical regions. *Biogeochemistry*, 72:87-121. doi:10.1007/s10533-004-0360-2
- Osborne, J.W. 2002. The effects of minimum values on data transformations. Annual Meeting of the American Educational Research Association, 7p.
- Paula, A.L. 2017. Argila dispersa em água em Latossolos após longo tempo de plantio direto [Dissertação]. Universidade Estadual de Ponta Grossa. 66p.
- Pham, D.V., M. Ishiguro, H.T.T. Tran, T. Sato. 2014. Influence of phosphate sorption on dispersion of a Ferralsol, *Soil Sci. Plant Nutr.*, 60:356-366. doi:10.1080/00380768.2014.902730
- Pino, F.A. 2014. A questão da não normalidade: Uma revisão. *Rev. de Economia Agrícola*, 61:17-33.
- Prado, R.M. 2003. A calagem e as propriedades físicas de solos tropicais: Revisão de literatura. *Rev. biociênc.*, 9:7-16.

- Rosa Junior, E.J., R.M.G. Martins, Y.B.C.J. Rosa, C. Cremon. 2006. Calcário e gesso como condicionantes físico e químico de um solo de cerrado sob três sistemas de manejo. *Pesqui. Agropecu. Trop.*, 36:37-44.
- Shanmuganathan, R.T., J.M. Oades. 1983. Influence of anions on dispersion and physical properties of the a horizon of a red-brown earth. *Geoderma*, 29:257-277. doi: 10.1016/0016-7061(83)90091-5
- Sharma, P., G. Singh, S.K. Sarkar; R.P. 2015. Singh. Improving soil microbiology under rice-wheat crop rotation in Indo-Gangetic Plains by optimized resource management. *Environ. Monit. Assess.*, 187:150, doi:10.1007/s10661-015-4338-4
- Shi, J.Y., X.F. Yuan, H.R. Lin, Y.Q. Yang, Z.Y. Li. 2011. Differences in soil properties and bacterial communities between the rhizosphere and bulk soil and among different production areas of the medicinal plant *Fritillaria thunbergii*. *Int. J. Mol. Sci.*, 12:3770-3785. doi:10.3390/ijms12063770
- Siegrist, S., D. Schaub, L. Pfiffner, P. Mäder. 1998. Does organic agriculture reduce soil erodibility? The results of a long-term field study on loess in Switzerland. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 69: 253-264. doi:10.1016/S0167-8809(98)00113-3
- Silva, M.L.N., P. Blancaneaux, N. Curi, J.M. Lima, J.J.G.S.M. Marques, A.M. Carvalho. 1998. Estabilidade e resistência de agregados de Latossolo Vermelho-escuro cultivado com sucessão milho-adubo verde. *Pesq. Agropec. Bras.*, 33:97-10.
- Six, J., H. Bossuyt, S. Degryze, K. Deneff. 2004. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil Tillage Res.*, 79:7-31. doi:10.1016/j.still.2004.03.008
- Smalla, K., G. Wieland, A. Buchner, A. Zock, J. Parzy, S. Kaiser, N. Roskot, H. HEUER, G. BERG. 2001. Bulk and rhizosphere soil bacterial communities studied by denaturing gradient gel electrophoresis : Plant-dependent enrichment and seasonal shifts revealed. *Appl. Environ. Microbiol.*, 67:4742-4751. doi: 10.1128/AEM.67.10.4742-4751.2001
- Sorokin, A.S., K.N. Abrosimov, M.P. Lebedeva, G.S. Kust. 2016. Composition and structure of aggregates from compacted soil horizons in the southern steppe zone of European Russia. *Eurasian Soil Science*, 49:326-337. doi:10.1134/S1064229316030108

