

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

Resiliência física de solos sob plantio direto

Marina Araujo Bavoso

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

**Piracicaba
2012**

Marina Araujo Bavoso
Engenheiro Agrônomo

Resiliência física de solos sob plantio direto

Orientador:
Prof. Dr. **ALVARO PIRES DA SILVA**

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

Piracicaba
2012

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - ESALQ/USP**

Bavoso, Marina Araujo
Resiliência física de solos sob plantio direto / Marina Araujo Bavoso. - - Piracicaba,
2012.
58 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2012.

1. Compactação dos solos 2. Densidade do solo 3. Física do solo 4. Permeabilidade do
solo 5. Plantio direto 6. Umidade do solo I. Título

CDD 631.43
B354r

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

Dedico a meus pais, Mara e Beto e a meu irmão Jefferson.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Solos e Nutrição de Plantas, da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, pela realização do Curso de Mestrado;

Ao Professor Dr. Álvaro Pires da Silva, pela orientação;

A Professora Dra. Neyde Fabiola Balarezo Giarola, pelo incentivo e orientação desde a graduação;

Ao Professor Dr. Cássio Tormena pelas correções e contribuições;

A Universidade Estadual de Ponta Grossa, pela disponibilidade da área de estudo na Fazenda Escola Capão da Onça;

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pela concessão de bolsa de estudos;

Aos colegas Sérgio Damaso da Silveira, Osvaldo Guedes, Getúlio Coutinho, Sâmala Carneiro, Sueli Rodrigues, Clévea Rosana e Edison Mome.

As amigas Paula e Aline pelo companheirismo e incentivo.

E a todos que participaram e me apoiaram nesta etapa, o meu agradecimento.

SUMÁRIO

RESUMO.....	9
ABSTRACT.....	11
1 INTRODUÇÃO.....	13
2 DESENVOLVIMENTO.....	15
2.1 Revisão Bibliográfica.....	15
2.1.1 Sistema de plantio direto e compactação do solo.....	15
2.1.2 Resiliência do solo.....	21
2.1.3 Permeabilidade do solo ao ar.....	25
2.2 Material e Métodos.....	28
2.2.1 Localização e amostragem dos solos.....	28
2.2.2 Análises laboratoriais.....	30
2.2.3 Resiliência do solo.....	35
2.2.4 Análise dos dados.....	36
2.3 Resultados e discussão.....	36
2.3.1 Densidade do solo.....	37
2.3.2 Conteúdo volumétrico de água, porosidade total e porosidade de aeração.....	39
2.3.4 Permeabilidade do solo ao ar	43
3 CONCLUSÕES.....	47
REFERÊNCIAS.....	49

RESUMO

Resiliência física de solos sob plantio direto

A resiliência física de solos é proveniente de processos regenerativos que incluem ciclos de umedecimento e secamento, congelamento e descongelamento assim como as atividades biológicas. Este estudo testou a hipótese de que as propriedades físicas do solo, tais como a permeabilidade do solo ao ar, densidade do solo, porosidade de aeração e porosidade total são indicadores físicos eficientes para quantificar a resiliência de solos de diferentes texturas submetidos ao estresse mecânico (compactação) e após subseqüentes ciclos de umedecimento e secamento. O objetivo foi avaliar o comportamento e a resiliência do solo por meio de propriedades físicas de um Latossolo Vermelho. Foram retiradas 25 amostras indeformadas (0-0,05m) de dois solos: solo I com textura argilosa e solo II com textura franco argilo arenosa, realizando as determinações das propriedades físicas nos tratamentos: antes da compactação(A), depois da compactação (C0) e após ciclos de umedecimento e secamento (C1,C2,C3,C4). As propriedades densidade do solo e porosidade total não apresentaram recuperação da condição inicial após a compactação nos solos I e II, as propriedades conteúdo volumétrico de água e porosidade de aeração apresentaram recuperação parcial apenas no solo I, para o solo II também não apresentaram recuperação, e a permeabilidade do solo ao ar foi a propriedade que apresentou a melhor recuperação assim como foi a que apresentou maior resiliência. Em relação ao distinto comportamento dos dois solos, observou-se que o solo I foi mais resiliente que o solo II nas propriedades que apresentaram recuperação.

Palavras-chave: Permeabilidade do solo ao ar; Resiliência física; Ciclos de umedecimento e secamento; Compactação

ABSTRACT

Physical resilience of soil under no-tillage

The soil physical resilience comes from regenerative processes which include cycles of wetting and drying, freezing and thawing as well as biological activities. This study tested the hypothesis that the physical properties of soil such as soil permeability, bulk density, aeration porosity and total porosity are efficient physical indicators to quantify the resilience of soils of different textures subjected to mechanical stress (compression) and after subsequent cycles of wetting and drying. The objective was to evaluate the behavior and soil resilience by means of physical properties of an Oxisol. Undisturbed samples were taken 25 (0-0.05 m) of two soils: clayey soil and soil with sandy clay loam texture, making determinations of physical properties in the treatments before compression (A), after compaction (C0) and after wetting and drying cycles (C1, C2, C3, C4). The bulk density properties and porosity did not recover the initial condition after compression in the soil I and II, the properties volumetric content of water and air-filled porosity showed only partial recovery in the soil I, II to the soil also showed no recovery and soil permeability to air was the property that showed the best recovery as well as showed the greatest resilience. Regarding the different behavior of the two soil, it was observed that the soil I was more resilient soil II in which showed recovery properties

Keywords: Soil permeability; Physical resilience; Cycles of wetting and drying; Soil compaction

1 INTRODUÇÃO

As práticas de manejo do solo e das culturas provocam alterações nas propriedades físicas do solo, as quais podem ser permanentes ou temporárias. Assim, o interesse em avaliar a qualidade física do solo tem sido incrementado por considerá-lo como um componente fundamental na manutenção e/ou sustentabilidade dos sistemas de produção agrícola. A qualidade do solo está relacionada à degradação e à resiliência do solo. A resiliência do solo refere-se a sua habilidade em recuperar-se de degradação (ou do estresse a que foi submetido), a qual pode ser de origem antropogênica ou natural, e retornar a um novo equilíbrio semelhante à condição ou estado antecedente.

A relação entre o manejo e a qualidade do solo pode ser avaliada pelo comportamento de suas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. Os atributos mais amplamente utilizados como indicadores de qualidade física do solo consistem daqueles que levam em conta a profundidade efetiva de enraizamento, a porosidade total, distribuição e tamanho dos poros, densidade do solo, a resistência do solo à penetração das raízes, o intervalo hídrico ótimo, o índice de compressão e a estabilidade dos agregados. As modificações nessas propriedades, ocasionadas pelo manejo, podem resultar em decréscimo de produção agrícola, aumento da suscetibilidade do solo à erosão e à compactação.

A capacidade do solo em promover a troca de gases entre o ambiente radicular e a atmosfera afeta diretamente o crescimento de plantas. Isso faz com que a quantificação de propriedades relacionadas com a capacidade do solo em transmitir O_2 até as raízes seja fundamental para a avaliação da qualidade física do solo. Assim, a permeabilidade do solo ao ar é um importante parâmetro físico que governa o fluxo de gases no solo, podendo ser utilizada como indicadora da resiliência do solo haja vista a sua sensibilidade às mudanças na estrutura do solo.

Neste trabalho, a hipótese avaliada é que as propriedades físicas, tais como porosidades total e de aeração, conteúdo volumétrico de água, teor de carbono orgânico, permeabilidade ao ar e densidade do solo, são indicadoras do estado da qualidade e/ou da resiliência de solos sob plantio direto. Assim, o objetivo foi avaliar a qualidade e a resiliência do solo a partir da mensuração das propriedades físicas, mencionadas na hipótese, de dois Latossolos Vermelhos, de

diferentes texturas em estados de compactação e intensidades de ciclos de umedecimento e secamento.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1. Revisão Bibliográfica

2.1.1 Sistema de plantio direto e compactação do solo

Os primeiros registros da adoção do sistema plantio direto (SPD) no Estado do Paraná datam do início da década de 1970, na região norte, no município de Rolândia, e na região dos Campos Gerais, no município de Ponta Grossa (DERPSCH et al., 2010). Por serem pioneiras na implantação deste sistema no Brasil, estas regiões apresentam o SPD já consolidado. A introdução do sistema plantio direto ocorreu visando minimizar perdas de solo e de nutrientes por erosão, em decorrência da intensidade das operações agrícolas no sistema de preparo convencional aliado à elevada erosividade das chuvas (MUZILLI, 1981).

No âmbito mundial, o sistema plantio direto alcançou 111 milhões de hectares em 2009 e tem sido praticado tanto por pequenos produtores (0,5 ha) como por latifundiários; desde regiões extremamente frias até a região quente dos Trópicos, bem como em solos com ampla variação de classes textural (DERPSCH et al., 2010). No Brasil, segundo a FEBRAPDP (2010), a área sob plantio direto evoluiu de 180 hectares na safra 1972/73 para 25,5 milhões de hectares na safra 2005/2006 alcançando 32 milhões de hectares ou 70% das lavouras de grãos (BRASIL, 2009).

Dentre as ações conservacionistas implementadas estão a manutenção dos resíduos culturais na lavoura, a rotação de culturas e a redução da intensidade de revolvimento do solo, propiciando uma maior preservação do solo e da água, um sistema de plantio mais econômico a médio e longo prazos (LAL, 2004). De forma geral, verifica-se um aumento no teor de carbono orgânico total com a não-mobilização do solo, (LOVATO et al., 2004) e uma melhoria do estado de agregação e de estabilidade dos agregados (SILVA; MIELNICZUK, 1997), condição essencial para garantir alta produtividade agrícola.

O SPD é, na essência, um sistema de manejo conservacionista. Portanto, com vistas à preservação dos recursos naturais, à sustentabilidade agrícola e à funcionalidade do solo, no contexto de qualidade ambiental, o SPD deve ser conduzido de modo a manter e/ou melhorar a qualidade do solo (QS) (VEZZANI; MIELNICZUK, 2009). Segundo Carter (2001), a QS está relacionada com

capacidade do solo em aceitar, estocar e reciclar água, nutrientes e energia. Para Doran (1997), "Qualidade do solo é a capacidade de um solo funcionar dentro dos limites de um ecossistema natural ou manejado, para sustentar a produtividade de plantas e animais, manter ou aumentar a qualidade do ar e da água e promover a saúde das plantas, dos animais e dos homens".

A manutenção da estrutura do solo devido ao seu não revolvimento no SPD pode resultar em condições mais adequadas de infiltração e retenção de água no solo, quando o sistema é manejado em rotação de culturas e com controle do tráfego (HÅKANSSON, 2005). Sob vegetação nativa, o solo mantido em seu estado natural, apresenta características físicas adequadas ao desenvolvimento das plantas, pois permite com que as raízes explorem um grande volume de solo. Quando o solo é submetido a outros usos e manejos, podem ocorrer alterações nas propriedades físicas do solo, as quais podem ser permanentes ou temporárias (LIMA, 2004), sendo, geralmente, pronunciadas na estrutura do solo e determinantes para o desenvolvimento das plantas (BERTOL et al., 2001). O incremento na intensidade do uso do solo, além de resultar nas alterações de sua porosidade, também gera modificações em sua densidade bem como redução do teor de carbono orgânico (MACHADO et al., 2008).

O aporte de resíduos vegetais, introduzido pelo SPD, favorece o acúmulo de carbono orgânico do solo (LAL, 2004). De modo geral, isso pode resultar em benefícios nas propriedades físicas, na formação dos agregados estáveis, com redução da densidade do solo, melhoria na aeração, na disponibilidade de água e consistência do solo (BRANCALIÃO; MORAES, 2008). A presença de resíduos e o maior teor de C nas camadas superficiais resultam em maior resistência do solo à compactação, (MERTEN; MIELNICZUK, 1991; AMADO et al., 2001), proporcionando maior capacidade de suporte ao tráfego de máquinas (BRAIDA et al., 2008; BRANDT, 2005) ou pela maior tensão de pré-consolidação (OLIVEIRA et al., 2003). Isso é importante porque as operações de campo, desde o preparo da semeadura até a colheita, são, muitas vezes, realizadas sem a mínima atenção às condições de umidade do solo, em regiões irrigadas ou com um elevado regime de precipitação anual. Também é comum o tráfego de maquinário quando o solo está úmido o suficiente para não resistir às forças aplicadas, onde se observa um aumento de tração da semeadora, que gera aumento da potência exigida ao trator e causa

danos à estrutura do solo (SÁNCHEZ-GIRÓN; ANDREU; HERMANZ, 1998; ROSA et al., 2008).

Rosa (2009) avaliando as propriedades físicas do solo nas camadas de 0,0- 0,06 m, 0,07-0,14 m e 0,15-0,22 m em um Latossolo Vermelho, sob cinco tempos de implantação do SPD (2 meses, 2, 4, 5,5 e 14 anos) e dois níveis de tráfego (com e sem tráfego), demonstrou que o tempo de uso do sistema possui influência direta nas propriedades avaliadas. O autor verificou que no SPD recém implantado (2 meses), elevados valores de macroporosidade e condutividade hidráulica do solo saturado e maior permeabilidade do solo ao ar em todas as camadas de solo. Na camada mais superficial foi observada maior permeabilidade ao ar do solo devido à presença de macroporos; verificou também um aumento da microporosidade e do teor de carbono orgânico do solo com o tempo de implantação do SPD. Também apresentou uma maior retenção de água, independente do tráfego, nos tempos 5,5 e 14 anos. Esses resultados concordam com aqueles de outros trabalhos, onde o uso contínuo do SPD gerou redução da densidade do solo, melhoria da agregação, maior teor de carbono orgânico e maior continuidade poros e estabilidade de agregados (COSTA et al., 2003; STONE et al., 2002; SILVEIRA et al., 2003; OLIVEIRA et al., 2004).