- Spera, S.T., J.E. Denardin, P.A.V. Escosteguy, H.P. Santos, E.A. Figueroa. 2008. Dispersão de argila em microagregados de solo incubado com calcário. *Rev. Bras. Cienc. Solo*, 32:2613-2620. doi: 10.1590/S0100-06832008000700002
- Stirzaker, R.J., J.B. Passioura, Y. Wilms. 1996. Soil structure and plant growth: Impact of bulk density and biopores. *Plant Soil*, 185:151-162. doi: 10.1007/BF02257571
- Struecker, J., M. Kaiser, J. Dyckmans, R. Georg. 2016. Maize root decomposition in subsoil horizons of two silt loams differing in soil organic C accumulation due to colluvial processes. *Geoderma*, 283:101-109. doi: 10.1016/j.geoderma.2016.07.026
- Vyshpolsky F., M. Qadir, A. Karimov, K. Mukhamedjanov, U. Bekbaev, R. Paroda, A. Aw-Hassan, F. Karajeh. 2008. Enhancing the productivity of high-magnesium soil and water resources in Central Asia through the application of phosphogypsum. *Land Degradation & Development*, 19:45-56. doi:10.1002/ldr.814
- Tisdall, J.M., J.M. OADES. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, 33:141-163. doi:10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.x
- Tisdall, J.M., J.M. Oades. 1979. Stabilization of soil aggregates by the root systems of ryegrass. *Australian Journal of Soil Research*, 17:429-441. doi: 10.1071/SR9790429
- United Nations. 2017. World Soil Day: 5 December. Disponível em: <<http://www.un.org/en/events/soilday/>>. Acesso em: 18 jan. 2018.
- Vitorino, A.C.; M.M. Ferreira, N. Curi, J.M. Lima, M.L.N. Silva, P.E.F. MOTTA. 2003. Mineralogia, química e estabilidade de agregados do tamanho de silte de solos da Região Sudeste do Brasil. *Pesq. Agropec. Bras.*, 38:133-141. doi: 10.1590/S0100-204X2003000100018
- Wang, X., C. Tang, J. Severi, C.R. Butterly, J.A. Baldock. 2016. Rhizosphere priming effect on soil organic carbon decomposition under plant species differing in soil acidification and root exudation. *New Phytol.*, 211:864-873. doi:10.1111/nph.13966
- Watts, C.W., A.R. Dexter. 1997. The influence of organic matter in reducing the destabilization of soil by simulated tillage. *Soil Tillage Res.*, 42:253-275. doi:10.1016/S0167-1987(97)00009-3

- Whalley, W.R., B. Riseley, P.B. Leeds-Harrison, N.R.A. Bird, P.K. Leech, W.P. Adderley. 2005. Structural differences between bulk and rhizosphere soil. *Eur. J. Soil Sci.*, 56:353-360. doi: 10.1111/j.1365-2389.2004.00670.x
- Yanai, R.D., H. Majdi, B.B. Park. 2003. Measured and modelled differences in nutrient concentrations between rhizosphere and bulk soil in a Norway spruce stand. *Plant Soil*, 257:133-142. doi: 10.1023/A:1026257508033
- York, L.M., A. Carminati, S.J. Mooney, K. Ritz, M.J. Bennett. 2016. The holistic rhizosphere: integrating zones, processes, and semantics in the soil influenced by roots. *J. Exp. Bot.*, 67:3629-3643. doi:10.1093/jxb/erw108
- Zanatta, J.A., C. Bayer, J. Dieckow, F.C.B. Vieira, J. Mielniczuk. 2007. Soil organic carbon accumulation and carbon costs related to tillage, cropping systems and nitrogen fertilization in a subtropical Acrisol. *Soil Tillage Res.*, 94: 510-519. doi:10.1016/j.still.2006.10.003
- Zarebanadkouki, M., M.A. Ahmed, A. Carminati. 2016. Hydraulic conductivity of the root-soil interface of lupin in sandy soil after drying and rewetting. *Plant Soil*, 398:267-280. doi:10.1007/s11104-015-2668-1
- Zhu, B., W. Cheng. 2013. Impacts of drying-wetting cycles on rhizosphere respiration and soil organic matter decomposition. *Soil Biol. Biochem.*, 63:89-96, 2013. doi:10.1016/j.soilbio.2013.03.027
- Zhu, F., J. Zhou, S. XUE, W. HARTLEY, C. WU, Y. GUO. 2016. Aging of bauxite residue in association of regeneration: A comparison of methods to determine aggregate stability & erosion resistance. *Ecol. Eng.*, 92:47-54. doi:10.1016/j.ecoleng.2016.03.025

APÊNDICE

Tabela A. Análise descritiva dos dados referentes aos atributos físico-químicos avaliados.

Variável	Ambiente	n	Mínimo	1º quartil	Mediana	Média	3º quartil	Máximo	Variância	DP	Assimetria	Curtose	CV%
APDA (NTU/g L ⁻¹)	Rizosfera	72	0,082	0,114	0,128	0,137	0,160	0,228	0,001	0,034	0,742	-0,128	24,996
	Solo	72	0,088	0,127	0,155	0,170	0,190	0,462	0,003	0,062	2,070	6,703	36,722
	Ambos	144	0,082	0,117	0,145	0,153	0,173	0,462	0,002	0,052	2,230	8,885	34,378
AMDA (NTU/g L ⁻¹)	Rizosfera	72	4,836	6,281	7,446	8,190	9,557	21,539	6,847	2,617	2,195	8,507	31,950
	Solo	72	5,706	7,281	8,608	9,585	11,203	19,998	9,422	3,070	1,249	1,449	32,025
	Ambos	144	4,836	6,774	8,281	8,888	10,236	21,539	8,568	2,927	1,581	3,386	32,934
EP (mL min ⁻¹)	Rizosfera	72	6,758	13,662	16,925	17,041	20,036	30,348	23,009	4,797	0,418	0,045	28,148
	Solo	72	8,425	13,469	14,684	15,508	17,097	28,571	16,341	4,042	0,926	1,011	26,068
	Ambos	144	6,758	13,492	15,460	16,274	18,826	30,348	20,130	4,487	0,667	0,331	27,569
CO (g kg ⁻¹)	Rizosfera	72	35,350	45,670	51,280	52,020	56,540	76,620	66,725	8,168	0,731	0,726	15,702
	Solo	72	29,490	45,540	49,020	49,250	53,140	65,400	41,305	6,427	0,003	0,936	13,049
	Ambos	144	29,490	45,540	49,330	50,640	55,090	76,620	55,570	7,454	0,600	1,220	14,722
P (mL kg ⁻¹)	Rizosfera	72	17,380	27,480	45,410	77,810	106,320	380,280	5355,997	73,285	1,934	4,185	94,058
	Solo	72	13,910	22,400	30,550	35,340	40,660	124,45	410,200	20,253	2,449	7,738	57,305
	Ambos	144	13,910	23,730	35,250	56,580	58,910	380,280	3316,896	57,592	2,825	9,712	101,797
K ⁺ (mmol _e kg ⁻¹)	Rizosfera	72	4,834	7,634	9,809	11,676	14,866	32,481	28,090	5,300	1,250	2,326	45,391
	Solo	72	2,685	4,981	5,883	6,423	6,924	13,427	5,863	2,421	1,606	2,509	37,697
	Ambos	144	2,685	5,729	7,212	9,050	12,340	32,481	23,804	4,879	1,640	3,611	53,912

Tabela A. Continuação

Variável	Ambiente	n	Mínimo	1º quartil	Mediana	Média	3º quartil	Máximo	Variância	DP	Assimetria	Curtose	CV(%)
Al ³⁺ (mmol _c kg ⁻¹)	Rizosfera	72	0,100	0,200	0,500	0,642	0,800	5,300	0,685	0,827	3,978	18,562	128,957
	Solo	72	0,100	0,200	0,500	0,712	0,900	6,700	0,951	0,975	3,984	20,371	136,907
	Ambos	144	0,100	0,200	0,500	0,677	0,800	6,700	0,814	0,902	3,989	19,704	133,224
Mg ²⁺ (mmol _c kg ⁻¹)	Rizosfera	72	12,670	31,410	35,120	35,510	38,920	66,260	83,842	9,156	0,449	1,028	25,784
	Solo	72	17,380	27,790	33,670	33,120	38,380	53,950	70,235	8,381	0,118	-0,312	25,305
	Ambos	144	12,670	28,240	34,400	34,320	38,470	66,260	77,943	8,828	0,341	0,700	25,727
Ca ²⁺ (mmol _c kg ⁻¹)	Rizosfera	72	28,110	60,160	70,370	69,260	79,160	96,170	180,637	13,440	-0,509	0,116	19,404
	Solo	72	26,570	58,630	67,080	64,290	71,250	86,730	118,395	10,881	-0,854	1,023	16,926
	Ambos	144	26,570	58,630	68,070	66,770	75,530	96,170	154,706	12,438	-0,488	0,505	18,627
H+Al (mmol _c kg ⁻¹)	Rizosfera	72	51,500	77,450	87,000	86,390	95,100	118,70	189,038	13,749	-0,100	-0,067	15,916
	Solo	72	40,100	77,700	87,900	86,260	95,200	118,100	165,551	12,867	-0,272	0,178	14,916
	Ambos	144	40,100	77,650	87,200	86,320	95,100	118,700	176,059	13,269	-0,179	0,097	15,371
SB (mmol _c kg ⁻¹)	Rizosfera	72	68,920	102,650	114,240	116,450	130,030	170,330	500,377	22,369	0,320	-0,101	19,209
	Solo	72	50,700	92,530	105,730	103,830	116,120	141,430	338,531	18,399	-0,442	0,302	17,721
	Ambos	144	50,700	97,060	111,150	110,140	121,080	170,330	456,639	21,369	0,200	0,457	19,402
CTC _{pH 7,0} (mmol _c kg ⁻¹)	Rizosfera	72	165,400	192,200	201,400	202,800	214,000	255,200	297,679	17,254	0,472	0,553	8,506
	Solo	72	165,600	181,700	190,400	190,100	198,600	212,700	143,387	11,974	-0,083	-0,564	6,299
	Ambos	144	165,400	185,600	194,400	196,500	205,800	255,200	259,925	16,122	0,621	0,944	8,206
V (%)	Rizosfera	72	37,690	51,980	57,470	57,100	61,990	76,780	60,358	7,769	-0,042	-0,005	13,606
	Solo	72	30,040	50,150	54,670	54,390	59,630	74,890	61,687	7,854	-0,342	0,812	14,440
	Ambos	144	30,040	50,890	56,520	55,750	60,530	76,780	62,442	7,902	-0,189	0,438	14,175