Num outro estudo, Silva et al. (2008) verificaram que em um Latossolo, após 6 anos de cultivo sob SPD, não houve melhoria de sua qualidade física quando avaliados o teor de matéria orgânico, a macroporosidade e a condutividade hidráulica do solo saturado. Petry et al. (2007), em Argissolo, não encontraram diferenças quanto ao armazenamento e à disponibilidade de água às plantas no SPD em relação ao sistema convencional. Ainda, Cruz et al. (2003) observaram que, embora o SPD tenha apresentado maior conteúdo de carbono orgânico na camada superficial, não houve melhoria da agregação do solo em relação ao sistema convencional.

A melhoria da estrutura do solo com o avanço do uso do SPD tem tornado-o uma técnica frequente no controle das perdas de solo e de água. No entanto, nos últimos anos, repensa-se o uso desse sistema, pois solos sob esse tipo manejo têm demonstrado problemas de compactação (REICHERT et al., 2009; SILVEIRA et al., 2008; COLLARES et al., 2008; HÅKANSSON, 2005; SILVA et al., 2000; SILVA et al., 2003; KLEIN; BOLLER, 1995; HÅKANSSON; MEDVEDEV, 1995),

causando até mesmo o retorno ao sistema convencional de preparo do solo (TORMENA; ROLLOF; SÁ, 1998).

Nesse contexto, alguns agricultores têm revolido o solo utilizando escarificadores (ROSA et al., 2008) e realizando aração e gradagem em solos sob SPD devido ao surgimento de camadas superficiais (0,0-0,15m) compactadas (REICHERT et al., 2009). Entretanto, na avaliação da compactação o tempo de adoção do SPD deve ser considerado, visto que as alterações do comportamento físico do solo modificam o comportamento compressivo ao longo do tempo (ASSIS; LANÇAS, 2005; SILVEIRA et al., 2008).

A compactação do solo é definida como uma alteração no arranjo das partículas constituintes do solo e se refere a um processo onde ocorre o decréscimo de volume do espaço poroso de solos não saturados quando uma determinada pressão externa é aplicada, a qual pode ser causada pelo tráfego de máquinas agrícolas, equipamentos de transporte e/ou animais (LIMA, 2004; RICHART et al., 2005). Segundo Peng et al. (2004), a compactação é considerada a principal causa de degradação do solo no mundo na agricultura mecanizada e atividade florestal induzida pelas máquinas pesadas durante transporte e operações de campo.

A avaliação da vulnerabilidade dos solos à compactação pode ser feita através de medições das condições do solo e as mudanças na retenção de água, enquanto que determinações de porosidade e densidade do solo são comumente usadas para identificar camadas compactadas. (STRECK et al., 2004; REICHERT et al., 2009, PENG et al., 2004). Dentre as propriedades físicas do solo alteradas pela compactação, a porosidade de aeração pode apresentar valores abaixo do limite crítico de $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (TORMENA; ROLLOF; SÁ, 1998), a porosidade total e a macroporosidade tendem a ser reduzidas e a resistência à penetração e a densidade do solo aumentadas (STRECK et al., 2004).

A extensão e a intensidade da compactação do solo vão depender da pressão exercida pelos pontos de apoio das máquinas e equipamentos, das suas cargas, do número de vezes que trafegam no terreno, da textura e da agregação do solo (RICHART et al., 2005). O tráfego de máquinas agrícolas intenso quando o solo apresenta teor de água acima do ponto de friabilidade contribui ao aumento da compactação (HORN; FLEIGE, 2003). A compactação do solo pode ser superficial, quando provocada pelo uso inadequado da pressão de insuflagem dos pneus, e sub-superficial, quando originada pelo excesso de peso por eixo (SALIRE; HAMMEL;

HARDCASTLE, 1994). A profundidade máxima de efeito da compactação, imposta por máquinas e implementos agrícolas, também varia com as características texturais do solo e devido às cargas aplicadas ao solo. As camadas compactadas podem atingir, por exemplo, mais de 0,6 m de profundidade quando houver a condução de máquinas com eixos de massa igual ou superior a 15 Mg (HAKANSSON; REEDER, 1994). De modo geral, quanto maior o teor de argila, maior a profundidade a qual a pressão é transmitida e maior a espessura da camada compactada (HORN, 1988).

Klein e Boller (1995) encontraram na camada superficial (0,0 - 0,05 m) de um Latossolo Vermelho escuro, densidade maior no solo manejado com sistema plantio direto do que com sistema de preparo convencional; contudo, na camada de 0,05 - 0,20 m esta situação se inverteu, demonstrando ação do chamado pé de arado. No entanto, a produtividade do milho foi 25,3% maior no solo sob plantio direto.

Genro Jr et al. (2009) em Latossolo manejado com sistema plantio direto encontraram um elevado grau de compactação, manifestado pela densidade do solo acima e volume de macroporos abaixo do limite crítico para solos de classe textural muito argiloso (REICHERT et al., 2009). O aumento da densidade e da resistência do solo à penetração e a redução da macroporosidade e da porosidade do solo repercutem na redução da infiltração de água no solo e na deformação morfológica das raízes das plantas (COLLARES et al., 2008).

As classes de solos apresentam comportamentos distintos quando os solos são submetidos ao processo de compactação. Isto decorre de sua dependência da energia de compactação, da textura, do teor de matéria orgânica, da umidade do solo e da história de tensão, induzida pelos processos pedogenéticos ou pelo manejo do solo no passado (DIAS JUNIOR; PIERCE, 1996), determinando a profundidade de transmissão e a persistência da compactação (McBRIDE; WATSON, 1990; SILVA et al., 1986). A compactação do solo geralmente reduz a quantidade de água disponível para as plantas, pois provoca a redução dos macroporos e dos microporos, levando à diminuição da porosidade total e aumento da microporosidade, o que dificulta o aproveitamento de água pelas raízes (BRADY; WEIL, 2002).

A estrutura do solo e a condutividade hidráulica mudam durante a compactação. A umidade e a permeabilidade do solo ao ar diminuem depois da

compactação, o teor de água retido não é afetado apenas pela textura do solo, densidade e teor inicial de água, mas também pelo tempo que o solo esteve sobre pressão. (PENG et al., 2004).

A deformação causada pela compactação é responsável por mudanças nas propriedades físicas do solo, tais como a taxa de infiltração e a aeração (HORN et al., 1995; TORMENA; ROLLOF; SÁ, 1998). O maior armazenamento de água no solo sob sistema plantio direto, devido o incremento da microporosidade, pode não representar maior disponibilidade de água às plantas, principalmente devido a ocorrência de limitações físicas, devido a compactação, limitando o crescimento das raízes e, conseqüentemente, da parte aérea das plantas (SILVA; REICHERT; REINERT, 2006).

Devido ao rearranjo das partículas do solo pela compactação, ocorre diminuição do volume e da conectividade dos poros do solo, aumentando a sua densidade (GREGORY et al., 2007) bem como a necessidade de maior conteúdo de água para manter os valores de resistência do solo à penetração igual ou inferior ao valor crítico ao desenvolvimento de raízes (ex. 2,0 MPa) das plantas (FIGUEIREDO et al., 2011; TORMENA; ROLLOF; SÁ, 1998).

Horn et al. (2000) demonstraram que pequenas alterações estruturais geraram melhorias nos poros do solo as quais podem ocorrer somente se a ação da pressão do tráfego for igual ou menor que a tensão de pré-consolidação. Em um Latossolo Vermelho cultivado com sistema plantio direto contínuo e descontínuo, Silveira et al. (2008) encontraram na camada 0,0-0,1 m, os maiores valores de densidade do solo no tratamento de SPD contínuo por 14 anos. Os autores atribuíram esse comportamento ao efeito do tráfego acumulado. Constataram também que a densidade do solo diminuiu com o aumento da frequência de revolvimento do solo: quando arado a cada três anos, a densidade do solo foi de 1,36 Mg m⁻³, quando arado a cada dois anos foi igual a 1,33 Mg m⁻³ e sob aração anual, a densidade do solo foi de 1,30 Mg m⁻³.

Como medidas preventivas da compactação, o monitoramento e o controle da intensidade do tráfego são maneiras de minimizar os danos ao solo (HAKANSSON, 2005; HORN; FLEIGE, 2003). Além disso, é importante conhecer os níveis de pressão que o solo suportou no passado (história de tensão) e a umidade do solo no momento das operações agrícolas para que não ocorra a compactação adicional do solo (DIAS JUNIOR; PIERCE, 1996).

2.1.2 Resiliência do solo

Considerando os vários aspectos da qualidade do solo (QS), têm-se os componentes ligados à resistência ou estabilidade do solo e aqueles ligados à resiliência do solo. A resistência, segundo Seybold, Herrick e Bredja (1999), é a capacidade de o solo resistir a mudanças causadas por um distúrbio ou, como Lal (1993) a conceitua, é a estabilidade do solo aos estresses aplicados, referindo-se diretamente como a suscetibilidade do solo a degradação. Já a resiliência do solo refere-se à habilidade intrínseca do solo em recuperar-se de degradação ou do estresse aplicado, a qual pode ser de origem antropogênica ou natural, e retornar a um novo equilíbrio semelhante ao estado antecedente (BLANCO; LAL, 2010). Também pode ser definida como a habilidade do sistema em recuperar sua integridade estrutural e funcional (SEYBOLD; HERRICK; BREJDA, 1999).

A resiliência está relacionada com a qualidade do solo em termos de recuperação das funções do solo. Conforme Coleman Hendrix e Odum (1998), o solo não degradado tem propriedades auto-reguladoras para manter seu estado atual. Blum (1997) define resiliência como habilidade do ecossistema do solo em retornar a um equilíbrio dinâmico depois de perturbado. Para Addiscott (1995), se um solo em seu estado estável é perturbado, seus mecanismos de regulação agirão para contrapor a perturbação e o restaurar a um estado estável. Assim, a resiliência depende do balanço entre os processos de degradação e de restauração do solo (LAL, 1994) e pode-se afirmar que “a chave para a avaliação da QS é a medição de processos essenciais que ocorrem no solo” (ADISCOTT, 1995).

Estas definições teóricas da resiliência do solo são complexas devido a natureza dinâmica e heterogênea do sistema solo. Um solo degradado nem sempre recupera a sua condição inicial, mas a um nível onde suas funções não são consideravelmente diferentes do seu nível pré-degradação. Solos severamente degradados podem não se recuperar dos distúrbios mesmo sob práticas restaurativas. Ademais, solos com alto conteúdo de matéria orgânica e elevada estabilidade de agregados têm maior resiliência que solos instáveis com baixo teor de matéria orgânica (BLANCO; LAL, 2010).

A resiliência do solo é uma propriedade dinâmica que é muito dependente do status do solo na época de avaliação (SEYBOLD; HERRICK;

BREJDA, 1999). Gregory et al. (2009), observaram que solos mais resistentes a estresses são também solos mais resilientes. Em sistemas agricultáveis, os estresses impostos aos solos podem ser de origem natural e/ou antropogênica. Blanco e Lal (2010) incluem tráfego de máquinas, veículos e animais; pastejo inadequado; práticas de cultivo e manejo – como o preparo do solo, fertilizações excessivas, irrigação com água de baixa qualidade, aplicação de pesticidas e o desmatamento para abertura de áreas – assim como desenvolvimento urbano desordenado e a prática da mineração como algumas das causas antropogênicas de perturbação que mais degradam os solos.

Os parâmetros climáticos influenciam na magnitude e na velocidade da capacidade de recuperação dos distúrbios, sendo esta menor em climas secos que em úmidos. Os fenômenos climáticos que afetam a resiliência incluem precipitação, temperatura, radiação, umidade do ar e a demanda evaporativa, além de processos ligados ao intemperismo, tempestades, terremotos, fogo, furacões e alagamentos, os quais não são controlados pelo homem. O clima também comanda as atividades biológicas, corroborando o rápido crescimento de plantas em solos degradados sob clima úmido e temperado que em climas áridos e semi-áridos (LAL, 1994).

Os fatores que governam a resiliência dos solos são também os mesmos da formação dos solos, sendo que alguns fatores podem ter maior influência que outros dependendo do tipo de solo. Estes fatores e processos que afetam a resiliência são contínuos, simultâneos e independentes. (SEYBOLD; HERRICK; BREJDA, 1999). Dentre esses fatores têm-se o material de origem, que determina a textura do solo, a qual governa o fluxo de água, ar e calor pelo solo. A resistência e a resiliência do solo em relação à determinada prática agrícola depende da textura e da mineralogia do solo (LAL, 1994).

A resiliência biológica do solo pode ser medida pelas mudanças na mineralização de resíduos de plantas (GRIFFITHS et al., 2000), no tamanho e na atividade da biomassa microbiana (FRANCO et al., 2004). Sob cobertura vegetal o solo é mais resiliente do que quando está nu, pois a cobertura reduz a erosão protegendo-o dos impactos das gotas de chuva (VEZZANI, 2001).

A acumulação de matéria orgânica via resíduos e/ou raízes contribuem para o aumento da resiliência, pois afeta a ciclagem de nutrientes, a agregação do solo, a população e composição da fauna edáfica impactando diretamente no funcionamento do sistema solo (GRIFFITHS et al., 2000).

Com dados levantados pela FAO (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*) em Latossolos e Cambissolos do sul do Brasil, Tenberg et al. (1998) afirmam que as perdas de solo em função do tempo podem auxiliar nas estimativas da resiliência: solos menos resilientes apresentariam maior inclinação desta dessa relação. Já para a relação entre a perda de solo e a produtividade, pode-se estimar a sensibilidade a erosão, quando um alto rendimento declina com a erosão, pode-se descrever como solo sensível a erosão.

Com fluxo alto de compostos orgânicos, o sistema solo tem condições de se auto-organizar em macroagregados com grande capacidade de reter energia e matéria adicionada na forma de C. Nessa condição, há melhorias na resistência à erosão hídrica e eólica; infiltração e retenção de água no solo; sequestro de C; capacidade de retenção de cátions; aumento do estoque de nutrientes; adsorção e complexação de compostos orgânicos e inorgânicos; favorecimento da biota do solo; promoção da ciclagem dos elementos químicos; e resistência a perturbações e aumento da resiliência. Quando a magnitude do fluxo é baixa, o sistema solo se auto-organiza em estados de ordem, menores e mais simples (microagregados). Nessa condição, o solo perde sua habilidade para exercer suas funções e tem sua qualidade reduzida (VEZZANI, 2001).

Chan e Hulugalle (1999) verificaram que em solos irrigados no oeste da Austrália, com frequentes ciclos de umedecimento e secamento aliados a práticas de manejo de cultivo mínimo, possuem taxas de mineralização da matéria orgânica mais rápidas que em solos sob sistemas não irrigados.

Lal (1993) propôs um modelo a fim de quantificar mudanças na funcionalidade do solo baseados no balanço entre os processos regenerativos e de degradação por um determinado tempo. Com base nesse balanço, valores limites para as propriedades do solo, que indicam o nível a partir do qual o solo passa a ser sensível a processos degradativos e perde sua capacidade de resistir e/ou recuperar-se após um distúrbio, podem ser identificados avaliando a dinâmica do solo sob diferentes usos e manejos (Lal,1994). Szabolds (1994) apresentou um modelo conceitual, com ambos os componentes de resiliência e resistência, para estimar o potencial das funções do solo em resistir a mudanças e recuperar suas funções após um distúrbio. Este modelo leva em consideração a habilidade física, química e biológica do solo em neutralizar um distúrbio e avalia a função natural e antropogênica do processo de formação do solo em operação.

Segundo Herrick e Wander (1998), a resiliência do solo pode ser quantificada experimentalmente através das medidas de taxas de recuperação após um distúrbio (eq. 1). E a resistência do solo pode ser medida pela razão da capacidade do solo em funcionar após um distúrbio pela sua capacidade em funcionar em pré-distúrbio (eq. 2)

$$\text{Resiliência(recuperação)} = (B-C)/(A-C) \quad (1)$$

$$\text{Resistência} = C/A \quad (2)$$

onde A é a capacidade do solo em funcionar pré-distúrbio, B, o nível de recuperação em um equilíbrio estável do funcionamento do solo e C, o nível de funcionamento do solo imediatamente após o distúrbio.

O desenvolvimento de níveis/classes de resiliência baseados no uso do solo para distúrbios específicos seria uma ferramenta útil para o planejamento do uso e manejo da terra em longo prazo e para a sustentabilidade do solo (SEYBOLD; HERRICK; BREJDA, 1999). Rozanov (1994) sugere o desenvolvimento de classes de resiliência de solo usando um gradiente dos processos mais característicos de degradação específica, por exemplo, os gradientes de salinização e de acidificação. As classes seriam divididas em: a) não resilientes (solos severamente afetados), b) levemente resilientes, c) moderadamente resilientes e d) altamente resilientes (solos levemente afetados e não afetados), avaliando as condições do solo após seu uso contínuo.

Mudanças nas propriedades físicas, químicas e biológicas dos solos são utilizadas como indicadores de resiliência do solo. Por exemplo, a porosidade (ZHANG et al., 2005), a resistência a penetração (GREGORY et al., 2007), a distribuição de tamanho de agregados de solo em função de ciclos de umedecimento e secamento (GRANT et al., 1995) são propriedades utilizadas para estimar a resiliência dos solos. Gregory et al. (2009) encontraram relações lineares de resiliência e resistência em função do conteúdo de matéria orgânica e solos sob pastagens foram considerados mais resilientes e resistentes a estresses físicos e biológicos que solos aráveis sob uso agrícola intensivo.

A resiliência física vem de uma variedade de processos regenerativos que incluem ciclos de umedecimento e secamento, congelamento e descongelamento assim como as atividades biológicas, como o crescimento de raízes e a atividade da fauna edáfica, que também influenciam a resiliência química e biológica (GREGORY et al., 2007; SEYBOLD; HERRICK; BREJDA, 1999).

Dörner et al. (2009) concluíram que a resiliência funcional dos poros está extremamente relacionada com o conteúdo de carbono orgânico, que atua como componente elástico e permite tanto a recuperação volumétrica do solo como a funcionalidade dos poros. Gregory et al.(2007) observaram em um solo franco arenoso e um franco argilo-arenoso que, com a compactação, o crescimento das plantas foi severamente reduzido, sendo menos resilientes; por outro lado, um solo argiloso foi mais resiliente depois do tráfego.

2.1.3 Permeabilidade do solo ao ar

A permeabilidade do solo ao ar (K_a) é definida como a facilidade com que o ar entra ou passa através de uma massa de solo (PETH; HORN, 2006), ou seja, é a capacidade de transmissão de gases através de poros interconectados em resposta a um gradiente de pressão (KIRKHAM, 1946).

Estudos que descrevem a permeabilidade do solo ao ar em função do conteúdo de ar fornecem informações sobre estrutura, distribuição de tamanho de poros e mudanças na estrutura do solo devido ao uso da terra e práticas de manejo (MOLDRUP; OLESEN, 2001; CASTRO FILHO, 1998). As práticas de manejo do solo causam grande impacto sobre a sua aeração e aquelas que promovem o revolvimento do solo promovem aumentos no volume de poros, na permeabilidade e no armazenamento de ar (BRAUNACK; DEXTER, 1989) na camada revolvida; porém logo abaixo da camada revolvida é comum a presença de uma camada compactada na qual são críticas as condições para as trocas de ar entre o solo e a atmosfera.

Nos cultivos sucessivos sob plantio direto, apesar da tendência ao aumento da densidade das camadas de solo não cultivadas (RYDBERG, 1987) e redução do volume de macroporos, ocorre uma infiltração mais rápida em função da maior continuidade de poros (DOUGLAS; GOSS; HILL, 1980).

Estudos relacionados ao transporte, à perda e à emissão de gases com efeito estufa e para a geração de modelos e métodos de remediação *in situ* através da extração de vapores do solo para a remoção de substâncias químicas voláteis em locais de solo contaminado são marcadamente dependentes da permeabilidade do solo ao ar (POULSEN et al.,1998).

A aeração pode torna-se um impedimento sério ao crescimento das plantas quando mais de 80 a 90% do espaço poroso está ocupado por água, deixando menos de 10 a 20% de porosidade ocupada por ar. O valor de porosidade de aeração < 10 %, tem sido utilizado como restritivo para o crescimento das raízes, inclusive para a determinação do Intervalo Hídrico Ótimo (SILVA et.al., 1994).

Em relação aos limites críticos de permabilidade do solo ao ar, McQueen e Sheperd (2002) sugerem um valor de K_a igual a $1 \mu\text{m}^2$. Segundo Ball e Schjønning (2002), solos com baixa permeabilidade ao ar apresentam valores de $K_a < 10 \mu\text{m}^2$ e, solos com alta permeabilidade, a $K_a > 250 \mu\text{m}^2$.

Há diferentes métodos propostos para medir K_a em campo e/ou em laboratório. Para tanto, são utilizados equipamentos denominados de permeômetros, que promovem a movimentação do ar através da coluna de solo (amostra), gerando um gradiente de pressão em relação à pressão atmosférica (KIRKHAM, 1946; COREY, 1986; McKENZIE; DEXTER, 1996; IVERSEN; MOLDRUP; SCHJØNNING, 2001; BALL; SCHJØNNING, 2002; FIGUEIREDO, 2010). São métodos rápidos, fáceis e também podem ser usados para caracterizar a estrutura do solo (IVERSEN; MOLDRUP; SCHJØNNING, 2001).

A k_a pode ser determinada a partir da Lei de Darcy, sendo a densidade de fluxo de ar (q) descrita como:

$$q = -\frac{k_a}{\eta} \left(\frac{dP}{dz} + \rho g \right), \quad (3)$$

sendo, (q) [L/T], k_a [L^2], (P) a pressão de ar [M/LT^2], (z) a distância [L] na direção do movimento de ar no sistema poroso, (η) a viscosidade do ar [M/LT], (ρ) a densidade do ar [M/L^3] e (g) a aceleração da gravidade [L/T^2]. A densidade de fluxo corresponde à vazão de ar (Q) [L^3/T] por área perpendicular ao movimento do fluido (A_s) [L^2], de modo que conhecendo-se as dimensões da amostra, a eq. (4) pode ser utilizada nas estimativas da k_a , em laboratório:

$$k_a = \frac{Q\eta}{A_s} \left(\frac{dz}{dP} \right), \quad (4)$$

McQueen e Shepherd (2002) em solos cultivados com cereais (trigo e milho) por 4 anos, após compactação por tráfego de máquinas agrícolas, encontraram $k_a = 1 \mu\text{m}^2$, medida quando as amostras se encontravam em equilíbrio no potencial mátrico de 5 kPa, sendo esse valor considerado pelos autores como

indicativo de solo impermeável ao ar e observado em todas as profundidades estudadas.

Sánchez-Gíron, Andreu e Hermanz (1998) verificaram em um solo com baixo teor de argila (30 g kg^{-1}) e alto teor de matéria orgânica (77 g kg^{-1}) houve um aumento da k_a quando apresentou umidade acima de 20%. No entanto, os agregados formados não eram muito estáveis. Assim, quando a pressão de compressão submetida ao solo foi aumentada de 50 para 100 kPa, sua permeabilidade ao ar foi $<10 \mu\text{m}^2$, ou seja, apresentou valor inferior àquele considerado adequado para o crescimento de plantas. Já em um solo com alto teor de argila (530 g kg^{-1}), com um estado de agregação mais estável e um sistema de poros contínuo, apenas quando a pressão aplicada foi de 200 kPa (umidade de 25 %) e de 400 kPa (umidade de 20 %) é que foram obtidos valores de permeabilidade menores que $10 \mu\text{m}^2$.

A elevada umidade do solo reduz a aeração, pois a água bloqueia os poros pelos quais ocorrem as trocas gasosas com o ar atmosférico. Dessa forma, valores máximos da k_a são obtidos em solos completamente secos, decrescendo até zero à medida que o teor de água atinge a saturação, sendo a maior redução da k_a quando os macroporos tornam-se bloqueados (BALL; SCHJØNNING, 2002).

O solo pode estar sujeito a constantes mudanças na sua estrutura por forças externas ou internas. Isto nos indica que o volume dos poros é dinâmico, e, por conseguinte a aeração do solo é um processo dinâmico e muito variável dependendo do tipo de solo assim como do ambiente (BAUMGARTL; KÖCK, 2004; SILVA et al., 2009).

A permeabilidade ao ar mostrou-se sensível às alterações de densidade do solo e de teor de água em dois Nitossolo Vermelho (um argiloso e um muito argiloso) avaliados por Silva et al. (2009), demonstrando ser uma medida útil na avaliação da qualidade física do solo. Em estudos com diferentes sistemas de uso, manejo e classes de solo (ROSEBERG; McCOY, 1990; CAVALIERI et al., 2009) a permeabilidade do solo ao ar também mostrou-se como uma importante indicadora da qualidade estrutural do solo.

Sánchez-Girón, Andreu e Hermanz (1998), em amostras de solos com texturas variando de franco-arenosa a argilosa e com diferentes teores de matéria orgânica, aplicaram esforços de compressão (50, 100, 200 e 400 kPa), utilizando teste de compressão uniaxial, quando as amostras apresentavam os seguintes

conteúdos de água: 5, 10, 15, 20, 25, 30 e 35%. Eles concluíram que a dependência entre índice de compressão e a umidade do solo no momento da compactação afetaram a permeabilidade do solo ao ar: a k_a foi inversamente relacionada com o esforço de compressão e apresentou decréscimo à medida que o conteúdo de água aumentou.

O'Sullivan (1992) observou que a permeabilidade do solo ao ar, em um solo argiloso, aumentou com a umidade, quando compactado. Este comportamento foi associado com o processo de formação de agregados durante o umedecimento das amostras de solo. Em um solo com alto teor de silte (590 g kg^{-1}), Sánchez-Girón, Andreu e Hermanz (1998) verificaram que em umidade entre 15 e 20 %, este processo de agregação de partículas minerais também ocorreu. Eles afirmaram que em baixos conteúdos de água, solos siltosos exibem um baixo grau de estrutura porosa com diâmetros médios dos poros muito pequenos, o que poderia explicar os valores baixos de permeabilidade ao ar encontrados. A redução da permeabilidade do solo ao ar confirmou a redução da porosidade de aeração, assim a quantidade de poros finos aumentou enquanto que os maiores diminuíram durante a compactação (PENG et al., 2004).

2.2 Material e Métodos

2.2.1 Localização e amostragem dos solos

As amostragens foram realizadas na Fazenda Escola Capão da Onça, pertencente a Universidade Estadual de Ponta Grossa ($25^{\circ}05'47''$ latitude Sul; $50^{\circ}03'11''$ longitude Oeste), localizada no município de Ponta Grossa – PR. (Figura 01) . A altitude média da região é de 1025 m e o clima é classificado como subtropical úmido mesotérmico (Cfb), A precipitação média anual de 1545 mm e temperatura média anual de $18,7^{\circ} \text{ C}$ (CAVIGLIONE, 2000).



Figura 1 - Imagem de satélite (Google Earth, 2012), Brasil (a); município de Ponta Grossa-PR (b); Fazenda Escola Capão da Onça (c); I - Solo textura argilosa; II – Solo de textura franco argilo-arenosa

O experimento foi definido como um “on farm research”, onde as áreas de estudo foram delimitadas dentro das áreas de produção. A amostragem foi realizada em maio/2010 entre as safras de verão e inverno, portanto, as culturas de inverno não haviam sido semeadas e as de verão tinham sido colhidas em abril. Essas áreas possuem histórico de rotação de culturas, que incluem culturas de verão como: milho (*Zea mays*), soja (*Glycine max*) e feijão (*Phaseolus vulgaris*) e as culturas de inverno geralmente utilizadas incluem trigo (*Triticum aestivum*), aveia preta (*Avena strigosa*) e ervilhaca (*Vicia sativa*).

Foram delimitadas duas áreas de amostragem (Figura 1), em dois Latossolos Vermelhos, sendo o solo I de textura argilosa ($501,0 \text{ g kg}^{-1}$ de argila e $423,8 \text{ g kg}^{-1}$ de areia) e o solo II de textura franco argilo-arenosa ($225,6 \text{ g kg}^{-1}$ de argila e $741,8 \text{ g kg}^{-1}$ de areia). A textura foi determinada pelo método do hidrômetro (GEE; BAUDER, 1986).

De cada solo foram retiradas 25 amostras indeformadas, utilizando anéis volumétricos de $96,2 \text{ cm}^3$ ($7,0 \text{ cm} \times 2,5 \text{ cm}$) e um dispositivo eletro-mecânico (FIGUEIREDO, 2011), com o objetivo de melhorar a qualidade da amostragem. Os pontos de amostragem foram aleatórios, sendo descartadas áreas marginais. A profundidade de amostragem correspondeu ao centro da camada superficial de 0-5 cm. Realizou-se também a retirada de uma amostra composta de cada solo.

2.2.2 Análises laboratoriais

As amostras indeformadas foram preparadas no Laboratório de Física do Solo da ESALQ/USP, retirando-se o excesso de solo das extremidades das amostras de modo que o volume de solo se equivalesse ao volume do anel. Para evitar perdas de solo durante o manuseio das amostras, colocou-se uma tela permeável à água e ao ar na parte inferior de cada anel.

Estabeleceu-se o primeiro tratamento, denominado de - antes da compactação (A) - onde as amostras foram saturadas com água por capilaridade durante 24 horas, submetidas ao potencial mátrico de -10 kPa durante 24h usando uma mesa de tensão descrita por BALL et al. (1988), pesadas e realizada a medição de permeabilidade do solo ao ar (k_a), através de permeâmetro portátil de carga constante de ar (Figura 2), desenvolvido por Figueiredo (2010), cujo princípio de funcionamento consiste na utilização de uma amostra de solo, confinada em anel volumétrico e com livre fluxo de gases em suas extremidades, a qual é submetida a incrementos sucessivos e constantes de taxas de fluxo de ar, gerando gradientes de pressão. O permeâmetro possui um reservatório de ar comprimido, com a finalidade de fornecer gás sob pressão maior que a atmosférica ao sistema pneumático do permeâmetro. Adicionalmente, o equipamento também possui um controlador de vazão mássica de gases com medidor eletrônico do processo, que mantém uma vazão de ar constante e pré-definida entre 0 e 20 mL min^{-1} , a qual atravessa uma determinada amostra de solo.



Figura 2 - Permeômetro de carga constante de ar (Figueiredo, 2010)

Estabelecendo-se um determinado fluxo de ar e a respectiva diferença de potencial necessária para que esse fluxo transpasse uma amostra e a partir da Lei de Darcy, a densidade de fluxo de ar (q) pode ser descrita como:

$$q = -\frac{k_a}{\eta} \left(\frac{dP}{dZ} + \rho g \right), \quad (5)$$

sendo, (q) [L/T], k_a [L²], (P) a pressão de ar [M/LT²], (Z) a distância [L] na direção do movimento de ar no sistema poroso, (η) a viscosidade do ar [M/LT], (ρ) a densidade do ar [M/L³] e (g) a aceleração da gravidade [L/T²]. A densidade de fluxo corresponde à vazão de ar (Q) [L³/T] por área perpendicular ao movimento do fluido (A_s) [L²] e, considerando como desprezível a influência da densidade do ar (SPRINGER; CULLEN; EVERETT, 1995), a eq. (6) foi utilizada para as estimativas da k_a :

$$k_a = \frac{Q\eta}{A_s} \left(\frac{dZ}{dP} \right), \quad (6)$$

A medida de Z de cada amostra foi considerada no tratamento A igual a altura do anel (0,025 m).

No segundo tratamento, as amostras foram novamente saturadas por capilaridade durante 24 horas, submetidas ao potencial mátrico de -10 kPa usando mesa de tensão durante 24 horas e realizada a compressão uniaxial, que consistiu na aplicação contínua de uma pressão pré-estabelecida de 200 kPa, por meio da

aplicação de uma força de 76,28 Kgf sobre amostra, em um sistema de consolidação e aquisição de dados automatizados (marca Satron, modelo MCT 2000, MIRAE Engineering Inc., Buscan Korea[®]) conforme Figura 3. Esta força simula um estresse típico de compactação em campo, por exemplo, a pressão exercida por um pneu de trator em um estudo de compactação em campo descrito por Gregory et. al 2007 foi igual a 180 kPa. A pressão foi aplicada por cinco minutos, período suficiente para atingir 99% da deformação máxima (SILVA; REINERT; REICHERT, 2000).

Posteriormente à compressão, as amostras foram novamente saturadas por 4 horas e, então, submetidas ao potencial mátrico de -10 kPa usando mesa de tensão durante 24 horas, realizou-se a pesagem e medição de k_a , este segundo tratamento foi chamado de pós-compactação – C0.



Figura 3 - Sistema de consolidação e aquisição de dados Satron MCT 2000

A medida de Z, utilizada na determinação da permeabilidade do solo ao ar, para o tratamento C0 foi aferida considerando a diferença entre a altura do anel e a superfície superior do solo, para isso foi utilizado um micrômetro digital (marca Digimes[®]), com capacidade de 0-25 mm e resolução de 0,001 mm) e um disco metálico de espessura 0,7 mm e diâmetro 50 mm (Figura 4) que tinha por objetivo melhor quantificar a estimativa da deformação do solo para facilitar a leitura do micrômetro já que a área da haste de leitura é relativamente pequena em relação a área superficial da amostra do solo, o que poderia gerar erros na medição.

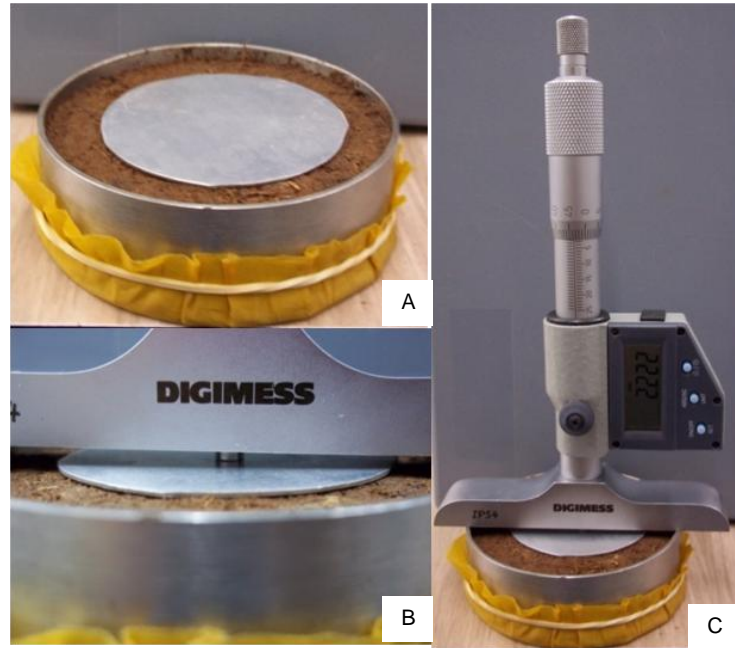


Figura 4 - Disco metálico (figura A), contato haste do micrômetro com o disco (figura B) e medição de altura (figura C)

Na sequência iniciou-se um ciclo de umedecimento e secamento, conforme indicações de Gregory et al. (2009). Esse procedimento consistiu em umedecimento das amostras com água por capilaridade durante 3 horas; drenagem em mesa de tensão ao potencial mátrico $-0,5$ kPa durante 24 horas; secagem em estufa a 40°C por 24 horas; umedecimento com água por capilaridade durante 12 horas; drenagem ao potencial mátrico de -10 kPa por 24 horas, pesagem e medição de k_a . Na medição de k_a considerou-se a medida de Z conforme descrito para C0. Este tratamento foi denominado 1º ciclo (C1).

Foram realizados mais 3 tratamentos repetindo os procedimentos de C1 e denominados 2º ciclo (C2), 3º ciclo (C3) e 4º ciclo (C4), em resumo a sequência dos tratamentos e os respectivos procedimentos são mostrados na tabela 1. Os ciclos foram procedimentos padronizados e realizados em sequência conforme demonstra a figura 5, fluxograma de ciclo.

Tabela 1 - Descrição dos tratamentos

(continua)

Etapa	Tratamentos	Sequência de procedimentos
1	Antes da compactação (A)	Saturação ⁽¹⁾ , Drenagem $_{-10\text{kPa}}$, Pesagem, Medição de k_a ⁽²⁾
2	Pós-compactação (C0)	Compactação ⁽³⁾ , Saturação ⁽¹⁾ , Drenagem $_{-10\text{kPa}}$, Pesagem, Medição de k_a

Tabela 1 - Descrição dos tratamentos

(conclusão)

Etapa	Tratamentos	Sequência de procedimentos
3	1º Ciclo (C1)	Umedecimento ⁽⁴⁾ , Drenagem _{-0,5 kPa} , Secagem _{40 °C} , Umedecimento ⁽⁵⁾ , Drenagem _{-10kPa} , Pesagem, Medição de ka
4	2º Ciclo (C2)	Umedecimento ⁽⁴⁾ , Drenagem _{-0,5 kPa} , Secagem _{40 °C} , Umedecimento ⁽⁵⁾ , Drenagem _{-10kPa} , Pesagem, Medição de ka
5	3º Ciclo (C3)	Umedecimento ⁽⁴⁾ , Drenagem _{-0,5 kPa} , Secagem _{40 °C} , Umedecimento ⁽⁵⁾ , Drenagem _{-10kPa} , Pesagem, Medição de ka
6	4º Ciclo (C4)	Umedecimento ⁽⁴⁾ , Drenagem _{-0,5 kPa} , Secagem _{40 °C} , Umedecimento ⁽⁵⁾ , Drenagem _{-10kPa} , Pesagem, Medição de ka

Simbologias: Drenagem_{-10kPa}, amostras equilibradas no potencial mátrico de -10 kPa durante 24 h; Drenagem_{-0,5kPa}, amostras equilibradas no potencial mátrico de -0,5 kPa durante 24 h; Secagem_{40 °C}, amostras secas em estufa a 40 °C durante 24 h

(1) Amostras umedecidas com água, por capilaridade, durante 24 h

(2) ka é a permeabilidade do solo ao ar

(3) Amostras submetidas à compressão uniaxial de 200 kPa durante cinco minutos

(4) Amostras umedecidas com água, por capilaridade, durante 3 h

(5) Amostras umedecidas com água, por capilaridade, durante 12 h

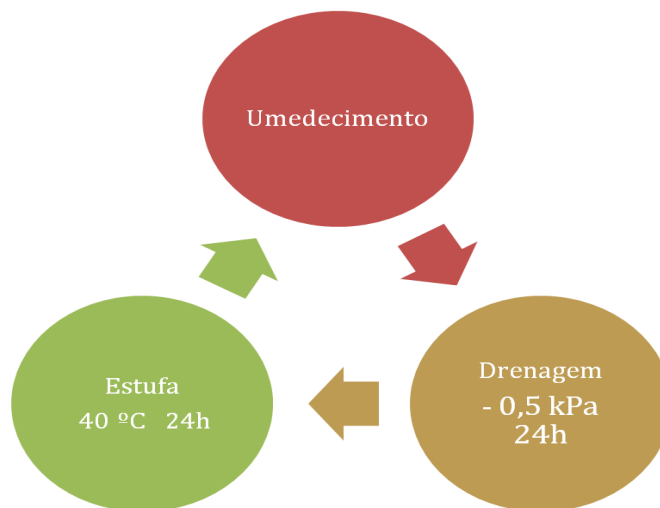


Figura 5 – Fluxograma Ciclo de Umedecimento e Secamento

Com os dados de pesagem e volume de solo, para cada tratamento, foram determinadas a densidade do solo (ρ_s), em $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ (BLAKE; HARTGE, 1986), e a umidade volumétrica (θ) obtida por (eq. 7):

$$\theta = \left(\frac{\rho_s}{\rho_a} \right) \times U, \quad (7)$$

onde ρ_a é a densidade da água (g cm^{-3}) e U é a umidade gravimétrica em g g^{-1} conforme Gardner (1986).

A porosidade total do solo (α), em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, foi calculada pela equação abaixo (eq. 8):

$$\alpha = 1 - \left(\frac{\rho_s}{\rho_a} \right) \quad (8)$$

E porosidade livre de água ou porosidade de aeração (ϵ_a), em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ foi estimada pela diferença entre o conteúdo de água e a porosidade total descrita pela eq. (9):

$$\epsilon_a = \alpha - \theta. \quad (9)$$

As amostras passaram por secagem em estufa a 105°C por 24 horas, para a obtenção da massa de solo seco.

Com a amostra composta de cada solo determinou-se o carbono orgânico pelo método de combustão via seca, através da utilização de um analisador elementar (Thermo[®] Flash EA 1112) onde a medida do carbono do solo é baseado na quantificação do CO_2 por infravermelho médio, sendo que o CO_2 é formado pela oxidação dos constituintes orgânicos da amostra. E a quantificação da densidade de partícula, retirando-se uma alíquota de solo de terra fina a qual foi seca em estufa e utilizou-se o método de deslocamento de gás através de um picnômetro a gás Hélio (modelo ACCUPYC 1330, marca Micrometrics Instrument Corporation[®]), partindo do princípio de um volume e massa conhecidos, foram processados 8 g de cada amostra composta em triplicata.

2.2.3 Resiliência do solo

Os índices de resiliência do solo (taxa de recuperação) foram calculados para as propriedades densidade do solo, conteúdo volumétrico de água, porosidades total e de aeração e permeabilidade do solo ao ar, segundo Herrick e Wander (1998) pela seguinte equação:

$$\text{Resiliência(recuperação)} = (B-C)/(A-C) \quad (10)$$

onde A é a capacidade do solo em funcionar em pré-distúrbio (antes da compactação – tratamento A); B , o nível de recuperação (medido após o quarto ciclo

– C4) e C, o nível de funcionamento do solo imediatamente após o distúrbio (após a compactação - tratamento C0).

2.2.4 Análise dos dados

Pela condução diferenciada do experimento, adotou-se o intervalo de confiança da média 85% como critério para discriminação e comparação dos tratamentos, considerando que houve diferença significativa quando não houve sobreposição dos limites superior e inferior. Sendo que o intervalo de confiança representa os limites onde a média dos valores de um conjunto de dados está contida vem a ser útil e confiável para a interpretação de diferenças significativas (PAYTON; MILLER; RAUN, 2000).

2.3 Resultados e discussão

Os valores médios dos teores de carbono orgânico (Tabela 2) não diferiram entre os solos ($p > 0,05$), estes resultados podem ser justificados pelo fato de que ambos os solos vêm sendo manejados sob plantio direto com rotação de culturas e as práticas de manejo utilizadas seguem os preceitos de manutenção de resíduos sobre a superfície e não revolvimento do solo. Estes valores podem ser considerados elevados para os solos em questão e de acordo com Sá (1998) são comumente encontrados em solos da região.

Os valores de ρ_p encontrados também não diferiram entre si ($p > 0,05$), este atributo do solo possui grande estabilidade por ser dependente das proporções relativas das frações mineral e orgânica assim como da composição mineralógica dos solos, e encontram-se dentro da faixa que se enquadram a maior parte dos solos minerais de 2,6 a 2,75 Mg m^{-3} (FERREIRA, 2010; BRADY; WEIL, 2007).

Tabela 2 – Valores médios dos parâmetros físicos do Latossolo Vermelho distrófico (N=25)

Atributo	Solo	
	I	II
Areia, g kg^{-1}	423,8	741,8
Silte, g kg^{-1}	72,2	32,6
Argila, g kg^{-1}	501,0	225,6
Carbono Orgânico, %	3,8	4,3
Densidade de partículas, Mg m^{-3}	2,56	2,58

Na tabela 3, são apresentados os resultados da análise estatística descritiva, para a densidade do solo (ρ_s) os valores do solo I variaram de 0,99 a 1,40 g cm^{-3} , já para o solo II de 1,07 a 1,55 g cm^{-3} , apresentando baixa variabilidade sendo o coeficiente de variação (CV) em torno 6% para ambos os solos normalmente valores inferiores a 15% conforme Warrick (1998) são encontrados para esta propriedade, os valores médios encontrados foram de 1,27 g cm^{-3} para o solo I e de 1,38 g cm^{-3} para o solo II.

O conteúdo de água no solo apresentou valores médios de 0,39 e 0,28 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, respectivamente para o solo I e II. A porosidade total ficou em média de 0,50 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ no solo I e 0,47 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ no solo II, com variação em torno de 6% em ambos os solos. Já a variável porosidade de aeração apresentou CV de 33,69% para o solo a devido as características do solo argiloso de drenagem mais lenta, já o solo b apresentou CV de 7,28%.

A K_a foi altamente variável como indica o coeficiente de variação de 109,02% para o solo I e 78,70% para o solo II, por se tratar de uma propriedade dinâmica a permeabilidade do solo ao ar possui esta característica e valores como estes são encontrados como em Cavalieri et al. (2009) em solo com 43% de argila encontraram valores de CV de K_a entre 25 a 75% variando com a profundidade amostrada.

Tabela 3 – Momentos estatísticos para as propriedades estudadas (N=25)

	Solo	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	DP	CV(%)
ρ_s (g cm^{-3})	I	0,99	1,40	1,27	1,30	0,09	6,31
	II	1,07	1,55	1,38	1,39	0,11	6,38
θ_{cc} ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	I	0,34	0,45	0,39	0,39	2,15	4,35
	II	0,20	0,39	0,28	0,28	3,17	10,49
α ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	I	0,45	0,61	0,50	0,49	3,57	6,22
	II	0,40	0,59	0,47	0,46	4,13	6,38
ε_a ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	I	0,02	0,26	0,11	0,11	4,41	33,69
	II	0,08	0,39	0,19	0,18	6,10	7,28
K_a (μm^2)	I	0,10	79,69	14,29	7,76	16,91	109,02
	II	0,74	75,60	13,28	9,42	11,99	78,70

2.3.1 Densidade do Solo

Na figura 6 observa-se que em ambos os solos houve diferença significativa entre o tratamento A e os demais tratamentos, após a compactação a densidade manteve-se praticamente constante.

Em relação aos valores de densidade restritivos ao crescimento de raízes, considerados para solos argilosos entre 1,3 e 1,4 Mg m^{-3} (REICHARDT et al., 2003), e para solos arenosos acima de 1,75 Mg m^{-3} (CORSINI; FERRAUDO, 1999), observa-se que as amostras não apresentaram valores de ρ_s elevados após a compactação e se enquadram abaixo dos limites restritivos.

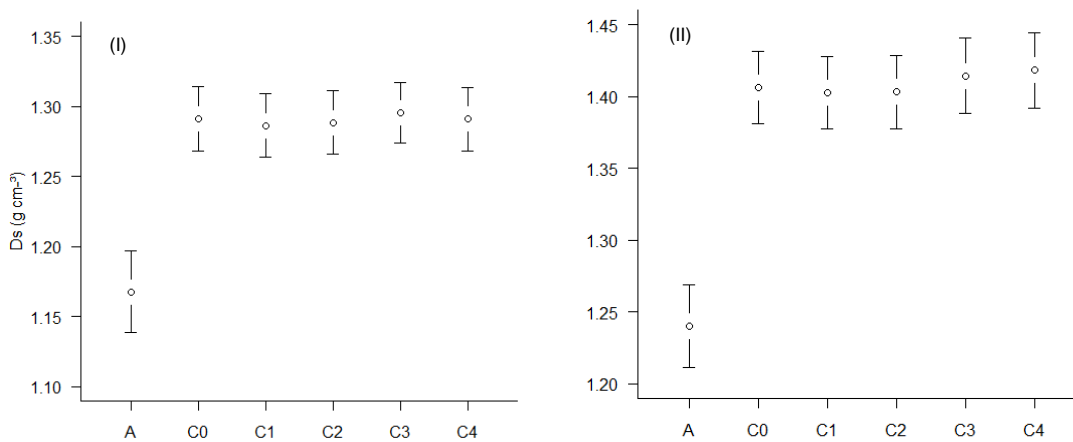


Figura 6 – Valores médios de densidade do solo de um Latossolo vermelho distrófico argiloso (I) e franco areno-argiloso (II), nos tratamentos A, C0, C1, C2, C3 e C4. As barras representam o intervalo de confiança (85%)

Os estresses induzidos aumentaram a densidade do solo e alteraram a estrutura do solo, mesmo após C4, por se tratar de uma propriedade de difícil recuperação após um distúrbio, a densidade não recuperou sua condição inicial não, portanto influenciada pelos ciclos de umedecimento e secamento.

Esta condição de incremento na densidade do solo após a compactação, condição observada em ambos os solos, mensurada através do índice de resiliência (figura 7) apresentou valores médios próximos a zero o que demonstra que quando afetada a densidade do solo necessita de medidas de manejo e um tempo maior de recuperação.

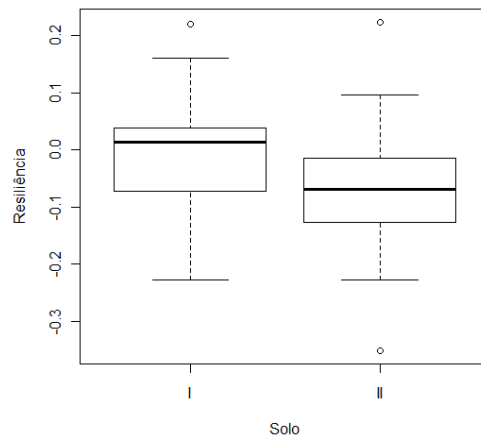


Figura 7 – Distribuição dos índices de resiliência da densidade do solo de um Latossolo Vermelho distrófico argiloso (I) e franco areno-argiloso (II). As barras representam o intervalo de confiança (85%)

Alguns autores relatam um aumento da densidade de solos sob plantio direto devido a compactação causada pelo tráfego de máquinas e o não revolvimento, (HÂKANSSON et al., 1995; STRECK et al., 2004; GIAROLA et al., 2009), ocasionando um rearranjo das partículas, em ambos os solos a densidade do solo permaneceu com valores mais elevados após a compactação mesmo quando exposta as forças dos ciclos de umedecimento e secamento.

2.3.2 Conteúdo volumétrico de água, porosidades total e de aeração.

A retenção de água foi afetada pela compactação das amostras em ambos os solos. Observa-se que o conteúdo volumétrico de água nas amostras do solo I apresentou diferença significativa do tratamento C0 em relação aos demais, ou seja, na condição após a compactação apresentou um incremento alcançando valores médios em torno de $0,41\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$. Nos tratamentos C1 a C4 observa-se que o conteúdo volumétrico de água retorna a valores semelhantes a condição inicial representada pelo tratamento A, antes da compactação.

No solo II houve diferença significativa do tratamento A em relação as demais, após a compactação o solo II apresentou valores médios de conteúdo volumétrico de água mais elevados em torno de $0.28\text{cm}^3.\text{m}^{-3}$, e permaneceu após os ciclos de umedecimento e secamento.

O comportamento distinto desta variável nos dois solos estudados se deve a capacidade de retenção de água que conforme Roseberg e McCoy (1990), solos com maior conteúdo de argila frequentemente apresentam maior microporosidade, o que se traduz em uma maior retenção de água no solo corroborando com os resultados deste estudo, assim como devido sua área superficial maior a água fica retida como pequenos filmes aderidos à superfície das partículas do solo (BRADY; WEIL, 2002).

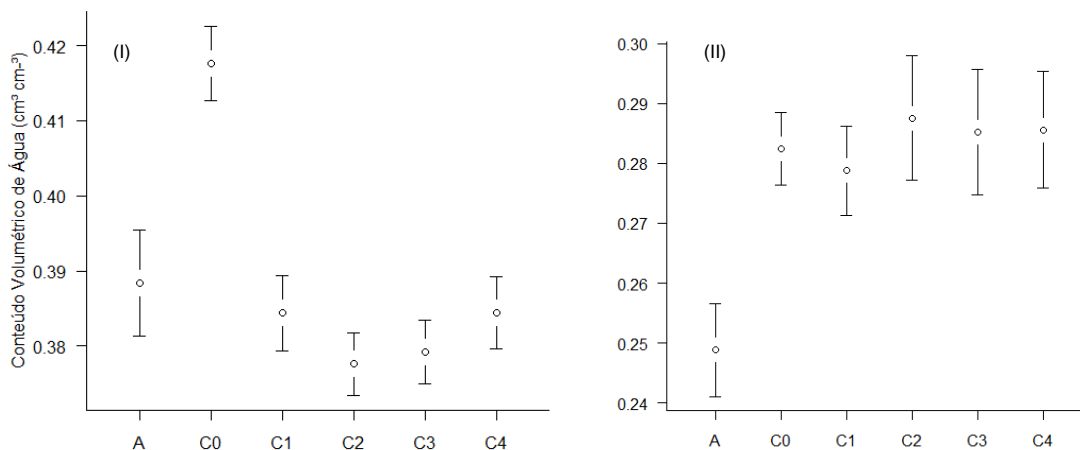


Figura 8 – Valores médios de conteúdo volumétrico de água de um Latossolo vermelho distrófico argiloso (I) e de um franco areno-argiloso (II) nos tratamentos A, C0, C1, C2, C3 e C4. As barras representam o intervalo de confiança (85%)

Na figura 9 o solo I apresenta índices de resiliência próximos a 3 e o solo II valores negativos, demonstrando a maior resiliência do solo I provavelmente, devido ao maior conteúdo de argila, no processo de umedecimento haja uma maior retenção de água mesmo após a compactação. (DEXTER, 1991).

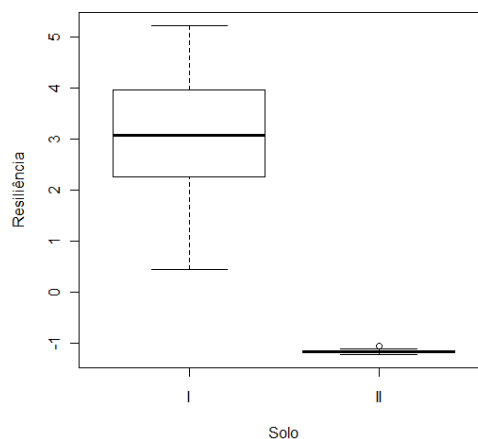


Figura 9 – Distribuição dos índices de resiliência do conteúdo volumétrico de água de um Latossolo Vermelho distrófico argiloso (I) e franco areno-argiloso (II). As barras representam o intervalo de confiança (85%)

Os valores de porosidade de aeração, apresentados na figura 9, demonstram que no solo I, há uma recuperação significativa após C1 em relação a C0, porém os valores não alcançam o estado inicial A. No solo II não houve recuperação após C0, a redução significativa da porosidade de aeração do tratamento A em relação aos demais não foi recuperada nos demais tratamentos. Essa recuperação parcial da porosidade de aeração após os ciclos de umedecimento e secamento demonstram que solos com maior conteúdo de argila apresentam maior resiliência em relação a estrutura porosa do solo que solos mais arenosos.

Segundo Chan (2002), valores de porosidade de aeração entre 0,05 e 0,15 ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) podem ser comumente usados como limites críticos e abaixo deste intervalo a aeração é insuficiente para o crescimento das raízes, neste estudo pode-se observar valores médios para o solo I em torno de $0,07 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ em C0, portanto o crescimento das raízes seria limitado pela baixa aeração.

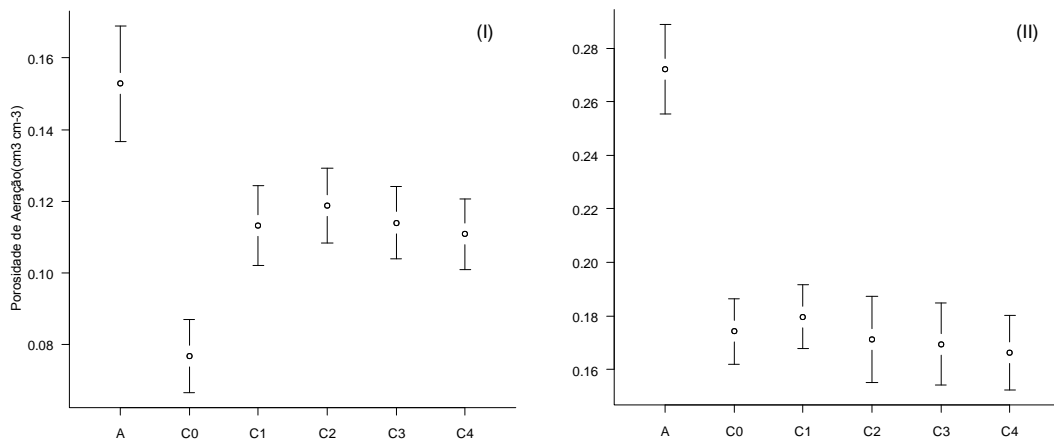


Figura 10 – Valores médios de porosidade de aeração de um Latossolo vermelho distrófico argiloso (I) e franco areno-argiloso (II) para as épocas A, C0, C1, C2, C3 e C4. As barras representam o intervalo de confiança (85%)

Assim como o conteúdo volumétrico de água, a capacidade de recuperação desta propriedade está diretamente relacionada com a capacidade de agregação que favorece a reorganização do sistema poroso a partir de um impacto hidráulico (HORN; BAUMGARTL, 2002). Este impacto causado pelos ciclos de umedecimento e secamento, ou seja, dependendo alterações no conteúdo de água no solo, aliados ao manejo fazem com que a estrutura do solo, e suas propriedades

relacionadas ao sistema poroso como índice de vazios (DÖRNER et al., 2009) capacidade de aeração, condutividade hidráulica e resistência a penetração (DEC et al., 2011) apresentem um comportamento dinâmico e mudem temporariamente e espacialmente.

Já redução significativa na porosidade total nos solos I e II após a compactação (C0) em relação ao tratamento A, pode ser explicada pelo fato dos macroporos sofrerem maior redução e um conseqüente aumento dos microporos quando submetidos a estresses mecânicos reduzindo a porosidade total (ARAÚJO, 2004).

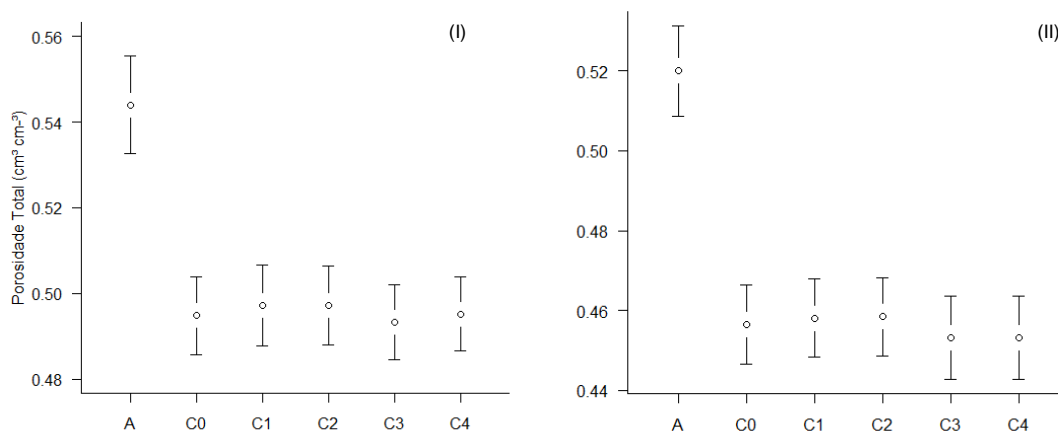


Figura 11 – Valores médios de porosidade total de um Latossolo vermelho distrófico argiloso (I) e de um franco areno-argiloso (II) nos tratamentos A, C0, C1, C2, C3 e C4. As barras representam o intervalo de confiança (85%)

Não há recuperação da porosidade total mesmo após os ciclos de umedecimento e secamento (C1 a C4), assim podemos afirmar que a porosidade total dos solos dependente da estrutura é muito vulnerável aos estresses mecânicos conforme salientado por Baumgart e Köck (2004).

O índice de resiliência próximo a zero demonstra que a porosidade total e de aeração não apresentaram recuperação, portanto foram afetadas pela compactação e os ciclos de umedecimento e secamento não foram suficientes para o retorno a condição inicial.

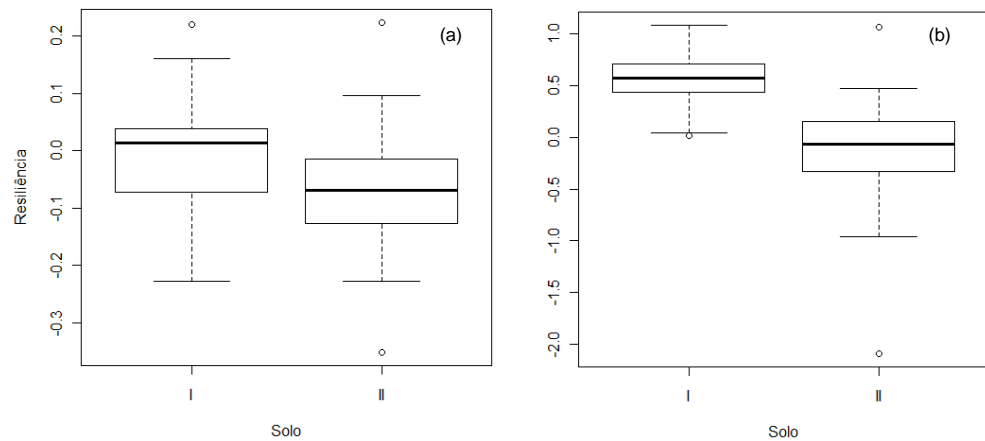


Figura 12 – Distribuição dos índices de resiliência da porosidade total (a) e de aeração (b) de um Latossolo Vermelho distrófico argiloso (I) e de um franco areno-argiloso (II). As barras representam o intervalo de confiança (85%)

2.3.4 Permeabilidade do solo ao ar

Os dados de K_a foram ajustados às distribuições mais próximas da normalidade, por meio da aplicação do logaritmo de K_a , visto que a distribuição dos valores de K_a para os dois solos avaliados apresentou-se assimétrica e não normal usando o teste de Shapiro e Wilk (1965), em acordo com Groenvelt et al., 1984; Ball et al., 1988 e Rodrigues et al., 2011. Os valores médios de $\log K_a$, em todos os tratamentos e para os solos I e II estão apresentados na Figura 13.

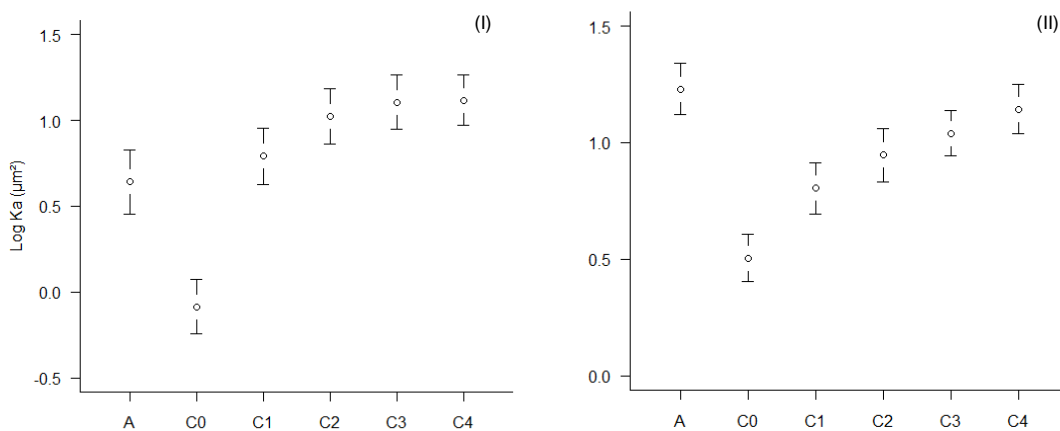


Figura 13 – Valores médios de log de permeabilidade ao ar de um Latossolo vermelho distrófico argiloso (I) e franco areno-argiloso (II) para as épocas A, C0, C1, C2, C3 e C4. As barras representam o intervalo de confiança (85%)

As diferenças significativas entre tratamentos no solo I e no solo II demonstram que o estresse ao ser aplicado fez com que permeabilidade do solo ao ar diminuísse em consequência da compactação e aumentasse após os ciclos. Esta condição do aumento da permeabilidade ao ar segundo Dörner et al. (2011) ocorre pois enquanto os estresses mecânicos diminuem a permeabilidade ao ar como uma consequência da redução de macroporos, o ciclo de secamento permite o solo em transportar mais ar a partir da formação de fendas entre os agregados.

No solo I, no tratamento C0, observa-se valor de $\log K_a$ menor que zero nesta situação o solo, segundo McQueen e Shepard (2002), pode ser considerado impermeável, cujo trabalho afirma que os poros estão bloqueados e não fazem parte do transporte convectivo do ar quando apresentam K_a de $1\mu\text{m}^2$ ($\log K_a=0$) considerando impermeável.

A partir da relação da variável permeabilidade do solo ao ar obtivemos a distribuição dos valores da resiliência física dos solos, calculados conforme Herrick e Wanderm (1998) e indicados na Figura 12, mostrando a variação entre os dois solos e a amplitude dos valores.

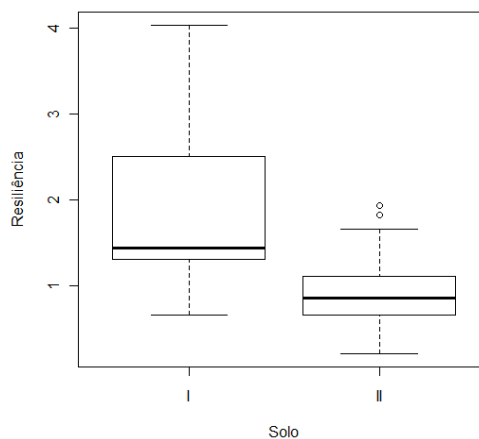


Figura 14 – Distribuição dos valores de resiliência da permeabilidade do solo ao ar de um Latossolo Vermelho distrófico argiloso (I) e de um franco areno-argiloso (II).As barras representam o intervalo de confiança (85%)

Os resultados demonstram que o solo argiloso foi altamente resiliente em relação a recuperação do solo franco argilo-arenoso isto se deve as características de solos com menor porcentagem de argila mais suscetíveis a compactação (SHESTAK;BUSSE,2005) e que se recuperam menos (TOBIAS et. al, 2001). No entanto a recuperação do solo II pode estar relacionada com a presença

de matéria orgânica, já observada pelo o retorno do volume do solo depois de estresses físicos e na mudança de manejo por Zhang et al.(2005).

E assim como Dörner et al (2011) que encontraram uma relação significativa entre a permeabilidade do solo ao ar medida depois do teste de consolidação e a recuperação da estrutura do solo, observa-se que esta a recuperação da permeabilidade do solo ao ar indica a resiliência funcional dos poros do solo já que transmite a capacidade do solo de garantir o transporte de ar, ou seja, a resiliência funcional dos poros aumentou, vale lembrar que solos melhor estruturados possuem maior capacidade de recuperação devido a uma melhor continuidade de poros.

Esta quantificação que relaciona o impacto do manejo sobre as funções dos poros do solo e a sua capacidade em recuperar (DÖRNER et al, 2009, GREGORY et al, 2007, GREGORY et al, 2009, PETH;HORN, 2006) vem, segundo Dörner et al., 2011, de encontro às prioridades atuais como o aumento da população que requer melhor qualidade dos solo, o aumento do peso das máquinas, o qual sujeita o solo a maiores estresses mecânicos e a mudança no clima que aumentará a exposição do solo à seca em muitas áreas. Principalmente nos trópicos e subtropicos onde a os riscos de degradação do solo é um problema severo e as informações em relação a recuperação de áreas degradadas e o impacto econômico na produção possui poucos dados. (BLANCO, LAL, 2010)

3 CONCLUSÕES

A estrutura do solo apresentou um comportamento dinâmico e mudou em consequência da compactação assim como dos ciclos umedecimento e secamento.

A partir da determinação das propriedades físicas do solo foi possível comprovar parcialmente a hipótese de que estas podem ser usadas como propriedades indicadoras de resiliência física do solo.

Os ciclos de umedecimento e secamento contribuíram para a recuperação da permeabilidade do solo ao ar em ambos os solos, as propriedades: conteúdo volumétrico de água e porosidade de aeração apresentaram recuperação parcial no solo I, porém para o solo II não apresentaram recuperação, já as propriedades densidade do solo e porosidade total não apresentaram recuperação da condição inicial em ambos os solos.

Em relação ao distinto comportamento dos dois solos, observou-se que o solo I foi mais resiliente fisicamente que o solo II nas propriedades que apresentaram recuperação.

REFERÊNCIAS

- ADDISCOTT, T.M. Entropy and sustainability. **European Journal of Soil Science**, Dordrechster, v. 46, p.161-168, 1995.
- AMADO, T.J.C.; BAYER, C.; ELTZ, F.L.F.; BRUM, A.C.R. Potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v 25, p.189-197, 2001.
- ARAÚJO, A.G. **Estimativa e classificação da compactação do solo pelo tráfego de máquinas agrícolas através da modelagem nebulosa**. 2004. 224p. Tese (Doutorado em Sistemas Digitais) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- ASSIS, R.L. de; LANÇAS, K.P. Avaliação da compressibilidade de um Nitossolo Vermelho distroférico sob plantio direto, preparo convencional e mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v. 29, n. 4, p. 515-522, 2005.
- BALL, B.C.; O’SULLIVAN, M.F.; HUNTER, R. Gas diffusion, fluid flow and derived pore continuity indices in relation to vehicle traffic and tillage. **Journal of Soil Science**, London, v. 39, p. 327-339, 1988.
- BALL, B. C.; SCHJØNNING, P. Air permeability. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. (Ed.). **Methods of soil analysis**, 5th ed. Madison: American Society of Agronomy & Soil Science Society of America, 2002. part 4. p. 1141-1158.
- BAUMGARTL, T.; KÖCK, B. Modeling volume change and mechanical properties with hydraulic models. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.68, p.57-65, 2004.
- BERTOL, I.; SCHICK, J.; MASSARIOL, J.M.; REIS, E.F.; DILY, L. Propriedades físicas de um Cambissolo húmico afetadas pelo tipo de manejo do solo. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 58, n. 3, p. 555-560, 2001.
- BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis; physical and mineralogical methods**. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. chap 13, p. 363-375.
- BLANCO, H.; LAL, R. Soil Resilience and Conservation. In: **Principles of Soil Conservation and Management**, Columbus: Springer Science Business Media B.V., 2010.p.15-33.
- BLUM, W.H. Basic concepts: degradation, resilience and rehabilitation. In: LAL, R.; BLUM, W.H.; VALENTINE, C. STEWARD, B.A. (Eds.). **Methods for Assessment of Soil Degradation**. New York: CRC Press, 1997. p.1-16.
- BRADY, N.C.; WEIL, R.R. **The nature and properties of soils**. 13th ed. New Jersey: Prentice Hall, 2002. 960 p.

BRAIDA, J.A., REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; SEQUINATTO, L. Elasticidade do solo em função da umidade e do teor de carbono orgânico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 2, p. 477-485, 2008.

BRANDT, A.A. **Propriedades mecânicas de solo franco arenoso sob distintos sistemas de preparo, tráfego mecanizado e resíduos vegetais**. 2005. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

BRANCALIÃO, S.R.; MORAES, M.H. Alterações de alguns atributos físicos e das frações húmicas de um Nitossolo Vermelho na sucessão milho-soja em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 1, p.393-404, 2008.

BRAUNACK, W.A.; DEXTER, A.R. Soil aggregation in the seedbed: a review. II. Effect of aggregate sizes on plant growth. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.14, p.281-98, 1989.

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A. L. Estabilidade de agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo Roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotação de culturas e métodos de preparo das amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 3, p. 527-538, 1998.

CAVIGLIONE, J.H.; KIIHL, L.R.B.; CARAMORI, P.H.; OLIVEIRA, D. **Cartas climáticas do Paraná**. Londrina: IAPAR, 2000. 1 CD-ROM.

CAVALIERI, K.M.V.; SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; LEÃO, T.P.; DEXTER, A.R.; HAKANSSON, I. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a Rhodic Ferrasol in Paraná, Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 103, p. 158-164, 2009.

CHAN, K.Y.; HULUGALLE, N.R. Changes in some soil properties due to tillage practices in rainfed hardsetting Alfisols and irrigated Vertisols of eastern Australia, **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.53, p. 49-57, 1999.

CHAN, K.Y., Bulk Density. In: LAL, R. Ed. **Encyclopedia Of Soil Science**. New York: Marcel Dekker, 2002. p. 128-130.

COLEMAN, D.C.; HENDRIX, P.F.; ODUM, E.P. Ecosystem health: An overview. In: HUANG, P.M., (Ed.). **Soil chemistry and ecosystem health**. Madison:SSSA, 1998. p.1-20.

COLLARES, G.L.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; KAISER, D.R. Compactação de um Latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 933-942, 2008.

BRASIL (País). Companhia Nacional de Abastecimento. Disponível em: <<http://www.conab.gov>>. Acesso em: 20 Jun. 2011.

COREY, A.T. Air permeability. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of Soil Analysis: Physical and mineralogical methods**. 2 ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p.1121-1136.

CORSINI, P. C.; FERRAUDO, A. S. Efeitos de sistemas de cultivos densidade e macroporosidade do solo e no desenvolvimento radicular do milho em Latossolo roxo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, p. 289-98, 1999.

COSTA, F.S.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C.; FONTOURA, S. M. V.; WOBETO, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 3, p. 527-535, 2003.

CRUZ, A.C.R.; PAULETTO, E.A.; FLORES, C.A.; SILVA, J.B. Atributos físicos e carbono orgânico de um Argissolo Vermelho sob sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 6, p.1105-1112, 2003.

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

DEC, D.; DÖRNER, J.; BALOCCHI, O. Temporal and spatial variability of structure dependent properties of a volcanic ash soil under pasture in southern Chile. **Chilean Journal Of Agricultural Research**, Santiago, v.71, 293-303, 2011.

DERPSCH, R.; FRIEDRICH, T.; KASSAM, A; HONGWEN, L. Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits, **International Journal Agricola & Biological Engineering**, Beijing, v.3, n.1, p.1-25, 2010.

DEXTER, A.R. Amelioration of soil by natural processes. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 20, p. 87-100, 1991.

DORAN, J.W. Soil quality and sustainability. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26., 1997, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997. 1 CD-ROM.

DÖRNER, J.; DEC, D.; PENG, X.; HORN, R. Efecto del cambio de uso en la estabilidad de la estructura y la función de los poros de un andisol (typic hapludand) del sur de Chile. **Revista Ciência Suelo Nutricion Vegetal**, Temuco, v.9, p.190-209, 2009.

DÖRNER, J.; DEC, D.; ZÚÑIGA, F.; SANDOVAL, P.; HORN, R. Effect of land use change on Andosol's pore functions and their functional resilience after mechanical and hydraulic stresses. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 115-116, p.71-79, 2011.

DOUGLAS, J.T.; GOSS, M.J.; HILL, D. Measurements of pore characteristics in a clay soil under ploughing and direct drilling, including use of a radioactive tracer (¹⁴⁴Ce) technique. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 1, p.11-18, 1980.

FEDERAÇÃO BRASILEIRA DE PLANTIO DIRETO NA PALHA - FEBRAPDP. **Evolução da área com plantio direto no Brasil** – dados estatísticos. Disponível em: www.febrapdp.org.br/arquivos/BREvolucaoPD2002a2006.pdf. Acesso em: 10 dez. 2010.

FIGUEIREDO, G.C. **Avanços metodológicos e instrumentais em física do solo**. 2010. 163p. Tese(Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

FIGUEIREDO, G.C.; DA SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; GIAROLA, N.F.B.; MORAES, S.O.; DE ALMEIDA, B.G. Improvement of a testing apparatus for dynamometry: procedures for penetrometry and influence of strain rate to quantify the tensile strength of soil aggregates. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p.373-387, 2011.

FRANCO, I.; CONTIN, M.; BRAGATO, G.; DE NOBILI, M. Microbiological resilience of soils contaminated with crude oil. **Geoderma**, Amsterdam, v.121, p. 17-30, 2004.

GARDNER, W.H. Water content. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis; physical and mineralogical methods**. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. chap. 21, p. 493-544.

GEE, G., BAUDER, J.W., Particle-size analysis. In: Klute, A. (Ed.). **Methods of Soil Analysis**. 2nd ed. Madison: Agronomy Monograph, 1986. v. 9, part 1, p. 383–411.

GENRO JR., S.A.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; ALBUQUERQUE, J.A. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho e produtividade de culturas cultivadas em sucessão e rotação, **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 1, p. 65-73, 2009.

GIAROLA, N.F.B.; BRACHTVOGEL, E.L.; FONTANIVA, S., PEREIRA, R.A.; FIOREZE, S.L. Cultivares de soja sob plantio direto em Latossolo Vermelho compactado. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 31, p.641-646, 2009.

GRANT, C.D.; WATTS, C.W.; DEXTER, A.R.; FRAHN, B.S. An analysis of the fragmentation of remolded soils with regard to self-mulching behavior. **Australian Journal Soil Research**, Melbourne, v. 33, p. 569-583, 1995.

GREGORY, A.S.; WATTS, C.W.; WHALLEY, W.E.; KUAN, H.L.; GRIFFITHS, B.S.; HALLET, P.D.; WHITMORE, A.P. Physical resilience of soil to field compaction and the interactions with plant growth and microbial community structure. **European Journal of Soil Science**, London, v.58, p.1221-1232, 2007.

GREGORY, A.S.; WATTS, C.W.; GRIFFITHS, B.S.; HALLET, P.D.; KUAN, H.L.; WHITMORE, A.P. The effect of long-term soil management on the physical and biological resilience of a range of arable and grassland soils in England. **Geoderma**, Amsterdam, v.153, p.172-185, 2009.

- GRIFFITHS, B.S.; RITZ, K.; BARDGETT, R.D.; COOK, R.; CHRISTENSEN, S.; EKELUND, F.; SORENSEN, S.J.; BAATH, E.; BLOEM, J.; DE RUITER, P.C.; DOLFING, J.; NICOLARDIT, B. Ecosystem response of pasture soil communities to fumigation-induced microbial diversity reductions; na examination of the biodiversity-ecosystem function relationship. **Oikos**, Copenhagen, v.90, p.279-294, 2000.
- GROENVELT, P.H.; KAY, B.D.; GRANT, C.D. Physical assessment of soil with respect to rooting potential. **Geoderma**, Amsterdam, v.34, p.101-114, 1984.
- HÅKANSSON, I.; REEDER, R. C. Subsoil compaction by vehicles with high axle load – extent, persistence and crop response. **Soil and Tillage Research**. Amsterdam, v. 29, n. 2–3, p. 277–304, 1994
- HÅKANSSON, I.; MEDVEDEV, V.W. Protection of soils from mechanical overloading by establishing limits for stresses caused by heavy vehicles. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 35, n.1-2, p. 85-97, 1995.
- HÅKANSSON, I. **Machinery-induced compaction of arable soils: incidence, consequences, counter-measures**. Sweden: Dept, of Soil Sciences, Division of Soil Management, Uppsala, 2005. 153 p.
- HERRICK, J.E.; WANDER, M.M. Relationships between soil organic carbon and soil quality in cropped and rangeland soils: The importance of distribution, composition and soil biological activity. In: LAL, R.; KIMBLE, J.M.; FOLLET, R.F.; STEWART, B.A. **Soil Processes and Carbon Cycle. Advances in soil Science**, Boca Raton: CRC Press, 1998. p. 405-426.
- HORN, R. Compressibility of arable land. **Catena**, Jerusalém, v.11, p.53-71, 1988.
- HORN, R.; T. BAUMGARTL. Dynamic properties of soils. In: WARRICK, A.W. (Ed.). **Soil physics companion**. Boca Raton: CRC Press, 2002. p.150-158
- HORN, R.; DOMZAL, H.; SLOWINSKA-JURKIEWICZ, A.; VAN OURWERKERK, C. Soil compaction process and their effects on the structure of arable soils and the environment. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 35, p.23-26, 1995.
- HORN, R.; FLEIGE, H. A method for assessing the impact of load on mechanical stability and on physical properties of soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, n. 1, p. 89–99, 2003.
- IVERSEN, B.V.; MOLDRUP, P.; SCHJØNNING, P.; LOLL, P. Air and water permeability in differently textured soils at two measurement scales. **Soil Science**, Baltimore, v. 166, p. 643-659, 2001.
- KIRKHAM, D. Field method for determination of air permeability of soil in its undisturbed state. **Soil Science Society America Proceedings**, Oxford, v. 11, p.93-99, 1946.
- LAL, R. Tillage effects on soil degradation, soil resilience, soil quality, and sustainability. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.27, p.1-8, 1993.

LAL, R. Sustainable land use systems and soil resilience. In: GREENLAND, D.J.; SZABOLCS, I., **Soil resilience and sustainable land use**. Wallingford: CAB International, 1994. p.41-67.

LAL, R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. **Geoderma**, Amsterdam, v. 123, n. 1-2, p.1-22, 2004.

KLEIN, V.A.; BOLLER, W. Avaliação de diferentes manejos de solo e métodos de semeadura em áreas sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 25, n. 3, p. 395-398, 1995.

LIMA, C.L.R. **Compressibilidade de solos versus intensidade de tráfego em um pomar de laranja e pisoteio animal em pastagem irrigada**. 2004. 70p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Departamento de Solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP.

LOVATO, T.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; VEZZANI, C. Adição de carbono e nitrogênio e sua relação com os estoques no solo e com o rendimento do milho em sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, p.175-187, 2004.

MACHADO, J.L.; TORMENA, C.A.; FIDALSKI, J.; SCAPIM, C.A. Inter-relações entre as propriedades físicas e os coeficientes da curva de retenção de água de um Latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 2, p. 495-502, 2008.

MERTEN, G.H.; MIELNICZUK, J. Distribuição do sistema radicular e dos nutrientes em Latossolo Roxo sob dois sistemas de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 15, n. 2, p. 369-374, 1991.

McBRIDE, R.A.; WATSON, G.C. An investigation of reexpansion of unsaturated, structured soils during cycles static loading. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.17, n.3/4, p.241-253, 1990.

McQUEEN, D.J.; SHEPHERD, T.G. Physical changes and compaction sensitivity of a fine-textured, poorly drained soil (Typic Endoaquept) under varying durations of cropping, Manawatu Region, New Zealand. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 25, p.217-230, 2002.

McKENZIE, B.M.; DEXTER, A.R. Methods for Studying the Permeability of individual Soil Aggregates. **Journal Agricultural Engineering Research**, New York, v. 65. p.23-28. 1996.

MOLDRUP, P.; YOSHIKAWA, S.; OLESEN, T.; KOMATSU, T.; ROLSTON, D.E. Tortuosity, diffusivity, and permeability in the soil liquid and gaseous phases. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, n. 3, p. 613-623, 2001.

MUZILLI, O. Princípios e perspectivas de expansão. In: INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. **Plantio direto no estado do Paraná**. Londrina: IAPAR. p.11-16 (Circular IAPAR, 23).

OLIVEIRA, G.C.; DIAS JUNIOR, M.S.; RESCK D.V.S.; CURI, N. Alterações estruturais e comportamento compressivo de um Latossolo Vermelho distrófico argiloso sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 2, p. 291-299, 2003.

OLIVEIRA, G.C.; DIAS JUNIOR, M.S.; RESCK D.V.S.; CURI, N. Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 2, p. 327-336, 2004.

O'SULLIVAN, M.F. Uniaxial compaction effects on soil physical properties in relation to soil type cultivations. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 24, p.257-269, 1992.

PAYTON, M.E.; MILLER, A.E.; RAUN, W.R.; Testing statistical hypothesis using standard error bars and confidence intervals. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 31, p. 547-551, 2000.

PENG, X.H.; HORN, R.; ZHANG, B.; ZHAO, Q.G. Mechanisms of soil vulnerability to compaction of homogenized and recompacted Ultisols. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 76, p.125-137, 2004.

PETH, S.; HORN, R. The mechanical behavior of structured and homogenized soil under repeated loading. **Journal of Plant Nutrient and Soil Science**, Weinheim, v. 169, n. 3, p. 401-410, 2006.

PETRY, M.T.; ZIMMERMANN, F.L.; CARLESSO, R. ; MICHELON, C.J.; KUNZ, J.H. Disponibilidade de água do solo ao milho cultivado sob sistemas de semeadura direta e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 3, p. 531-539, 2007.

POULSEN, T.G.; MOLDRUP, P.; SCHJØNNING, P.; MASSMANN, J.W.; HANSEN, J.A. Gas permeability and diffusivity in undisturbed soil: SVE implications. **Journal of Environmental Engineering**, New York, v. 124, n.10, p. 979-986, 1998.

REICHARDT, K. ; DOURADO-NETO, D.; TIMM, L C ; BASANTA, M.V.; L.F.CAVALCANTE, ; TERUEL, D. A. ; BACCHI, SANTOS, O.O.; TOMINAGA, T. T. ; C.C.CERRI, ; TRIVELIN, P. C. O. Management of crop residues for sustainable crop production. **IAEA-TECDOC**, Viena, v. 1354, p. 149-169, 2003.

RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; BRITO, O.R.; LANILLO, R.F.; FERREIRA, R.; Compactação do solo: causas e efeitos. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 26, n. 3, p. 321-344, 2005.

REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; HORN, R.; HAKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 102, n. 2, p. 242–254, 2009.

ROSA, D.P. da; REICHERT, J.M.; SATTLER, A.; REINERT, D.J.; MENTGES, M.I.; VIEIRA, D.A. Esforços e mobilização provocada pela haste sulcadora de semeadora, em Latossolo escarificado em diferentes épocas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.43, p. 396-400, 2008.

ROSA, V.T. **Tempo de implantação do sistema plantio direto e propriedades físico-mecânicas de um Latossolo**. 2009. 101p. Tese (doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

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

ROZANOV, B. G. Stressed soil systems and soil resilience in drylands. **In:15th Int. Congress of Soil Science**, Acapulco, v. 29, p.238-245, 1994.

RYDBERG, T. **Studies in ploughless tillage in Sweden 1975-1986**. Uppsala:Division of Soil Management, 1987. 35p. (Report, 76).

SALIRE, E.V.; HAMMEL, J.E.; HARDCASTLE, J.H. Compression of intact subsoils under short-duration loading. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 31, n. 2-3, p. 235-248, 1994.

SÁNCHEZ-GIRÓN, V.; ANDREU, E.; HERMANZ, J.L. Response of five types of soil to simulated compaction in the form of confined uniaxial compression tests. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 48, p. 37-50, 1998.

SEYBOLD, C.A.; HERRICK, J.E.; BREJDA, J.J. Soil resilience: a fundamental component of soil quality. **Soil Science**, New Brunswick, v.164, p.224-234, 1999.
SHAPIRO, S.S.; WILK, M.B. Analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika**, Cambridge, v. 52, p. 591-611, 1965.

SHESTAK, C.J.; BUSSE, M.D. Compaction alters physical but not biological indices of soil health. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.69, p.236–246, 2005.

SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L.; CAMARGO, O.A. Influência da compactação nas propriedades físicas de dois Latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.10, p.91-95, 1986.

SILVA, I.F.; MIELNICZUK, J. Ação do sistema radicular de plantas na formação e estabilização de agregados do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 20, p. 113-117, 1997.

SILVA, V.R. da; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Susceptibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 2, p.239-249, 2000.

SILVA, R.B.; DIAS JUNIOR, M.S.; SANTOS, F.L.; FRANZ, C.A.B. Influência do preparo inicial sobre a estrutura do solo quando da adoção do sistema plantio direto, avaliada por meio da pressão de preconsolidação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 6, p. 961-971, 2003.

SILVA, V. R. da; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Variação na temperatura do solo em três sistemas de manejo na cultura do feijão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 03, p. 391-399, 2006.

SILVA, F.F.; FREDDI, O.S.; CENTURION, J.F.; ARATANI, R.G.; ANDRIOLI, F.F.; ANDRIOLI, I. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho cultivado no sistema plantio direto. **Irriga**, Botucatu, v. 13, n. 2, p. 191-204, 2008.

SILVA, A.P.; LEÃO, T.P.; TORMENA, C.A.; GONÇALVES, A.C.A. Determinação da permeabilidade ao ar em amostras indeformadas de solo pelo método da pressão decrescente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, p. 1535-1545, 2009.

SILVEIRA, P.M.; STONE, L.F. Sistemas de preparo do solo e rotação de culturas na produtividade de milho, soja e trigo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 2, p. 240-244, 2003.

SILVEIRA, P.M; STONE, L.F.; ALVES JÚNIOR J.; SILVA, J.G. Efeitos do manejo do solo sob plantio direto e de culturas na densidade e porosidade de um Latossolo. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v.24, n. 3, p. 53-59, 2008.

SPRINGER, D.S.; CULLEN, S.J.; EVERETT, L.G. Laboratory studies on air permeability. In: EVERETT, L.G.; CULLEN, S.J. (Eds.). **Handbook of vadose zone characterization and monitoring**, Boca Raton: Lewis Publishers , 1995. p. 217-248.

STONE, L.F.; GUIMARAES, C.M.; MOREIRA, J.A.A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro. I: efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 2, p. 207-212, 2002.

STRECK, C.A.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; KAISER, D.R. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 3, p. 755-760, 2004.

SZABOLCS, I., The Concept of Soil Resilience. In: GREENLAND, D.J.; SZABOLCS, I. (Eds.). **Soil Resilience and Sustainable Land Use**, Wallingfor: CAB International, 1994. p.33-39.

TENBERG, A.; VEIGA, M.; DECHEN, S.C.F.; STOCKING, M.A. Modelling the impact of erosion on soil productivity: A comparative evaluation of approaches on data from southern Brazil. **Experimental Agriculture**, Cambridge, v.34, p. 55-71, 1998.

TOBIAS,S.; HENNES,M.; MEIER,E.; SCHULIN,R. Estimating soil resilience to compaction by measuring changes in surface and subsurface levels. **Soil Use Management**, Zurich, v.17, p. 229-234, 2001.

TORMENA, C.A.; ROLLOF, G.; SÁ, J.C.M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 2, p. 301-309, 1998.

VEZZANI, F.M. **Qualidade do sistema solo na produção agrícola**. 2001. 184 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

VEZZANI, F.M.; MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 743-755, 2009.

WARRICK, A.W. Spatial variability. In: HILLEL, D.(Ed.). **Environmental soil physics**. New York: Academic Press, 1998. p. 655-675.

ZHANG, B.; HORN,R.; HALLET, P.D., Mechanical resilience of degraded soil amended with organic matter, **Soil Science Society America Journal**, Madison, v. 69, p. 864-871, 2005.