Tabela A. Continuação

Variável	Ambiente	n	Mínimo	1º quartil	Mediana	Média	3º quartil	Máximo	Variância	DP	Assimetria	Curtose	CV(%)
m (%)	Rizosfera	72	0,000	0,158	0,410	0,643	0,682	6,874	1,094	1,046	4,081	18,802	162,725
	Solo	72	0,000	0,182	0,426	0,857	0,884	11,673	2,583	1,607	4,732	26,714	187,595
	Ambos	144	0,000	0,173	0,417	0,7498	0,809	11,673	1,837	1,355	4,977	31,216	180,780
pH _{água}	Rizosfera	72	5,000	5,775	5,950	5,912	6,200	6,400	0,124	0,352	-0,785	-0,153	5,961
	Solo	72	5,200	5,800	6,000	5,992	6,200	6,500	0,086	0,293	-0,409	-0,340	4,890
	Ambos	144	5,000	5,800	6,000	5,952	6,200	6,500	0,106	0,325	-0,714	0,091	5,466
pH _{KCl}	Rizosfera	72	4,200	4,700	4,900	4,916	5,100	5,900	0,109	0,330	0,141	0,739	6,706
	Solo	72	4,200	4,650	4,900	4,848	5,100	5,640	0,106	0,325	-0,111	-0,267	6,714
	Ambos	144	4,200	4,700	4,900	4,882	5,100	5,900	0,108	0,328	0,021	0,340	6,724
ΔpH	Rizosfera	72	-1,400	-1,170	-1,000	-0,996	-0,900	-0,290	0,061	0,248	0,954	0,670	-24,877
	Solo	72	-1,660	-1,222	-1,175	-1,144	-1,000	-0,760	0,034	0,185	-0,180	-0,257	-16,175
	Ambos	144	-1,660	-1,200	-1,100	-1,070	-0,945	-0,290	0,053	0,230	0,792	1,423	-21,511
Areia (kg kg ⁻¹)	Solo	72	0,065	0,089	0,095	0,097	0,103	0,131	0,0002	0,013	0,323	0,249	13,271
Silte (kg kg ⁻¹)	Solo	72	0,160	0,208	0,233	0,237	0,257	0,342	0,001	0,038	0,618	0,288	16,144
Argila (kg kg ⁻¹)	Solo	72	0,563	0,646	0,669	0,666	0,690	0,746	0,001	0,040	-0,524	0,258	5,951

APDA = argila prontamente dispersa em água; AMDA = argila mecanicamente dispersa em água; EP = estabilidade de percolação; CO = carbono orgânico; P = fósforo; K⁺ = potássio; Al³⁺ = alumínio; Mg²⁺ = magnésio; Ca²⁺ = cálcio; H+Al = acidez potencial; SB = soma de bases; CTC_{pH0,7} = capacidade de troca de cátions potencial (no pH 7,0); V = saturação por bases; m = saturação por alumínio; pH_{água} = potencial hidrogeniônico em água; pH_{KCl} = potencial hidrogeniônico em cloreto de potássio; ΔpH = delta pH (pH_{KCl} - pH_{água}); n = número de amostras; DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação.