

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS – CAV
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DOUTORADO EM MANEJO DO SOLO**

FRANCIANI RODRIGUES DA SILVA

**TRINTA E UM ANOS DE SISTEMAS DE MANEJO EM LATOSOLO BRUNO:
ATRIBUTOS FÍSICOS, QUÍMICOS E RENDIMENTO DE CULTURAS**

LAGES, SC

2013

FRANCIANI RODRIGUES DA SILVA

**TRINTA E UM ANOS DE SISTEMAS DE MANEJO EM LATOSOLO BRUNO:
ATRIBUTOS FÍSICOS, QUÍMICOS E RENDIMENTO DE CULTURAS**

Tese apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de doutor no Curso de Pós-
Graduação em Manejo do Solo da Universidade
do Estado de Santa Catarina - UDESC.
Orientador: Dr. Jackson Adriano Albuquerque
Co-orientador: Dr. Álvaro Luiz Mafra

LAGES, SC

2013

FRANCIANI RODRIGUES DA SILVA

**TRINTA E UM ANOS DE SISTEMAS DE MANEJO EM LATOSOLO BRUNO:
ATRIBUTOS FÍSICOS, QUÍMICOS E RENDIMENTO DE CULTURAS**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de doutor no Curso de Pós-Graduação em Manejo do Solo da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC.

Banca Examinadora

Orientador: _____

Dr. Jackson Adriano Albuquerque
(UDESC/Lages - SC)

Co-orientador: _____

Dr. Álvaro Luis Mafra
(UDESC/Lages - SC)

Membros

Dr. Letícia Sequinatto
(UDESC/Lages - SC)

Dr. Jeferson Dieckow
(UFPR – Curitiba, PR)

Dr. João Alfredo Braida
(UFFS – Realeza, PR)

Lages SC, 06 de fevereiro de 2013

AGRADECIMENTOS

À Deus, por me dar sabedoria e força para a conclusão desse trabalho.

À UDESC pelo ensino gratuito e de qualidade.

À CAPES pela concessão da bolsa.

À Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária (Guarapuava/PR) pela disponibilização da área experimental.

A Sandra Fontoura pelo apoio e informações repassadas.

Ao professor Dr. Jackson Adriano Albuquerque pela dedicação, confiança e amizade. Pessoa com a qual pude aprender muito nos últimos 9 anos sob sua orientação.

A todos os professores do curso de mestrado e doutorado pelos ensinamentos e conhecimentos transmitidos.

A equipe do Laboratório de Física e Manejo do solo, que foram de fundamental importância pra a realização dos trabalhos de campo e laboratório. Maria Tereza, Maria Izabel, Heloísa, Adriano, Rúbia, Luiza, Bruno, Paulo Sérgio, Cleber e Augusto.

Aos laboratoristas Fátima e Henrique (pipoca) pelo auxílio nas análises.

Aos colegas e amigos de doutorado e mestrado, especialmente ao André, pelo auxílio na estatística e pelas ricas sugestões que com certeza fizeram toda a diferença na realização desse trabalho; a Andréia, pelo companheirismo, amizade e bondade, sempre pronta à ajudar; ao Luiz e a Sueli, pelos momentos de descontração e conversas, regadas sempre com um bom mate; a Ariane e a Estefânia pela amizade e risadas; a Luciane, Luciana, Cristiane e Rodrigo, o meu muito obrigada.

Ao Neto, companheiro de todas as horas, pelo apoio incondicional, compreensão e principalmente paciência ao longo da realização desse trabalho. Tenho certeza, de que sem você tudo seria muito mais difícil.

Ao meus pais, pessoas simples, que me ensinaram valores dignos e honestos; e que sempre estiveram comigo, me incentivando e apoiando em todas as minhas decisões.

Ao meu irmão Jóbis e a minha cunhada Taymara pelo apoio e torcida.

Aos tios maternos que torcem por mim e sempre possuem palavras de conforto e paz.

Enfim, a todos que de uma forma ou de outra contribuíram para este trabalho.

MUITO OBRIGADA!!!!

RESUMO

SILVA, Franciani Rodrigues da. **Trinta e um anos de sistemas de manejo em Latossolo Bruno: atributos físicos, químicos e rendimento de culturas.** 2013. 128 f. Tese (Doutorado em Manejo do Solo) – Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, Lages, SC, 2013.

O uso de diferentes sistemas de manejo altera os atributos químicos, físicos e hídricos do solo, sendo o tempo uma variável condicionante. Experimentos de longa duração incorporam esta variável e podem informar sobre a evolução dos atributos do solo e suas consequências na produtividade das culturas. Os objetivos desse trabalho foram: avaliar os efeitos nos atributos químicos, físicos e hídricos num Latossolo Bruno Alumínico típico e na produtividade das culturas agrícolas, em experimento de longa duração sob diferentes sistemas de uso e manejo do solo; avaliar o grau de compactação do Latossolo Bruno Alumínico típico limitante ao crescimento e desenvolvimento da cultura da soja. Foram avaliados dois experimentos. O primeiro foi implantado em 1978 e constitui-se nos seguintes sistemas: plantio direto no inverno e no verão (sem calcário, com calcário aplicado em superfície e com calcário incorporado); preparo convencional no inverno e verão (sem calcário e com calcário incorporado); e mata nativa. Os atributos químicos foram avaliados nas camadas de 0-2,5; 2,5-5; 5-10; 10-20 e 20-40 cm e os atributos físicos nas camadas de 0-2,5; 2,5-5; 5-10; 10-20; 20-40; 40-60; 60-80 e 80-100 cm. O segundo experimento foi conduzido em casa de vegetação onde foram montados vasos com 30 cm de altura, compactando a camada de 10-20 cm para obtenção das densidades do solo: 0,9; 0,96; 1,02; 1,08; 1,14; 1,20 e 1,27 Mg m⁻³, o que corresponde a graus de compactação entre 75 e 105%. O uso do solo por longos períodos com preparo convencional aumenta a densidade em subsuperfície e diminui a estabilidade de agregados (DMG) quando comparado com os sistemas de plantio direto e a mata. Todavia, o sistema de plantio direto aumenta a estabilidade de agregados (DMG) para um patamar igual ao da mata, na camada de 0 a 10 cm. Também aumenta a microporosidade, a umidade volumétrica, a retenção de água e a água disponível às plantas, principalmente nas camadas superficiais do solo, em relação ao preparo convencional e a mata. De maneira geral, a calagem não altera os atributos físicos e hídricos do solo. Os sistemas conservacionistas melhoraram os atributos químicos do solo, em relação ao sistema convencional, observado pelo maior teor de cátions trocáveis, P extraível, carbono orgânico e CTC, principalmente na camada de 0 a 5 cm. A calagem superficial realizada no plantio direto é eficiente na correção da acidez, uma vez que não houve diferença no pH do solo, na camada de 5 a 40 cm, quando a calagem foi superficial ou incorporada. No plantio direto, a recuperação nos atributos físicos e o maior teor de nutrientes aumenta o rendimento das culturas. O grau de compactação que restringe a cultura da soja depende do atributo que está sendo avaliado. Quando o grau de compactação é superior a: 75% reduz o crescimento de raízes; 82% a altura das plantas é menor; 87% a massa seca da parte aérea é menor; 93% reduz a evapotranspiração; e 105% cessa o crescimento radicular.

Palavras-chave: Experimento de longa duração. Plantio direto. Preparo convencional. Grau de compactação.

ABSTRACT

SILVA, Franciani Rodrigues da. **Thirty-one years of management systems in Oxisol: physical, chemical and crop yield.** 2013. 128 f. Thesis (Doutorado em Manejo do Solo) – Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, Lages, SC, 2013.

The use of different management systems alters the chemical, physical and hydric soil, and time a conditioning variable. Long-term experiments incorporate this variable can inform the development of soil properties and their consequences on crop productivity. The objectives of this study were to evaluate the effects on the chemical, physical, and water in a Brown Oxisol and crop yield in long-term experiment under different land use systems and soil management; to evaluate the degree of compaction of Brown Oxisol limiting the growth and development of soybean. Were evaluated two experiments. The first was established in 1978 and consists of the following systems: no-tillage in winter and summer (without lime, with lime applied in surface and incorporated lime); conventional tillage in winter and summer (without lime and incorporated lime), and native forest. Chemical characteristics were evaluated in layers of 0-2.5; 2.5-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm, and the physical layers of 0-2.5; 2 0.5 to 5, 5-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80 and 80-100 cm. The second experiment was conducted in a greenhouse where pots were mounted with 30 cm height, compressing layer of 10-20 cm to obtain the densities of soil: 0.9; 0.96; 1.02; 1.08; 1.14; 1.20 and 1.27 Mg m⁻³, corresponding to degrees of compaction between 75 and 105%. The use of the soil for long periods with conventional tillage increases the density in subsurface and decreases the aggregate stability (DMG) when compared with no-tillage and forest. However, the no-tillage system increases the stability of aggregates (DMG) to a level equal to the forest, in the layer 0 to 10 cm. It also increases the microporosity, the volumetric water content, water retention and water available to plants, mainly in the upper soil layers, compared to conventional tillage and forest. Generally, liming does not alter the soil physical and hydric properties. The conservation systems improve the soil chemical properties in relation to conventional system, observed by the higher content of exchangeable cations, extractable P, organic carbon and CEC, mainly in the layer 0 to 5 cm. The liming applied in surface in the no-tillage is effective in correcting soil acidity, since soil pH, in the layer 5-40 cm, is the same when lime was surface applied or incorporated. In no-tillage, the recovery in physical properties and the higher nutrient content increases crop yields. The degree of compaction that restricts the soybean crop depends on the attribute being evaluated. When the degree of compaction is over: 75% reduces root growth; 82% plant height is lower; 87% dry mass of shoots is lower; 93% reduces evapotranspiration; and 105% root growth ceases .

Keywords: Long-term experiment. No tillage. Conventional tillage. Degree of compaction.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização química da área experimental, na camada de 0-0,20 m, antes da instalação do experimento	37
Tabela 2 - Culturas e doses de calcário utilizadas no experimento de 1978 a 2012. Guarapuava – PR.....	40
Tabela 3 - Contrastes das combinações entre sistemas de uso e manejo para a densidade do solo (Ds), porosidade total (PT), macroporosidade (Macro) e microporosidade (Micro) num Latossolo Bruno, Guarapuava, PR.....	47
Tabela 4 - Contrastes das combinações entre sistemas de uso e manejo, para a estabilidade de agregados do solo (DMG) e índice de estabilidade de agregados (IEA) num Latossolo Bruno, Guarapuava, PR.....	56
Tabela 5 - Contrastes das combinações entre sistemas de uso e manejo para a resistência do solo a penetração, em maio de 2009 e em março de 2011, num Latossolo Bruno, Guarapuava, PR.....	58
Tabela 6 - Contrastes das combinações entre sistemas de uso e manejo para o grau de flocação num Latossolo Bruno, Guarapuava, PR.....	60
Tabela 7 - Contrastes das combinações entre sistemas de uso e manejo num Latossolo Bruno, para a umidade volumétrica do solo no dias 06, 08, 12, 16, 18, 22 e 25 de janeiro de 2010...	64
Tabela 8 - Parâmetros do ajuste da curva de retenção de água no solo à equação de Van Genhuchten e Índice “S” nos sistemas de uso e manejo nas diferentes profundidades.....	71
Tabela 9 - Capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e água disponível (AD) nas camadas de 0-2,5, 2,5-5, 5-10, 10-20, 20-40 40-60, 80-100 cm, em diferentes sistemas de uso e manejo de um Latossolo Bruno, Guarapuava, PR.	73
Tabela 10 - Contrastes das combinações entre sistemas de uso e manejo do solo para a capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e água disponível (AD)....	74
Tabela 11 - Condutividade hidráulica saturada (Ks) nas camadas de 0-2,5; 2,5-5, 5-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80 cm num Latossolo Bruno, Guarapuava, PR.....	75
Tabela 12 - Contrastes das combinações entre sistemas de uso e manejo, para a condutividade hidráulica saturada num Latossolo Bruno, Guarapuava, PR.....	75

Tabela 13 - Condutividade hidráulica relativa estimada pelo modelo de VAN GENUCHTEN (1980) até 100 cm de profundidade para os diferentes sistemas de uso e manejo num Latossolo Bruno, Guarapuava, PR.....	77
Tabela 14 - pH em água e teores de Al e H+Al, nas camadas de 0-2,5; 2,5-5; 5-10; 10-20 e 20-40 cm, em diferentes sistemas de uso e manejo de um Latossolo Bruno, Guarapuava, PR.....	84
Tabela 15 - Contrastes das combinações entre sistemas de uso e manejo de um Latossolo Bruno, para o pH em água, Al e H+Al.....	85
Tabela 16 - Teores de Ca, Mg, K, P e CTC efetiva , nas camadas de 0-2,5; 2,5-5, 5-10, 10-20, 20-40 cm, em diferentes sistemas de uso e manejo de um Latossolo Bruno, Guarapuava, PR.	88
Tabela 17 - Contrastes das combinações entre sistemas de uso e manejo de um Latossolo Bruno, para cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K) e fósforo (P).....	89
Tabela 18 - Estoques de carbono orgânico (ECO) calculados em massa equivalente de solo em diferentes sistemas de uso e manejo num Latossolo Bruno, Guarapuava, PR. A mata foi usada como referência.....	93
Tabela 19 - Contrastes das combinações entre sistemas de uso e manejo de um Latossolo Bruno, para carbono orgânico do solo (CO) e estoques de carbono orgânico do solo (ECO).	94
Tabela 20 - Contrastes das combinações entre sistemas de manejo do solo, para as produtividade da soja (safra 2009/2010), de milho (safra 2010/2011) e de soja (safra 2011/2012), num Latossolo Bruno, Guarapuava, PR.....	97
Tabela 21 - Características do Latossolo Bruno na camada de 0 - 0,20 m.	102

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Precipitação, temperaturas média, máxima e mínima, obtidas na base de dados meteorológicos, no período entre 1978 a 2012, da Estação Experimental da FAPA.....	38
Figura 2 - Densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade em diferentes sistemas de uso e manejo num Latossolo Bruno, Guarapuava, PR. NC = Nível Crítico.....	46
Figura 3 - Densidade do solo determinada em 1986 (Eltz et al.,1989), em 2000 (Costa et al., 2003) e 2009 em áreas sob PCsem (a), PDsem (b) e mata nativa, num Latossolo Bruno, Guarapuava, PR.....	50
Figura 4 - Curvas de compactação em diferentes camadas e sistemas de uso e manejo num Latossolo Bruno, Guarapuava, PR.....	52
Figura 5 - Diâmetro médio geométrico (DMG) dos agregados do solo em diferentes profundidades e sistemas de uso e manejo, em janeiro de 2000 (a) (COSTA, 2001) e em janeiro de 2012 (b) num Latossolo Bruno, Guarapuava, PR.....	54
Figura 6 - Índice de estabilidade de agregados do solo (IEA) em diferentes profundidades e sistemas de uso e manejo num Latossolo Bruno, Guarapuava, PR.....	55
Figura 7 - Resistência à penetração e umidade gravimétrica em diferentes sistemas de uso e manejo, em maio de 2009 (a) e em março de 2011 (b) num Latossolo Bruno, Guarapuava, PR.....	57
Figura 8 - Grau de floculação de argila em diferentes sistemas de uso e manejo num Latossolo Bruno, Guarapuava, PR.....	60
Figura 9 - Umidade volumétrica do solo (Uv) nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm, em diferentes sistemas de uso e manejo de um Latossolo Bruno, Guarapuava, PR. Dias 6, 8, 12, 16, 18, 22 e 25 de janeiro de 2010. As linhas pontilhadas e tracejadas representam a umidade na capacidade de campo nos sistemas conservacionistas (PDs) e convencionais (PCs) respectivamente e a linha cheia representa a umidade no ponto de murcha permanente dos sistemas	62
Figura 10 - Armazenamento médio de água no solo (0-10 cm) no período de 08/01 a 25/01/2010 sob sistemas de uso e manejo num Latossolo Bruno, Guarapuava, PR. Teste t a 5% de significância.....	66
Figura 11 - Curvas de retenção de água no solo nos sistemas de uso e manejo num Latossolo Bruno nas diferentes profundidades, e os respectivos contrastes.....	67

Figura 12 - Carbono orgânico no solo nos sistemas de uso e manejo e profundidades.....	92
Figura 13 - Teor de carbono orgânico determinado em 2000 (Costa et al., 2003) e 2009 em área sob plantio direto (PD) (a), preparo convencional (PC) (b) e mata nativa num Latossolo Bruno, Guarapuava, PR.....	95
Figura 14 - Produtividade da soja (safra 2009/2010) (a), produtividade de milho (safra 2010/2011) (b) e produtividade da soja (safra 2011/2012) (c), num Latossolo Bruno nos diferentes sistemas de manejo.	97
Figura 15 - Resistência mecânica do solo à penetração (A), Macroporosidade (B), Porosidade de aeração (C), Altura de plantas (D), Massa seca da parte aérea (E), Massa seca da raiz na camada superior, intermediária e inferior (F) em diferentes graus de compactação de um Latossolo Bruno.(*e** significativo a 5% e 1% de probabilidade respectivamente).....	106
Figura 16 - Evapotranspiração diária nas diferentes densidades num Latossolo Bruno. (* e ** significativo a 5% e 1% de probabilidade respectivamente).....	108

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 HISTÓRICO DOS SISTEMAS DE MANEJO	16
2.2 INFLUÊNCIA DO MANEJO NA QUÍMICA DO SOLO.....	17
2.2.1 Mineralogia.....	17
2.2.3 Cátions trocáveis e acidez do solo	20
2.3 INFLUÊNCIA DO MANEJO NA FÍSICA DO SOLO	22
2.3.1 Textura, grau de floculação e estabilidade de agregados	22
2.3.2 Densidade e porosidade.....	24
2.3.3 Resistência à penetração.....	25
2.3.4 Umidade do solo e disponibilidade de água às plantas	28
2.3.5 Condutividade hidráulica do solo	30
3 HIPÓTESES	32
3.1 OBJETIVOS	32
3.1.1 Objetivos Gerais.....	32
3.1.2 Objetivos Específicos	33
4 CAPÍTULO I - ATRIBUTOS FÍSICOS E HÍDRICOS DE UM LATOSOLO BRUNO SOB DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO EM EXPERIMENTO DE LONGA DURAÇÃO	34
RESUMO	34
4.1 INTRODUÇÃO	35
4.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	36
4.2.1 Localização e solo	36
4.2.2 Clima	37
4.2.3 Histórico do experimento	38
4.2.4 Sistemas estudados.....	40
4.2.5 Coleta das amostras e determinações de laboratório e campo.....	41
4.2.6 Análise estatística.....	44
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.3.1 Densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade.....	44
5.3.1.1 Variação temporal da densidade do solo	49
5.3.2 Ensaio de Proctor	50

5.3.3 Estabilidade de agregados e variação temporal	53
5.3.4 Resistência do solo à penetração.....	56
5.3.5 Grau de Floculação.....	59
5.3.6 Umidade volumétrica e armazenamento de água	60
5.3.7 Curva de retenção de água.....	66
5.3.8 Índice S	70
5.3.9 Capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e água disponível (AD).....	72
5.3.10 Condutividade hidráulica saturada e não saturada.....	74
5.4 CONCLUSÕES	78
5 CAPÍTULO II - SISTEMAS DE MANEJO EM LATOSOLO BRUNO: ATRIBUTOS QUÍMICOS E PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS.....	79
RESUMO	79
5.1 INTRODUÇÃO	80
5.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	81
5.2.1 Coleta das amostras e determinações de laboratório.....	82
5.2.2 Análise estatística.....	82
5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	83
5.3.1 Componentes da acidez do solo: pH, Al e H+Al.....	83
5.3.3 Carbono orgânico e estoques de carbono	90
5.3.4 Produtividade de grãos das culturas.....	96
5.2 CONCLUSÕES	98
6 CAPÍTULO III - GRAU DE COMPACTAÇÃO DE UM LATOSOLO BRUNO: EFEITOS NA CULTURA DA SOJA.....	99
RESUMO	99
6.1 INTRODUÇÃO	100
6.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	102
6.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	104
6.4 CONCLUSÕES	109
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	110
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	111
ANEXOS.....	14

1 INTRODUÇÃO GERAL

O desafio da agricultura está na busca de sistemas de manejo que promovam a sustentabilidade socioeconômica da exploração agrícola e de sistemas que proporcionem a mínima alteração da estrutura do solo (SOARES et al., 2005). Entretanto, mesmo com mínima alteração da estrutura sempre ocorrem modificações nos atributos do solo, principalmente quando comparados com solo de áreas não ou pouco antropizadas, como o campo ou mata nativa.

A conversão de áreas sob vegetação natural para a produção agrícola altera a estrutura do solo devido, principalmente, às operações relacionadas ao preparo do solo e ao tráfego de máquinas. Tais operações modificam o volume de poros, os fluxos de água no solo, a aeração, a temperatura, a resistência à penetração das raízes, a agregação do solo (LETEY, 1985), e assim, a disponibilidade de água (COSTA et al., 2003) e nutrientes às plantas (CIOTTA et al., 2003) e o crescimento radicular (De MARIA et al., 1999). Esses fatores são de grande importância, e devem ser relacionados entre si para avaliar a capacidade funcional e a sustentabilidade do solo, pois alteram a produção agrícola e a qualidade do ambiente.

O uso contínuo, tanto de sistemas convencionais como de conservacionistas, modifica sensivelmente os atributos físicos, químicos e biológicos do solo, no entanto, os efeitos e a magnitude destas alterações são dependentes do sistema de manejo adotado. O preparo do solo antes do plantio ou semeadura, em sistemas convencionais, tem por objetivo básico, eliminar plantas invasoras, incorporar corretivos e fertilizantes e facilitar as condições de emergência e estabelecimento das plantas. Essa prática modifica a estrutura do solo, decorrente do tráfego intenso de tratores, e da ação de implementos que desagregam o solo. O revolvimento da camada superficial diminui a estabilidade dos agregados do solo (COSTA et al., 2003), aumenta a erosão hídrica (BERTOL et al., 2004) e diminui a retenção de água (VIERA & KLEIN 2007). Além disso, faz com que ocorra a transferência da compactação para camadas mais profundas, formando o chamado “pé-de-arado”, que ocorre abaixo da camada arável (SILVA, 2003). Tanto a compactação como o revolvimento do solo determinam as relações entre ar e água, que influenciam diretamente no crescimento radicular e desenvolvimento vegetal (LETEY, 1985).

Nos sistemas conservacionistas, o baixo revolvimento do solo e a manutenção dos resíduos sobre a superfície aumentam o teor de carbono orgânico, o qual, dentre outros, promove a estabilidade dos agregados, melhora a estrutura do solo, aumenta a resistência à erosão e a atividade biológica. No entanto, a menor mobilização do solo e o tráfego de

máquinas e equipamentos, especialmente em condições de solo úmido, podem resultar em camadas compactadas, principalmente em superfície, podendo muitas vezes afetar a produtividade das culturas (SECCO et al., 2004).

Comparativamente aos sistemas convencionais, os efeitos da compactação tendem a ser mais persistentes no plantio direto, pois nesse sistema as raízes exploram menor volume de solo ficando mais susceptíveis às variações climáticas, além disso, os revolvimentos ocasionados pelo preparo convencional reduzem, anualmente, os efeitos da compactação na camada arável.

Tendo em vista as alterações e os impactos causados pela ação antrópica, têm sido constantemente pesquisados e recomendados sistemas de manejo que mantenham ou melhorem os atributos do solo. Porém, o grau com que os sistemas de manejo alteram os atributos do solo a longo prazo, ainda é pouco conhecido, devido às grandes variações de solo e clima e às variações de operações, tipo e peso dos equipamentos e tipos de culturas usadas nas mais variadas regiões e propriedades agrícolas. Nesse sentido, estudos em experimentos de longa duração são necessários para melhor investigar e elucidar os principais problemas e soluções que ocorrem nos diferentes sistemas de manejo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 HISTÓRICO DOS SISTEMAS DE MANEJO

Historicamente, no Brasil predominou o preparo convencional para a implantação das culturas, o qual se caracteriza pelo revolvimento do solo, com incorporação total dos resíduos da cultura anterior, deixando o solo praticamente descoberto na fase de implantação e desenvolvimento inicial das culturas. Essa prática foi trazida das regiões temperadas e mostrou-se inadequada para as regiões tropicais e subtropicais, sendo apontada como a principal causa de degradação dos solos nestas regiões (MIELNICZUK et al., 2003). O excesso de revolvimento e a ausência de cobertura do solo desencadearam sérios problemas de erosão, acelerando o processo de degradação e perda da camada superficial (CASSOL, 1984; BERTOL & MIQUELUTI, 1993). Além disso, o uso de máquinas e implementos agrícolas utilizados no preparo da camada superficial do solo, resultou na compactação da camada subsuperficial, devido a transferência de carga para as camadas inferiores, tendo esta efeito cumulativo ao longo do tempo (HÅKANSSON et al., 1988). Essas alterações afetam o movimento do ar e da água e também o desenvolvimento radicular das plantas (CORSINI, 1974). Segundo Letey (1985) alterações na estrutura do solo, seja pelo revolvimento ou pela compactação, afetam diretamente as relações entre suas fases sólida, líquida e gasosa.

Assim, com o objetivo de avaliar a degradação do solo pelas práticas convencionais e cultivo excessivo, em meados da década de 1930 e 1940, iniciaram-se estudos relacionados à física do solo. Bodman & Rubin (1948) consideraram que o uso de máquinas na preparação do solo destrói os agregados e compacta o solo. A compactação subsuperficial também foi considerada consequência do preparo convencional do solo para a cultura da cana-de-açúcar (GIBB, 1939). Diminuição na macroporosidade e aumento da microporosidade, ao longo da profundidade do perfil também foram observadas por Laws & Evans (1949).

Os efeitos da degradação observadas ao longo dos anos geraram a necessidade de implementar práticas de conservação do solo para melhoria dos atributos físicos, especialmente as relacionadas à estrutura. Assim, na mesma década em que se intensificaram os estudos sobre física do solo, iniciaram-se na Inglaterra, na estação Experimental de Rothamsted, os primeiros trabalhos utilizando sistemas de plantio direto, o qual se caracterizou por manter os resíduos sobre a superfície e pelo menor revolvimento do solo para a implantação das culturas. No início da década de 1960, vários agricultores iniciaram testes em fazendas na Europa, EUA e Canadá.

Porém, há registros que, somente na década de 1970 houve a introdução do plantio direto no Brasil pelos agricultores da Missão Agrícola Alemã no Centro Sul do Paraná. Posteriormente, essa técnica se expandiu gradativamente pelos Estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, São Paulo, Minas Gerais e Mato Grosso do Sul (CORRÊA, 1985). A introdução desse sistema ocorreu visando qualidade física do solo, ao passo que, a perda de solo e consequentemente de nutrientes por erosão constituía-se em problemas notórios na região.

Com o passar dos anos, o plantio direto consolidou-se no Brasil como a principal prática de manejo e conservação do solo principalmente nas regiões sul e centro-oeste. Passou a ser visto como uma importante ferramenta no manejo dos solos, não somente por reduzir significativamente a erosão, mas devido à redução nos gastos com combustível, aumento da matéria orgânica e manutenção de umidade no solo. Os benefícios observados ao solo com a utilização do plantio direto, fez com que houvesse aumento considerável das áreas plantadas no Brasil neste sistema ao longo dos anos. Em 1975/76 o plantio direto ocupava uma área de 32.500 ha; vinte anos depois a área já era de 5.500.000 ha; em 2005/06 passou para 25.501.656 ha (FEBRAPD, 2011).

Apesar da consolidação desse sistema em várias regiões é necessário o desenvolvimento de estudos regionais, relacionando os efeitos sobre os atributos do solo e a produtividade das culturas, uma vez que os efeitos são função do tipo de solo, do clima e das culturas utilizadas (SIDIRAS & VIEIRA, 1984), além de particularidades do manejo adotado.

2.2 INFLUÊNCIA DO MANEJO NA QUÍMICA DO SOLO

2.2.1 Mineralogia

Os solos tropicais geralmente apresentam elevado grau de intemperismo, com mineralogia da fração argila composta por minerais silicatados do tipo 1:1 e óxidos de ferro (goethita e hematita) e alumínio (gibbsita), sendo que os Latossolos são os que melhor representam as tendências pedogenéticas dos solos tropicais (ALVES, 2002). Na superfície das partículas predominam as cargas dependentes do pH (ALMEIDA et al., 2000), e a presença de óxidos de Fe e Al confere capacidade de adsorver ânions, principalmente os fosfatos e metais pesados, como, por exemplo o Cd, Zn e Ni (MOTA et al., 2007; ALMEIDA et al., 2003). A reatividade dos minerais e a fixação de fósforo estão relacionadas à elevada

área superficial específica (ASE) e aos grupos funcionais Fe-OH e Al-OH, presentes na superfície dos óxidos (ERNANI, 2008), os quais estabelecem reações de coordenação com o fosfato (BAYER, et al., 2009).

Apesar da grande importância, pouco se sabe sobre a influência dos sistemas de manejo na mineralogia dos solos. Todavia, é esperado que alterações na mineralogia ocorressem após longos períodos de uso com sistemas de manejo. Avaliando diferentes sistemas de manejo como preparo convencional, preparo mínimo e plantio direto, Gonçalves et al. (2008) não observaram mudanças significativas na mineralogia do Latossolo Vermelho distrófico nos diferentes sistemas de manejo após 24 anos da implantação do experimento. Ao analisar características químicas e mineralógicas de um Latossolo Bruno, 23 anos após a aplicação de calcário, Azevedo et al. (1996) não detectaram alterações na mineralogia do solo, no entanto relataram diminuição da atividade do Al na solução do solo e desaceleração do processo de intercalação de Al-OH na esmectita com hidróxi-Al nas entre camadas. Isso ocorreu devido à aplicação de doses muito altas de calcário. Assim, os estudos demonstram que, até o momento os sistemas de manejo pouco alteram a mineralogia do solo, entretanto as modificações no teor de carbono orgânico e do pH do solo alteram a quantidade de cargas na superfície das partículas.

2.2.2 Carbono Orgânico

Em solos tropicais, a fração orgânica normalmente representa menos de 5% dos constituintes sólidos do solo. O teor de matéria orgânica tem relação direta com a disponibilidade de nutrientes, e assim, no desenvolvimento das plantas e na sustentabilidade e capacidade produtiva dos solos (ERNANI, 2008).

Devido ao grande número de grupos funcionais de superfície e a alta área superficial específica ($\sim 850 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$) (CHIOU et al., 1990; ERNANI, 2008) a matéria orgânica é a principal responsável, em solos tropicais, pelo aumento da retenção e disponibilidade de nutrientes para as culturas (CIOTTA et al., 2002), pela capacidade de troca de cátions (COSTA et al., 2003) e pela complexação de elementos tóxicos e micronutrientes (SALET, 1994). Além disso, influencia na atividade e diversidade microbiana do solo (CARTER, 1986), na formação e estabilização de agregados (TISDALL & OADES, 1982) e na melhoria da estrutura do solo, influenciando diretamente a distribuição de macroporos e microporos (ALBUQUERQUE, et al., 1995), diminuindo assim, as perdas de solo por erosão (CASSOL, 1984; ELTZ et al., 1989).

Em sistemas naturais o teor de matéria orgânica é controlado pelos fatores de formação do solo (clima, material de origem, relevo, atividade biológica e tempo), os quais mantêm-se praticamente constante no tempo. Com a introdução de sistemas agrícolas, geralmente ocorre a alteração dos teores de matéria orgânica, ocasionado principalmente pelo preparo do solo. Os métodos de preparo do solo com maior revolvimento reduzem os teores de matéria orgânica, decorrente do aumento das perdas por erosão hídrica (BERTOL et al., 2004) e da oxidação microbiana (BAYER et al., 2004; DIECKOW et al., 2004), enquanto que os métodos de preparo com mínimo revolvimento associados a sistemas de cultura com alta adição de resíduos vegetais minimizam as perdas e aumentam as taxas de adição de matéria orgânica ao solo (BAYER & MIELNICZUK, 2008).

Segundo Dieckow et al. (2004) o sistema de preparo do solo interfere em alguns processos, que afetam os fluxos do carbono. A mineralização da matéria orgânica pode ser considerada o processo mais importante, pois interfere tanto no acúmulo de C como na emissão de C para a atmosfera. A menor taxa de mineralização da matéria orgânica no plantio direto favorece o acúmulo de C, contribuindo para melhorias nos atributos físicos, químicos e biológicos do solo. Isso pode ser atribuído principalmente à maior proteção física da matéria orgânica, a qual atua como uma barreira física e diminui a disponibilidade de O₂ para os processos oxidativos de decomposição da matéria orgânica (SEXSTONE et al., 1985; DIECKOW et al., 2004). Assim, a menor mineralização da matéria orgânica no plantio direto, acompanhada da rotação de culturas eleva os estoques de matéria orgânica ao longo do tempo em relação ao preparo convencional.

Ao avaliar a matéria orgânica em sistemas de manejo em experimentos de longa duração num Argissolo, Conceição et al. (2005) observaram que, tanto no experimento com 15 anos como no com 10 anos, o plantio direto foi capaz de manter o estoque de carbono orgânico semelhante ao campo nativo. Nos experimentos com 10 e 15 anos os sistemas sob preparo convencional reduziram respectivamente 55 e 54 % o teor de carbono orgânico na camada de 0-5 cm em relação ao campo nativo. Ao avaliar os teores de carbono orgânico num Latossolo Bruno sob diferentes sistemas de manejo em experimento com 21 anos de duração, Ciotta et al. (2003) verificaram que na camada de 0-6 cm, o plantio direto teve 29% mais carbono orgânico do que no preparo convencional.

Para o entendimento dos processos evolutivos da matéria orgânica do solo, diversos modelos têm sido criados com o objetivo de avaliar o efeito de atividades agrícolas sobre os atributos do solo ao longo do tempo. Esses modelos aperfeiçoam o entendimento da dinâmica da matéria orgânica e são ferramentas essenciais para prever alterações e assim, testar

cenários específicos e desenvolver estratégias que mitiguem os efeitos dessas mudanças. Logo, como os benefícios da matéria orgânica nos atributos do solo, ocorrem ao longo do tempo, é necessário avaliar experimentos de longa duração, pois as mudanças são gradativas e aumentam a produtividade e melhoram a qualidade ambiental. Além disso, é indispensável à avaliação do efeito da interferência antrópica sobre a dinâmica e a capacidade de armazenamento da matéria orgânica no solo, bem como das relações estabelecidas entre a matéria orgânica e os atributos físicos e químicos do solo nos diferentes sistemas de manejo.

2.2.3 Cátions trocáveis e acidez do solo

A capacidade de troca de cátions (CTC) varia com a mineralogia e na razão direta dos teores de argila e de matéria orgânica. A CTC da matéria orgânica varia de 300 a 1.000 cmol_{kg⁻¹} (ERNANI, 2008), muito superior a da caulinita e óxidos de Fe e Al. Tal fato eleva a CTC do solo à medida que aumentam os teores de matéria orgânica e tem com consequência maior disponibilidade de nutrientes às plantas. Sendo assim, em solos de regiões tropicais e subtropicais, a matéria orgânica é um componente fundamental do potencial produtivo (BAYER & MIELNICZUK, 2008). Ao estudar a CTC da matéria orgânica e da fração mineral, em 22 perfis de solos do Estado de São Paulo, VAN RAIJ (1969) verificou que a contribuição da matéria orgânica à CTC foi maior nos horizontes superficiais e menor nos subsuperficiais. O autor atribuiu que, como a matéria orgânica decresce em profundidade, a sua contribuição à CTC também diminui no mesmo sentido.

As diferentes frações da matéria orgânica influenciam distintamente a acidez do solo, pois as reações dos componentes da fração húmica não são as mesmas que as dos compostos parcialmente decompostos. Os compostos da matéria orgânica humificada normalmente dissociam H⁺ e diminuem o pH dos solos agrícolas. Isso acontece porque, no pH de solos agrícolas, os componentes orgânicos têm carga líquida negativa, e nesses níveis de acidez, muitos grupos funcionais ácidos da matéria orgânica se encontram dissociados, em decorrência dos valores baixos de suas constantes de ionização (pKa) (ERNANI, 2008).

Por outro lado, os resíduos orgânicos em estádios de decomposição anteriores aos da fração húmica podem até elevar o pH do solo, dependendo da sua composição bioquímica. O grupo funcional amina (R-NH₂), presente na composição de algumas plantas, eleva o pH do solo devido ao consumo de H⁺ durante o processo de transformação da amina em amônia. Todavia, a existência do grupo funcional carboxila (R-COOH) na composição de alguns resíduos em decomposição, promove a diminuição do pH devido a sua dissociação. Portanto,

quando o número de grupos amina presentes nos resíduos vegetais, for maior do que o de carboxila, o aminoácido terá comportamento básico, caso contrário, quando existir mais carboxilas do que aminas, o comportamento será ácido (ERNANI, 2008).

Geralmente, em solos manejados com plantio direto, verifica-se a acidificação da camada superficial, seja pela aplicação de fertilizantes, decomposição de resíduos das culturas, lixiviação de nitrato e de cátions, e ainda pela remoção de bases pela colheita de grãos (BAYER & MIELNICZKU, 2008; ANGHINONI, 2009). Em contrapartida, o aumento gradual da matéria orgânica, em solos sob plantio direto, reduz a toxidez por Al devido a sua complexação pela matéria orgânica (ANGHINONI, 2009; SALET et al., 1999). Além disso, o acúmulo de resíduos vegetais na superfície do solo pode diminuir a toxidez de Al a partir da lixiviação de compostos orgânicos solúveis em água, os quais atuam na complexação do Al no solo (MIYAZAWA et al., 1993; SALLET, 1994; CIOTTA et al., 2002). A adição de Ca, Mg e K através dos resíduos vegetais também pode contribuir para diminuir a atividade do Al em solução e, ou, aumentar a saturação por bases (FRANCHINI et al., 1999). Ao avaliar um Latossolo Bruno, após 21 anos de implantação do plantio direto e preparo convencional, sem adição de calcário, Ciotta et al. (2002) constataram maior acidificação do solo no plantio direto na camada superficial (2-10 cm). Já o revolvimento do solo com aração e gradagens no preparo convencional diluiu a acidez originada pelos fertilizantes em toda a camada arável.

A lixiviação de cátions básicos também pode elevar a acidez do solo quando esses forem lixiviados juntamente com uma base forte, caso contrário não há alteração de pH. Além disso, quando as plantas absorvem cátions há liberação de H^+ acidificando a rizosfera, já quando elas absorvem ânions ocorre à liberação de quantidades estequiométricas iguais de OH^- e alcaliniza a rizosfera. De todos os elementos o N exerce maior influência no pH da rizosfera, devido a sua absorção se dar tanto na forma catiônica (NH_4^+) quanto aniônica (NO_3^-) (ERNANI, 2008).

As diferenças em relação aos atributos químicos do solo entre os sistemas são mais facilmente detectadas após algum tempo de manejo. Acredita-se que com o passar do tempo ocorra uma estabilização no rendimento de culturas nos diferentes sistemas de manejo, sendo o sistema plantio direto, em função do maior teor de matéria orgânica e nutrientes, o que tenha as maiores produtividades, independente das possíveis restrições devido à compactação ou à concentração superficial de nutrientes no solo.

2.3 INFLUÊNCIA DO MANEJO NA FÍSICA DO SOLO

2.3.1 Textura, grau de floculação e estabilidade de agregados

A textura do solo refere-se à proporção relativa das partículas ou frações de areia, silte e argila que se encontra em determinada massa de solo (HILLEL, 1998). A textura é estudada por meio de análise granulométrica do solo, a qual permite classificar os componentes sólidos em classes de acordo com os seus diâmetros. Na classificação utilizada pela Embrapa (2006), as partículas da fração argila têm diâmetro menor que 0,002 mm, da fração silte entre 0,002 e 0,53 mm e da fração areia entre 0,53 e 2 mm.

A textura do solo é uma característica pouco variável no tempo e pouco afetada pelo manejo (REINERT et al., 2001), pois depende do intemperismo devido aos fatores de formação e processos pedogenéticos. Solos com maior teor de argila são considerados mais adequados às atividades agrícolas, devido sua interferência direta na retenção e disponibilidade da água (REICHERT et al., 2009), na capacidade de troca de cátions (CTC) (CIOTTA et al., 2003), dosagens de corretivos, retenção de nutrientes (LETEY, 1985) e herbicidas (TONI et al. 2006). Entretanto, estes solos possuem maior coesão entre as partículas, dificultando a mecanização (BAVER et al., 1972). Embora resistam mais à erosão, possuem maior suscetibilidade à compactação, exigindo assim, umidade adequada no momento de realizar as operações agrícolas. Já os solos de textura arenosa possuem baixa capacidade de retenção de água (REICHERT et al., 2009) e baixo teor de matéria orgânica. Por serem mais suscetíveis à erosão também necessitam de cuidados especiais no preparo do solo e práticas conservacionistas (ROVEDDER & ELTZ, 2008).

Apesar da pequena ou nula interferência do manejo na textura, a adoção de sistemas de manejo que proporcionam o revolvimento e a redução dos teores de matéria orgânica, pode dispersar a argila e promover o encrustamento superficial e a compactação subsuperficial do solo pela eluição dessa argila, o que reduz a porosidade e aumenta a suscetibilidade à erosão (REICHERT et al., 2007). Além disso, a mobilização e o tráfego de máquinas e implementos agrícolas contribuem para alterar o tamanho e a estabilidade dos agregados do solo. Sendo assim, agregados maiores e mais estáveis indicam melhoria na condição estrutural do solo (COSTA, 2001; VEZZANI & MIELNICZUK, 2009).

Sob determinado manejo, o solo resultará em diferentes condições de estabilidade física que poderão influenciar na conservação do solo e na produtividade das culturas. Alterações no teor de matéria orgânica e na atividade microbiana, no sistema radicular e na

concentração e tipo de cátions trocáveis, os quais são modificados pela adubação e calagem, influenciarão tanto o grau de floculação como a estabilidade de agregados (ALBUQUERQUE et al., 2005; AGUIAR, 2008).

À medida que se adiciona material orgânico a atividade microbiana é intensificada, resultando em produtos que desempenham função na formação e estabilização dos agregados. A capacidade da matéria orgânica de aderir às partículas minerais do solo, formando ligações argilo-metal-húmicas, aumenta a estabilidade dos agregados (TISDAL & OADES, 1982). Além dos resíduos orgânicos, que são fontes de energia para a atividade microbiana na formação de compostos húmicos, a vegetação exerce grande influencia na estabilização dos agregados devido à ação de suas raízes (WOHLENBERG et al. 2004; VEZZANI & MIELNIZUCK, 2011).

Modificações na composição química da solução do solo, devido a calagem, alteram o pH, a força iônica da solução e os tipos de íons presentes, os quais influenciam diretamente a dispersão ou floculação dos colóides (SETA & KARATHANASIS, 1997). A aplicação de calcário aumenta as cargas elétricas negativas e a substituição de íons trivalentes por bivalentes no complexo de troca, que tendem a aumentar a dupla camada elétrica (BUTIERRES, 1980) diminuindo assim, as forças de ligação entre os colóides. Por outro lado, a calagem aumenta a força iônica da solução e a adsorção de Ca e Mg, atuando no sentido inverso, ou seja, promovendo aumento da floculação e da estabilidade de agregados do solo. Indiretamente, a adição de calcário favorece a produção de fitomassa das culturas, levando a uma maior adição de matéria orgânica, que aumentaria a atividade microbiana e a estabilidade dos agregados (HAYNES, 1984).

Ao avaliar o efeito da aplicação de quantidades crescentes de calcário nas propriedades eletroquímicas, na dispersão de argila e na estabilidade de agregados de um Latossolo Bruno, Albuquerque et al. (2000) verificaram aumento linear da argila dispersa em água com a aplicação de doses crescentes de calcário. Resultados semelhantes foram obtidos por Albuquerque et al. (2003) ao avaliar o efeito da aplicação de calcário e fósforo sobre o comportamento estrutural de um Latossolo Bruno de Lages-SC. Apesar das alterações químicas e eletroquímicas do solo, com reflexos negativos na floculação de argila pela calagem, o diâmetro médio ponderado dos agregados (DMP) não foi afetado. Segundo os autores isso ocorre devido ao efeito benéfico da matéria orgânica sobre os atributos físicomecânicos do solo e pela ação indireta da calagem sobre a agregação e estímulo à atividade biológica. Já em trabalho realizado por Albuquerque et al. (2005), em um Latossolo Bruno de

Guarapuava-PR, não foi observado efeito do sistema de manejo ou da calagem no grau de floculação da argila.

A avaliação dos sistemas de preparo que causam dispersão da argila, pode ser uma forma de prever em longo prazo, problemas como compactação subsuperficial e diminuição da estabilidade de agregados. É importante considerar que, além do tempo, essas alterações variam com o tipo de solo, principalmente com sua composição mineralógica.

2.3.2 Densidade e porosidade

A densidade e a porosidade são atributos que estão relacionados com alterações no volume de solo, e estão altamente relacionadas com sua compactação (REICHERT et al., 2007).

Segundo Soane & Ouwerkerk (1994) a compactação é um processo em que a porosidade e a permeabilidade são reduzidas e a densidade e a resistência do solo são aumentadas. Com isso, o fluxo de água, de oxigênio, de dióxido de carbono, de nutrientes e a temperatura podem limitar o crescimento e o desenvolvimento das plantas (REICHERT et al., 2007).

A pressão exercida pelos rodados das máquinas e de implementos agrícolas, bem como o pisoteio animal sobre o solo promovem a compactação (FIGUEIREDO et al., 2000). Durante o processo de compactação, os poros maiores que 50 µm (macroporos) ou poros de aeração, são os primeiros a serem destruídos, sendo substituídos por poros menores, principalmente pelos que retêm água (REICHERT et al., 2007; SILVA et al. 1986). Segundo Xu et al. (1992) quando a compactação reduz a porosidade de aeração para valores menores que 10%, a taxa de difusão dos gases é próximo de zero, afetando a aeração do sistema radicular das plantas, o que acarretará em anaerobiose.

Nos sistemas conservacionistas, o cultivo continuado associado ao não revolvimento, pode compactar o solo. Segundo Reinert et al. (2008) a principal camada afetada pela compactação, nesse sistema, é aquela compreendida entre 8 e 15 cm de profundidade. Geralmente, a camada superficial de 0-5 cm do solo sob plantio direto apresenta baixa densidade e elevada porosidade total, devido à ação dos discos da semeadora-adubadora, e maior concentração de raízes e matéria orgânica (SILVA, 2003). Já Tormena et al. (2002) observaram maior densidade do solo e menor macroporosidade na camada de 0-0,10 m no plantio direto num Latossolo Vermelho após dois anos da implantação do experimento. Porém Costa et al. (2003), avaliando um Latossolo Bruno após 21 anos sob plantio direto e preparo

convencional não observaram aumento da densidade na camada de 0-10 cm no plantio direto comparativamente ao preparo convencional. Acredita-se que, a divergência de resultados entre sistemas de manejo deva-se, principalmente, às variações de solo, clima e do próprio manejo utilizado em cada sistema. No caso do estudo de Costa et al. (2003) o solo com elevado teor de argila e matéria orgânica, além da presença de óxidos de ferro e de alumínio, conferiram ao solo uma estrutura mais estável e resistente.

Estudos relatam que as maiores densidades nos sistemas sob plantio direto geralmente não interferem na produtividade das culturas em comparação aos sistemas que revolvem o solo (GUBIANI, 2012), devido principalmente às melhores condições de continuidade estrutural do solo, maior umidade, utilização de rotação de culturas associado ao maior teor de matéria orgânica (COSTA et al., 2003) e, especialmente, diminuição da erosão do solo (CASSOL, 1984).

Todavia, independente do manejo, há uma densidade crítica a qual dificulta ou impede o crescimento das raízes das plantas. A densidade crítica é dependente principalmente da classe textural do solo (REINERT et al., 2008). Reichert et al. (2003) propuseram densidade do solo crítica para algumas classes texturais: $\geq 1,45 \text{ Mg m}^{-3}$ para solos argilosos, $\geq 1,55 \text{ Mg m}^{-3}$ para solos de textura média, com conteúdo de argila entre 20 e 55%, e de $\geq 1,65 \text{ Mg m}^{-3}$ para solos de textura arenosa. Adicionalmente a textura, Argenton et al. (2005) incluem a matéria orgânica como um constituinte do solo que determina a densidade do solo crítica.

Generalizações sobre o estado de compactação em que determinado solo se encontra e a relação com o desenvolvimento da parte aérea e radicular, tornam-se muitas vezes onerosas, devido as grandes variações entre solos, culturas, variedades, estádio de desenvolvimento das plantas e condições climáticas. Logo, há a necessidade da avaliação dos atributos físicos do solo ao longo do tempo, com o intuito de verificar se houve degradação ou melhora da sua estrutura através de comparações com solos pré-estabelecidos como “referência” e através do acompanhamento do crescimento e desenvolvimento das plantas (parte aérea e raiz) nos diferentes sistemas de manejo.

2.3.3 Resistência à penetração

A resistência à penetração tem relação estreita com o crescimento e o desenvolvimento das raízes (LETEY, 1985) e quando considerada em conjunto com a umidade do solo é um bom indicador da qualidade física do solo (REINERT et al., 2001).

É importante considerar os vários métodos e equipamentos para determinação deste atributo, com variação inclusive na escala da resistência. De maneira geral, considera-se de 2,0 a 2,5 MPa a faixa crítica de resistência do solo com redução importante no crescimento radicular (TAYLOR et al., 1966; TAYLOR, 1971). A variação desses valores críticos está associada ao tipo de planta, teor de argila e ao sistema de manejo do solo (SILVA, 2003). O sistema radicular das culturas apresenta diferentes graus de tolerância à compactação, de modo que as plantas respondem a valores críticos, a partir dos quais iniciam restrições ao seu crescimento (SILVA et al., 2000). Para Dexter (1991) as raízes de algumas plantas podem amenizar o impedimento mecânico do solo, devido à capacidade de penetrar camadas com alta resistência mecânica e pela formação de canais após sofrer decomposição. Além disso, as raízes proporcionam um rompimento mais uniforme da camada compactada, ao contrário do que ocorre com o uso de subsoladores (CAMARGO & ALLEONI, 1997), pois incorporam matéria orgânica, aumentam a estabilidade dos agregados e reduzem a susceptibilidade do solo à compactação (ROTH et al., 1992). As espécies com sistema radicular capaz de romper camadas compactadas promovem, ainda, a retirada de nutrientes das camadas subsuperficiais, liberando-os gradualmente nas camadas superficiais durante o processo de decomposição (FIORIN, 1999). Segundo Brussaard & Van Faassen (1994) as dicotiledôneas são mais sensíveis ao impedimento mecânico do que as monocotiledôneas. Espécies como o guandu e milheto possuem habilidade de desenvolver-se em camadas compactadas e abaixo delas (JIMENEZ et al., 2008).

A determinação da umidade do solo é uma variável importante na quantificação da resistência à penetração, devido à relação indireta entre ambas (RIBON et al., 2003; KLEIN, 2008), conforme relatado por Tormena et al. (1998) ao estudar um Latossolo Roxo sob plantio direto e convencional. Segundo Reinert et al. (2003) para um mesmo conteúdo de água, a resistência é tanto maior quanto maior a densidade do solo.

Contudo, ainda existem dúvidas sobre qual o estado de compactação que influí negativamente na produção das culturas e quais os limites críticos das propriedades físico-mecânicas que limitam o pleno desenvolvimento das plantas (SECCO et al., 2004; REINERT et al., 2008). Para melhor elucidar esta questão, recentemente tem sido utilizado o ensaio de Proctor normal (VARGAS, 1977), o qual avalia a relação existente entre a densidade, umidade e energia de compactação de um solo com estrutura alterada. Através desse ensaio obtém-se a densidade máxima e a umidade ótima de compactação. A importância dessa determinação está na determinação da faixa de umidade considerada ideal para as atividades agrícolas, uma vez que, na tentativa de se atender o cronograma de trabalho, muitas vezes a

umidade atual não é considerada, consequentemente os riscos de degradação física do solo são aumentados (SILVA et al. 2006).

Ao avaliar e comparar curvas de compactação em três solos, obtida por meio do ensaio de Proctor, Dias Junior & Estanislau (1999) observaram que os maiores teores de argila e matéria orgânica no Latossolo Roxo resultaram em maior umidade ótima de compactação em relação ao Latossolo Vermelho-Amarelo e ao Latossolo Vermelho-Escuro, solos com menores teores de matéria orgânica e argila. Assim, o Latossolo Vermelho-Amarelo e o Latossolo Vermelho-Escuro possivelmente terão problemas de compactação a umidades mais baixas do que o Latossolo Roxo. Por outro lado, Figueiredo et al. (2000) ao estudarem o efeito de diferentes sistemas de manejo na umidade crítica de compactação e na densidade do solo máxima de um Latossolo Roxo não observaram diferenças entre os sistemas de manejo. A igualdade nos teores de argila e de matéria orgânica entre os sistemas explicam a ausência de diferenças entre eles.

Segundo Raghavan et al. (1990) e Marcolin (2006) a densidade máxima é afetada pela textura e pelo teor de matéria orgânica do solo. Em estudo realizado por Beutler et al. (2005) verificou-se maior densidade máxima no Latossolo Vermelho de textura média ($1,85 \text{ Mg m}^{-3}$) em relação ao Latossolo Vermelho de textura argilosa ($1,54 \text{ Mg m}^{-3}$). Esses autores atribuíram isso à granulometria e ao tipo de mineral (predominantemente quartzo e caulinita) existente no Latossolo Vermelho de textura média. Para Braida et al. (2006) a susceptibilidade do solo à compactação, avaliada pelo ensaio de Proctor, torna-se menor à medida que cresce a quantidade de material orgânico existente. Em geral, se observa que para um mesmo nível de energia, quanto maior o teor de matéria orgânica do solo, menor é a densidade máxima obtida e maior é o teor de água necessária para atingi-la (BOUKOUNGA, 2009).

Através da relação entre a densidade atual no campo com a densidade máxima obtém-se a densidade relativa do solo (Drs). Segundo Håkansson (1990); Silva et al. (1997) a densidade relativa é um bom parâmetro da qualidade física do solo, uma vez que, é influenciado pelo manejo do solo. Segundo Beutler et al. (2008) valores de Drs acima de 0,86 são considerados elevados e prejudiciais ao desenvolvimento das culturas. Já para Ferreras et al. (2001) valores superiores a 0,90 diminuem o crescimento e rendimento das culturas principalmente em função da redução no volume de macroporos. Porém, Beutler et al. (2005) cita que, para a cultura da soja o valor de Drs de 0,80 pode ser considerado como limitante em Latossolo Vermelho de textura média.

O efeito da compactação no ambiente ainda é muito incipiente, o que demanda mais estudos (REICHERT et al., 2007). A relação entre o grau de compactação e os atributos

físicos do solo e culturas deve ser testada, considerando solos de diferentes regiões e com diferentes sistemas de preparo e manejo, para adequada definição dos valores críticos de compactação (SUZUKI et al. 2007; REICHERT et al. 2007), especialmente em solos com elevado teor de matéria orgânica.

2.3.4 Umidade do solo e disponibilidade de água às plantas

O solo é um sistema complexo, constituído de materiais sólidos, líquidos e gasosos. A parte líquida constitui-se essencialmente de água, a qual dependendo da umidade ocupa parte ou quase todo o espaço vazio entre as partículas sólidas (REICHARDT, 1985). As variações pedogenéticas modificam a dinâmica e o armazenamento da água, exibindo variações no tempo e no espaço, sobretudo próximo à superfície do solo, devido à evaporação e atividade das raízes das plantas (GONZÁLEZ & ALVES, 2005). A capacidade de retenção de água de um solo é função de suas propriedades físicas (HILLEL, 1980; COSTA, 2001, REICHERT et al., 2009), no entanto a disponibilidade de água às culturas é variável de acordo com a espécie vegetal, tipo de solo e manejo dado ao solo (SILVA, 2003).

A retenção de água no solo depende de dois fenômenos: capilaridade e adsorção. A capilaridade está ligada à afinidade das partículas de solo com água e necessita da formação de um menisco para atuar, assim, esta depende da densidade e da distribuição do tamanho dos poros. Já a adsorção corresponde à atração entre a parte sólida do solo e os filmes de água, logo, é dependente da textura e da superfície específica do solo (REICHARDT, 1985). A energia de retenção da água no solo é importante, pois, solos de diferentes classes texturais podem ter semelhantes quantidades de água, porém, com distintas energias de retenção.

Entre as propriedades do solo, a textura é a que mais afeta a retenção de água no solo, pois ela determina a área de contato entre a água e as partículas sólidas, ou seja, a espessura do filme de água que recobre as partículas varia de acordo com sua superfície específica (REICHARDT, 1985). Logo, solos argilosos, por possuírem maior superfície específica, tendem a reter maior quantidade de água, em comparação a solos arenosos (SILVA et al., 2005). Cabe ressaltar que, existem argilas, como a montmorilonita, vermiculita e a ilita, que devido às suas características cristalográficas, têm propriedades que aumentam a retenção de água. A estrutura do solo, por determinar o arranjo das partículas, que por sua vez, determina à distribuição de poros, também afeta a retenção de água no solo (REICHARDT, 1985).

Outro fator relevante quanto aos estoques de água no solo, é o sistema de manejo adotado, o qual pode atuar de forma decisiva na distribuição hídrica no perfil e nas interações solo-planta-atmosfera, ao longo do tempo (MARTONARO et al., 2009), pois o manejo adotado altera sensivelmente os atributos do solo. Entre os componentes do manejo, o preparo é a atividade que mais influí no seu comportamento físico, pois modifica muito a estrutura do solo. Os principais atributos alterados pelo preparo são a porosidade e a densidade, os quais têm influencia direta na retenção de água (VIEIRA & KLEIN, 2007). Normalmente o revolvimento do solo aumenta a macroporosidade, diminui a microporosidade, e consequentemente diminui a capacidade de retenção de água (SILVA et al., 2005). Por outro lado, em sistemas como o plantio direto, com mobilização apenas na linha de semeadura, a densidade e a microporosidade aumentam e o volume de macroporos diminui, determinando assim, diminuição do volume de poros ocupados pelo ar e aumento na retenção e armazenamento de água pelo solo, quando comparado aos sistemas sob preparo convencional (BERTOL & SANTOS, 1995; TORMENA et al., 1998; COSTA et al. 2003; SILVA et al., 2005; MARTONARO et al., 2009).

Além do efeito direto da mobilização na retenção de água, o sistema de manejo modifica os teores de matéria orgânica e assim, a área superficial específica do solo e a retenção de água. A menor mobilização e a manutenção dos resíduos sobre o solo aumenta o teor de matéria orgânica no plantio direto (BAYER et al., 2004). Devido à alta higroscopicidade e área superficial específica, a matéria orgânica possui estreita relação com a retenção de água (SALTON & MIELNICZUK, 1995) assim, o incremento da matéria orgânica poderá aumentar a retenção de água em solos (HILLEL, 1980). No entanto, devido à dificuldade de isolar o efeito da matéria orgânica dos diferentes fatores que determinam a disponibilidade de água, como a textura, mineralogia, estrutura, entre outros, podem gerar resultados contraditórios (BRAIDA et al., 2011).

Com relação aos resíduos existentes na superfície do solo, Campos et al. (1994), Stone & Moreira (2000), e Veiga (2005) afirmam que a cobertura reduz a evaporação e assim, aumenta a umidade do solo. Esses fatores, dentre outros, podem minimizar os efeitos de veranicos em áreas sob sistemas de plantio direto, em solos não compactados, e ainda possibilitar o cultivo de sequeiro em regiões com períodos prolongados de baixa precipitação, ou mesmo em regiões com períodos curtos de chuvas e baixos índices pluviométricos. Além dos resíduos vegetais, existe também uma fração dos mesmos que está parcialmente decomposta e que interage com a superfície do solo e facilita a infiltração e o armazenamento de água (REICHERT et al., 2007). Tavares Filho et al. (2001) verificaram em um Latossolo

Roxo argiloso maior umidade do solo no plantio direto quando comparado com o preparo convencional. Costa et al. (2003) observaram em Latossolo Bruno, cultivado por 21 anos com diferentes sistemas de manejo, maior umidade no plantio direto (aproximadamente 27%) em relação ao preparo convencional na camada de 0-0,1 m. Albuquerque et al. (2005) também observaram nesse mesmo experimento, após 24 anos de implantação, maior umidade volumétrica no plantio direto ($0,40 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) em relação ao preparo convencional ($0,33 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) na camada superficial. Dalmago (2004) constatou maior umidade num Argissolo Vermelho cultivado sob sistema de plantio direto do que em preparo convencional, nas camadas próximas à superfície. Observou que as maiores diferenças entre os sistemas de manejo são principalmente em potenciais matriciais mais elevados.

É importante considerar que, a maior retenção de água no plantio direto influí positivamente na produtividade, principalmente em anos com distribuição de chuvas irregulares (COSTA, et al., 2003; BENITO et al., 2008). Martonaro et al. (2009) observaram correlação direta entre o estoque de água com a altura de plantas e o índice de área foliar de soja, num Argissolo Vermelho sob plantio direto comparativamente ao preparo convencional.

Além das propriedades e atributos do solo, fatores externos como precipitação pluvial, radiação solar, temperatura, evapotranspiração da cultura, índice de área foliar, raiz e densidade de plantas, também influenciam no desenvolvimento das plantas e na dinâmica da água no solo (MARTORANO et al., 2009). Desta forma, os efeitos do manejo do solo na retenção de água e na produtividade das culturas pode ser direto e indireto, conforme relatado por Letey (1985), sendo necessário avaliar a relação entre os atributos físicos do solo com a retenção e disponibilidade de água, bem como a variação da umidade ao longo do tempo nos diferentes sistemas de manejo do solo.

2.3.5 Condutividade hidráulica do solo

A condutividade hidráulica é um atributo que expressa à facilidade com que a água se movimenta ao longo de um volume de solo e está diretamente relacionada à produção das culturas agrícolas e à preservação do solo e dos recursos hídricos (HILLEL, 1998). Quando o solo se encontra saturado, todos os poros estão preenchidos e conduzindo água, nesse caso o valor máximo de condutividade hidráulica é atingido, sendo esse valor denominado de condutividade hidráulica saturada (REICHARDT, 1990). A partir da condutividade hidráulica saturada do solo, juntamente com modelos matemáticos, como o que descreve a curva de retenção de água, pode-se estimar a condutividade hidráulica não saturada.

A condutividade hidráulica saturada e não saturada de um solo são determinadas pela geometria e continuidade dos poros preenchidos com água. E por serem dependentes dos atributos do solo, principalmente aqueles relacionados à estrutura, como a densidade e a distribuição do tamanho dos poros, a condutividade hidráulica saturada e não saturada podem ser modificadas pelos sistemas de manejo (MESQUITA & MORAES, 2004; KLEIN & LIBARDI, 2002). Pequenas modificações no manejo do solo podem determinar alterações importantes no fluxo de água. Isso ocorre devido às modificações na estrutura do solo, todavia, a magnitude destas modificações estruturais ocasionadas pelo manejo depende da ocorrência e da frequência das operações de práticas agrícolas superficiais e subsuperficiais no solo e, também, do efeito compactante produzido pelo trânsito do maquinário agrícola ou de animais (MESQUITA & MORAES, 2004)

Ao comparar as modificações nos atributos físicos em diferentes sistemas de manejo e uso de um Nitossolo Vermelho, Albuquerque et al. (2001) observaram que a condutividade hidráulica saturada foi maior no preparo convencional comparativamente ao plantio direto até a camada de 10 cm, no entanto, a mata teve maior condutividade hidráulica em relação a esses sistemas em todas as camadas avaliadas (0-20 cm). Camara & Klein (2005) em um Latossolo Vermelho observaram que, no plantio direto escarificado a condutividade hidráulica saturada, foi aproximadamente oito vezes maior, do que no plantio direto sem escarificação. Esses autores atribuem isso às alterações ocasionadas à estruturação do solo pela escarificação, exatamente na camada mais compactada. Por outro lado Souza & Alves (2003) verificaram que o plantio direto teve maior condutividade hidráulica saturada em relação ao preparo convencional até 20 cm de profundidade num Latossolo Vermelho sob diferentes usos e manejos. É possível que, a maior continuidade de poros ao longo do perfil, decorrentes da pouca mobilização do solo e da decomposição das raízes de culturas anteriores, associado a plantas com alta eficiência em penetrar camadas subsuperficiais, tenham contribuído para aumentar a condutividade hidráulica do solo no plantio direto. Já Costa et al. (2003) não observaram diferença na condutividade hidráulica saturada, entre o plantio direto e preparo convencional num Latossolo Bruno. Ao determinar a condutividade hidráulica não saturada de um Latossolo Roxo sob diferentes sistemas de uso e manejo Klein & Libardi (2002) verificaram que alterações na estrutura do solo, como o aumento da densidade, redução da porosidade total e alteração na distribuição do diâmetro dos poros, diminuíram a condutividade hidráulica não saturada.

A grande divergência entre os resultados da condutividade hidráulica do solo saturado deve-se principalmente ao tipo e ao manejo dado ao solo, ao tipo e as características dos

implementos utilizados no preparo do solo e às complexas interações que ocorrem nos diferentes solos e sistemas de manejo (COSTA et al., 2003). Esses fatores indicam que esse atributo possui elevada variabilidade (MESQUITA & MORAES, 2004). Por outro lado, estudos que envolvem o fluxo de água em condições de não saturação ainda são muito incipientes, e precisam ser mais explorados, pois representam a situação mais comum no âmbito agrícola.

3 HIPÓTESES

O sistema de preparo convencional, utilizado por longo período, degrada a estrutura do solo comparado à mata nativa, enquanto a introdução do sistema de plantio direto recupera alguns atributos degradados, principalmente os relacionados à estabilidade dos agregados em função da baixa mobilização e do acúmulo de matéria orgânica no solo.

Ao alterar o teor de matéria orgânica e a estrutura do solo, o plantio direto modifica a distribuição de tamanho de poros, resultando em maior retenção e disponibilidade de água às plantas. Esta alteração, somado ao maior teor de nutrientes neste sistema, o torna mais produtivo do que o sistema de preparo convencional.

A aplicação de calcário nas doses recomendadas, melhora os atributos químicos e não altera os atributos físicos. No plantio direto a aplicação de calcário na superfície do solo, a longo prazo, é adequada quimicamente e evita a mobilização e a consequente desestruturação do solo, tendo eficiência semelhante à calagem incorporada na produtividade das culturas.

A formação de camadas compactadas subsuperficialmente diminui o desenvolvimento e crescimento das culturas, devido ao aumento da resistência à penetração e a diminuição do aprofundamento das raízes no perfil do solo.

3.1 OBJETIVOS

3.1.1 Objetivos Gerais

Avaliar os efeitos nos atributos químicos, físicos e hídricos do solo e na produtividade das culturas agrícolas, em sistemas de manejo do solo e de correção da acidez do solo, após trinta e um anos de sua implantação.

3.1.2 Objetivos Específicos

Avaliar as alterações nos atributos químicos e físicos do solo nos diferentes sistemas de manejo do solo e comparar com a qualidade do solo mantido com mata nativa.

Relacionar as alterações nos atributos do solo nos diferentes sistemas de manejo e nos diferentes métodos de correção da acidez do solo com a produtividade das culturas.

Avaliar qual é o grau de compactação que limita o crescimento e o desenvolvimento da cultura da soja.

4 CAPÍTULO I - ATRIBUTOS FÍSICOS E HÍDRICOS DE UM LATOSSOLO BRUNO SOB DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO EM EXPERIMENTO DE LONGA DURAÇÃO

RESUMO

Agricultores têm adotado diferentes sistemas de manejo os quais afetam diferentemente a qualidade do solo, como os atributos físicos relacionadas à estabilidade da estrutura, porosidade total, densidade e retenção de água no solo. O objetivo deste estudo foi avaliar e comparar os atributos físicos e hídricos de um Latossolo Bruno Alumínico típico, após trinta e um anos sob diferentes sistemas de uso e manejo: plantio direto no inverno e verão (sem calcário, com calcário aplicado em superfície e com calcário incorporado); preparo convencional no inverno e verão (sem calcário e com calcário incorporado) e mata nativa. O solo foi cultivado em rotação de culturas. Os atributos foram avaliados nas camadas de 0-2,5; 2,5-5; 5-10; 10-20; 20-40; 40-60; 60-80 e 80-100 cm. O uso do solo por longos períodos com preparo convencional alterou a forma da estrutura do solo, observado principalmente pela diminuição da estabilidade de agregados (DMG) e aumento da densidade em subsuperfície quando comparados com os sistemas de plantio direto e a mata. O aumento da estabilidade de agregados (DMG) no plantio direto em relação ao sistema de preparo convencional, alcançou um patamar igual ao da mata na camada de 0-10 cm. Os sistemas conservacionistas aumentaram a microporosidade, a umidade volumétrica, a retenção de água e a água disponível às plantas, principalmente nas camadas superficiais do solo quando comparado aos sistemas convencionais e à mata. De maneira geral, a calagem e o modo de aplicação do calcário não alteraram os atributos físicos e hídricos do solo nos sistemas de manejo.

Palavras-chaves: Plantio direto. Preparo convencional. Estrutura. Umidade. Água disponível.

4.1 INTRODUÇÃO

O manejo do solo tem sido responsável pelas grandes alterações na estrutura com reflexos nos atributos físico-hídricos dos solos.

O sistema de preparo convencional desestrutura o solo, aumenta a erosão e altera a infiltração e os fluxos de água no perfil (REICHARDT et al., 1996). Em contrapartida, o sistema de plantio direto reduz a degradação do solo, pois diminui o revolvimento e mantém os resíduos vegetais na superfície (LAL & GREENLAND, 1979). A combinação da menor mobilização e a permanência dos resíduos vegetais parcialmente decompostos na superfície, diminui a evaporação de água e aumenta os teores de matéria orgânica, a infiltração e a retenção de água no solo (BEN-HUR et al., 1999). Porém, quando o plantio direto é realizado sem rotação de culturas e/ou quando o tráfego de máquinas é realizado com elevada umidade do solo, observa-se aumento do estado de compactação (ALBUQUERQUE et al., 1995; SILVA, 2003). A compactação do solo, além de alterar a disponibilidade de água e nutrientes para as plantas, em função da alteração do tamanho de poros, atua nos fatores de crescimento como a temperatura, aeração, a resistência à penetração das raízes e a taxa de infiltração (LETEY, 1985; REICHERT et al., 2007).

Assim como o grau de compactação, outros atributos físicos têm sido utilizados para quantificar os impactos do uso e manejo sobre a estrutura do solo. Dentre os principais estão a densidade e porosidade do solo; resistência do solo à penetração das raízes; agregação do solo; condutividade hidráulica do solo; curva de retenção de água; e índice S o qual é a declividade da curva característica de retenção da água do solo em seu ponto de inflexão.

Contudo, a utilização por longo prazo de sistemas de manejo têm levantado questionamentos sobre os possíveis impactos negativos principalmente sobre a estrutura do solo (BETIOLI JÚNIOR, et al, 2012). Além dos problemas de erosão ocasionada pela desestruturação do solo no preparo convencional, uma grande preocupação é em relação à compactação do solo em sistemas de plantio direto utilizados por longos períodos (REICHERT, et al., 2007).

Desde o seu surgimento no Brasil, na década de 1970, o plantio direto é apontado como uma opção para manter a sustentabilidade dos sistemas agrícolas. No entanto, o revolvimento do solo apenas na linha de semeadura associado ao tráfego de máquinas neste sistema, pode ocasionar a compactação ao longo do tempo (TORMENA et al., 1998).

Em trabalho realizado num Latossolo Vermelho após 30 anos sob plantio direto, Bettioli Júnior et al. (2012) observaram que o grau de compactação não limitou a produção das

culturas mesmo após três décadas sem revolver o solo. Já Costa et al. (2003) ao avaliar o efeito de longo prazo em sistemas de manejo sobre os atributos físicos de um Latossolo Bruno, não observaram compactação no plantio direto e no preparo convencional e ainda verificaram aumento da estabilidade de agregados e da umidade volumétrica no plantio direto nas camadas superficiais. Oliveira et al. (2004) verificaram que o plantio direto teve maior disponibilidade de água em relação ao preparo convencional na camada de 0-5 cm, e não compactou o solo comparado ao preparo convencional até 40 cm de profundidade num Latossolo Vermelho cultivado há 20 anos. Da mesma forma, Gonçalves & Moraes (2012) não verificaram diferenças na porosidade total do solo entre plantio direto e preparo convencional manejados há 19 anos num Nitossolo Vermelho.

Assim, quando se quer avaliar as mudanças na estrutura do solo, o efeito dos sistemas de manejo sobre os atributos físico-hídricos do solo deve ser monitorado ao longo do tempo, pois este é um fator determinante da magnitude das mudanças. Todavia, ainda são poucos os estudos que avaliam os atributos físicos de sistemas de manejo do solo após longos períodos de condução e a maioria não considera a inter-relação dos atributos do solo, como o conteúdo de água disponível às plantas. Logo, é imprescindível a avaliação conjunta desses atributos quando se quer quantificar as diferenças e avaliar as mudanças na qualidade do solo entre sistemas de manejo em determinada região ao longo do tempo.

O objetivo desse trabalho foi avaliar e comparar os atributos físicos e hídricos de um Latossolo Bruno após trinta e um anos sob diferentes sistemas de uso e manejo do solo.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1 Localização e solo

O experimento está localizado no Campo Experimental da Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária – FAPA, da Cooperativa Agrária Mista Entre Rios Ltda., em Guarapuava, Paraná, no terceiro planalto paranaense, a 1.100 m de altitude, com latitude de 25° 33' 02" S e longitude de 51 ° 29' 24" W.

O solo da área experimental é um Latossolo Bruno Alumínico típico, com horizonte A proeminente, textura argilosa, relevo suave ondulado e substrato basalto (EMBRAPA, 2006), com declividade média de 0,05 m m⁻¹. A área do experimento estende-se por 430 m ao longo da encosta de uma elevação, com declive para os lados sul e oeste, e uma ligeira depressão no centro. Nas posições mais altas e planas, o solo é profundo com o horizonte A com espessura

maior que 60 cm e nas áreas de maior declividade encontra-se solo mais raso, com horizonte A de espessura variável e inferior a 60 cm, com presença de cascalho na transição entre o horizonte A e o B (JASTER et al., 1993).

Devido à alta taxa de intemperismo, esse solo possui como principais minerais da fração argila a caulinita, os óxidos de ferro (goethita e hematita) e de alumínio (gibbsita) (BAYER et al., 2009). Ocorre aproximadamente 70 g kg⁻¹ de óxidos de ferro e 540 g kg⁻¹ de caulinita + gibbsita (COSTA, 2001).

Tabela 1 - Caracterização química e física da área experimental, na camada de 0-0,20 m, antes da instalação do experimento

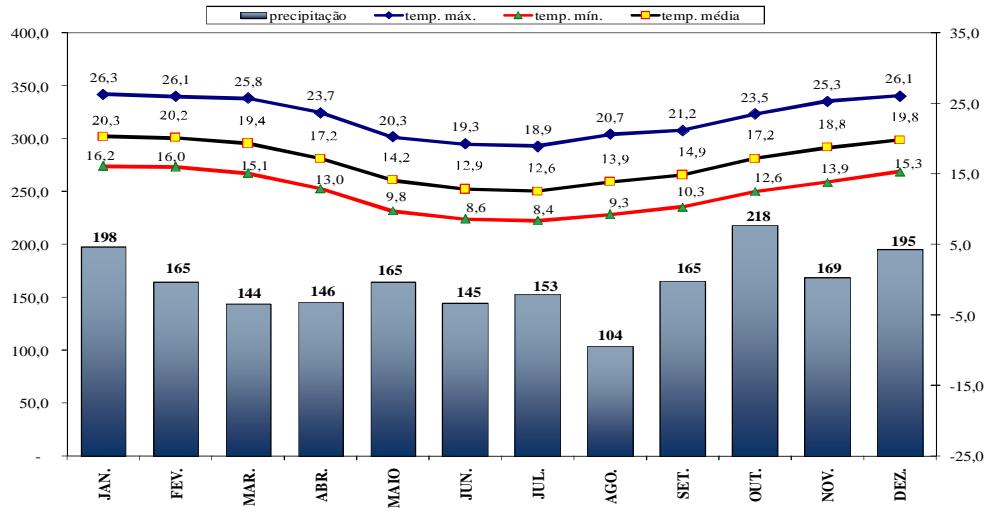
pH _{H2O}	Al ⁺³	Ca ⁺² +Mg ⁺²	K ⁺	P	C	Argila	Silte	Areia
		-----cmol _c kg ⁻¹ -----		--mg kg ⁻¹ --		-----g kg ⁻¹ -----		
5,5	0,2	5,7	0,25	5,9	28	570	370	60

Fonte: Adaptado de Jaster et al., 1993.

4.2.2 Clima

O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é subtropical úmido, sem estação seca e com ocorrência de geadas frequentes e severas. A precipitação média anual é de 1.967 mm sendo agosto o mês mais seco (104 mm) e outubro o mais chuvoso (218 mm). A temperatura média anual é de 16,8°C, com uma variação de 20,3 a 12,6°C entre as temperaturas médias mensais, respectivamente, nos meses de janeiro e julho (Figura 1).

Figura 1 - Precipitação, temperaturas média, máxima e mínima, obtidas na base de dados meteorológicos, no período entre 1978 a 2012, da Estação Experimental da FAPA.



4.2.3 Histórico do experimento

Anterior ao experimento, a área era coberta por mata nativa, derrubada na década de 1920 para formação de pastagem, composta por espécies nativas, principalmente gramíneas. Em 1950 o solo foi arado pela primeira vez para o cultivo de trigo e arroz no sistema de preparo convencional até 1962. De 1962 até 1968 a área foi utilizada com pastagem melhorada (trevo branco e gramíneas de inverno) para o gado leiteiro. De 1968 a 1977 foi novamente cultivado no sistema de preparo convencional com trigo e soja. No inverno de 1978 foram coletadas amostras de solo para caracterização química. Foi aplicado 1,5 t ha⁻¹ de calcário e 0,3 t ha⁻¹ de Escória de Thomas, e no verão foi semeada soja como a primeira cultura do experimento, cujo objetivo inicial era comparar propriedades químicas do solo e rendimento de culturas em diferentes sistemas de preparo do solo (JASTER et al., 1993).

Os sistemas foram combinados nas safras de inverno e verão, descritos como segue:

- 1) Plantio direto no inverno e no verão (PD-PD);
- 2) Escarificação no inverno e plantio direto no verão (ESC-PD);
- 3) Plantio direto no inverno e preparo convencional no verão (PD-PC);
- 4) Preparo convencional no inverno e plantio direto no verão (PC-PD);
- 5) Preparo convencional no inverno e verão (PC-PC).

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso com quatro repetições até o ano de 1982, a partir do qual, reduziu-se para três repetições em função da ocorrência de

erosão em uma parcela arada. As parcelas mediam 12 m de largura e 100 m de comprimento, de forma que todas as operações de preparo de solo, semeadura, tratos culturais e colheita fossem realizadas com implementos e máquinas de lavouras comerciais. Em 1987 os tratamentos foram alterados devido à introdução do fator calagem, (sem calagem, calagem superficial e calagem incorporada). As parcelas principais continuaram com os sistemas de manejo do solo, as quais foram subdivididas, e passaram a medir 12x30 m, para alocar os métodos de aplicação de calcário. A dose de calcário utilizada, nessa ocasião, foi de 4,5 t ha⁻¹ de calcário calcítico; em 1995 e 2007 foi reaplicado calcário dolomítico respectivamente na dose de 3,0 e 4,7 t ha⁻¹ (Tabela 2).

As culturas utilizadas no experimento, em esquema de rotação desde a implantação até hoje são: trigo, cevada, aveia branca, nabo forrageiro, ervilhaca, milho e soja. Com exceção do nabo forrageiro e da ervilhaca, que são utilizadas para adubação verde, as demais culturas são utilizadas para produção de grãos. Todos os tratos culturais, a escolha de cultivares, épocas de semeadura, adubação e colheita, obedeceram aos mesmos critérios de uma lavoura comercial.

Tabela 2 - Culturas e doses de calcário utilizadas no experimento de 1978 a 2012. Guarapuava – PR.

Ano agrícola	Cultivo		Dose de calcário aplicada (t ha ⁻¹)
	Inverno	Verão	
1978-79	-	soja	1,5
79-80	Trigo	soja	
80-81	Cevada	soja	
81-82	Trigo	soja	
82-83	cevada	soja	
83-84	trigo	soja	
84-85	cevada	soja	
85-86	ervilhaca	milho	
86-87	aveia	soja	
87-88	trigo	soja	4,5
88-89	cevada	soja	
89-90	trigo	soja	
90-91	cevada	soja	
91-92	ervilhaca	milho	
92-93	aveia	soja	
93-94	cevada	soja	
94-95	trigo	soja	
95-96	nabo forrageiro	milho	3,0
96-97	aveia	soja	
97-98	trigo	soja	
98-99	cevada	soja	
99-2000	nabo forrageiro	milho	
2000-2001	aveia	soja	
2001-2002	trigo	soja	
2002-2003	cevada	soja	
2003-2004	nabo +ervilhaca	milho	
2004-2005	aveia	soja	
2005-2006	trigo	soja	
2006-2007	nabo +ervilhaca	milho	4,7
2007-2008	cevada	soja	
2008-2009	trigo	soja	
2009-2010	ervilhaca	soja	
2010-2011	nabo forrageiro	milho	
2011-2012	aveia	soja	

Fonte: Adaptado de Costa (2001).

4.2.4 Sistemas estudados

Neste estudo foram analisados cinco sistemas de manejo do solo além de uma mata nativa, como segue:

- 1) Preparo convencional no inverno e verão, com calcário incorporado (PCinc);
- 2) Preparo convencional no inverno e verão, sem calcário (PCsem);

- 3) Plantio direto no inverno e verão, com calcário incorporado (PDinc);
- 4) Plantio direto no inverno e verão, sem calcário (PDsem);
- 5) Plantio direto no inverno e verão, com calcário superficial (PDsup);
- 6) Mata Nativa.

Na mata foram selecionados três locais distintos para representar as repetições.

No sistema de preparo convencional, antes da semeadura das culturas de inverno e verão, o solo é periodicamente revolvido com arado a uma profundidade aproximada de 25 cm e em seguida é passada uma grade niveladora. No sistema de plantio direto utiliza-se semeadora/adubadora adaptada com um disco cortador para a implantação das culturas. A incorporação do calcário tanto no sistema de preparo convencional como no plantio direto ocorreu com o auxílio de um arado e grade niveladora.

Em todas as operações realizadas nos diferentes tratamentos, usaram-se equipamentos utilizados em lavouras comerciais, obedecendo-se os mesmos critérios destas, para o uso de tratamentos fitossanitários, épocas de semeadura e colheita.

O objetivo da inclusão da mata nativa neste estudo foi possibilitar a obtenção de valores dos atributos estudados assumidos como originais, uma vez que a mata está localizada próximo ao experimento (Anexo B).

4.2.5 Coleta das amostras e determinações de laboratório e campo

As determinações realizadas foram: densidade do solo; porosidade total; macroporosidade e microporosidade; densidade máxima do solo, determinado pelo ensaio de Proctor; estabilidade de agregados; resistência do solo à penetração de raízes; grau de floculação; umidade volumétrica e armazenamento de água; curva de retenção de água; índice S; capacidade de campo; ponto de murcha permanente; água disponível e condutividade hidráulica saturada e não saturada.

Em maio de 2009, 31 anos após a implantação do experimento, após a colheita da cultura da soja, foram abertas trincheiras, nas entrelinhas da cultura, com dimensões aproximadas de 1x1x1 m para coleta de amostras de solo com estrutura preservada e alterada para as determinações físicas.

As amostras com estrutura preservada foram coletadas até 100 cm de profundidade, nas camadas: 0-2,5; 2,5-5, 5-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm. Até 60 cm de profundidade foram utilizados anéis metálicos com 2,5 cm de altura e 6,0 cm de diâmetro

interno, e de 60 a 100 cm anéis com 5,0 cm de altura e 6,0 cm de diâmetro interno. As amostras foram coletadas em duplicata até a camada de 40-60 cm, sendo acondicionadas em potes plásticos para preservar a estrutura da amostra durante o transporte até o Laboratório de Física e Manejo do solo do Centro de Ciências Agroveterinárias - CAV, da Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC.

Nessa mesma ocasião avaliou-se a resistência do solo à penetração até 40 cm de profundidade, em cinco pontos por parcela. Em março de 2011 avaliou-se novamente a resistência do solo à penetração. Foi utilizado um penetrôgrafo da Falker®, equipado com cone de 12,82 mm de diâmetro e velocidade de medição máxima de 60 mm s^{-1} , controlada manualmente. Também foi realizada a coleta de amostras de solo nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20, 20-40 cm para determinação da umidade.

As amostras com estrutura alterada nas camadas de 0-2,5, 2,5-5, 5-10, 10-20, 20-40 cm foram coletadas para determinar o grau de floculação pelo método da pipeta (GEE & BAUDER, 1986), através da dispersão em água e NaOH 1M para determinação do teor de argila total, e em água para argila dispersa em água.

As amostras com estrutura preservada foram pesadas com a umidade de campo e após foram saturadas e submetidas às tensões de 1, 6 e 10 kPa em mesa de tensão de areia e tensões de 33, 100, 300, 500 e 1.500 kPa em câmara de Richards. Com estas determinações foram determinados os atributos: Porosidade total (PT) determinada pela diferença de umidade entre o solo saturado e o solo seco; Microporosidade (Micro) determinado em mesa de tensão de areia à succção de 6 kPa; Macroporosidade (Macro) através da diferença entre PT e Micro (EMBRAPA, 1997); Capacidade de campo (CC), umidade do solo na tensão de 10 kPa; Ponto de Murcha permanente (PMP), umidade do solo na tensão de 1.500 kPa; Água Disponível (AD) pela diferença entre a CC e o PMP. Aos pares de dados de tensão e umidade volumétrica foi ajustada a curva característica de retenção de água (CRA) através do modelo proposto por Van GENUCHTEN (1980). Com os parâmetros obtidos neste ajuste, foi estimada a condutividade hidráulica não saturada ou condutividade hidráulica relativa (K_r) e calculado o índice S.

Após a aplicação da tensão de 1.500 kPa, o solo foi novamente saturado para determinação da condutividade hidráulica saturada (K_s) em permeímetro de carga variável (GUBIANI et al., 2008). Realizadas essas determinações, as amostras foram secas em estufa a 105 °C para obtenção da densidade do solo (DS) pelo método do anel volumétrico conforme BLAKE & HARTGE (1986).

Para a realização do ensaio de Proctor Normal, foram coletadas amostras nas camadas de 0-10, 10-20 e 20-40 cm, no sistema conservacionista (PDsem) no sistema convencional (PCsem) e na Mata. As amostras foram secas ao ar e peneiradas em malha de 4,76 mm, posteriormente foram umedecidas em intervalos de $0,02 \text{ kg kg}^{-1}$ e acondicionadas em sacos plásticos, onde permaneceram em repouso por 24 h para a homogeneização da umidade. O ensaio de Proctor Normal foi realizado num aparelho automático (Solotest[®]) constituído de uma base giratória, na qual se encontra fixado um cilindro de 1.000 cm^3 (10,0 cm de diâmetro e 12,73 cm de altura), com um soquete metálico de 2,5 kg e altura de queda constante igual a 30,5 cm, que resulta na aplicação de 560 kPa de energia por golpe, seguindo a NBR 7.182 (ABNT, 1986). A compactação do solo foi realizada aplicando-se 25 golpes do soquete, em três camadas (75 golpes) sobrepostas no interior do cilindro, sendo que cada camada ocupou 1/3 do volume do cilindro. Após a compactação foi realizada a pesagem para determinação da densidade do solo e extraído uma amostra para a determinação da umidade gravimétrica.

Durante o cultivo da soja, em janeiro de 2012, 34 anos após a implantação do experimento, foram coletadas amostras para determinar a estabilidade de agregados, nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20, 20-40 cm. Esta coleta foi realizada neste mês para coincidir com o mês de coleta realizado por Costa et al. (2003) em janeiro de 2000, 21 anos após a instalação do experimento. A estabilidade de agregados foi determinada por dois métodos: por agitação vertical úmida de subamostras compreendidas entre 4,76 e 8,00 mm de diâmetro segundo Kemper & Chepil (1965), sendo os resultados expressos pelo diâmetro médio geométrico (DMG); por agitação vertical úmida de subamostras compreendidas entre 1,0 e 2,0 mm de diâmetro segundo Kemper & Rosenau (1986), sendo os resultados expressos pelo índice de estabilidade de agregados (IEA), que varia de 0 a 1.

Para avaliar a variação temporal da umidade e o armazenamento de água do solo nos sistemas de manejo, realizou-se a coleta de solo durante o mês de janeiro de 2010, durante o início do florescimento da soja, com intervalos de 2 a 4 dias em função da precipitação do período. As coletas foram realizadas nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm. Após cada coleta, as amostras foram secas em estufa a 105°C por 24 horas, calculando-se em seguida a umidade gravimétrica. Com os dados de umidade gravimétrica e de densidade do solo de cada sistema e camada foi calculada a umidade volumétrica. O cálculo do armazenamento de água nos sistemas de manejo foi efetuado considerando a espessura de cada camada, obtendo-se, desta forma, o armazenamento por camada.

4.2.6 Análise estatística

A análise foi realizada através do programa de análises estatísticas SAS 9.2 (SAS INSTITUTE INC., 2010). Os resultados foram submetidos à análise de variância pelo teste F, utilizando um modelo misto. Os diferentes sistemas de manejo foram considerados como um fator de efeito fixo e a profundidade como uma medida repetida no tempo. As médias foram comparadas através de contrastes univariados e multivariados segundo descrito abaixo:

- Preparo Convencional sem calcário *versus* Mata (**PCsem x Mata**);
- Plantio Direto sem calcário *versus* Mata (**PDsem x Mata**);
- Preparo Convencional sem calcário e com calcário incorporado *versus* Plantio Direto sem calcário, calcário incorporado e com calcário superficial (**PCs x PDs**);
- Preparo Convencional sem calcário *versus* Preparo Convencional com calcário (**PCsem x PCinc**);
- Plantio Direto sem calcário *versus* Plantio Direto com calcário incorporado e calcário superficial (**PDsem x PDinc e PDsup**);
- Plantio Direto com calcário incorporado *versus* Plantio Direto com calcário superficial (**PDinc x PDsup**).

Além da análise de variância, foi calculado o coeficiente de correlação linear de Pearson a fim de, correlacionar a umidade volumétrica (UV) e a água disponível (AD) com o carbono orgânico (CO), macroporosidade (macro), microporosidade (micro), densidade do solo (Ds) e rendimento das culturas.

Na discussão, eventualmente, os sistemas PDsem, PDinc e PDsup, foram denominados de sistemas conservacionistas, e os sistemas PCsem e PCinc de sistemas convencionais.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1 Densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade

A densidade da mata foi menor em relação ao PCsem e PDsem até a profundidade de 40 cm e não diferiu nas camadas mais profundas (Tabela 3). A menor densidade se deve ao maior teor de matéria orgânica, principalmente na camada superficial, associado à maior

atividade da fauna edáfica e das raízes na mata. Além disso, a transmissão da pressão realizada na superfície do solo para o seu interior, pelas máquinas e implementos, faz com que os sistemas de manejo tenham maior densidade em relação à mata (SOHNE, 1958; VANDEN BERG & GILL, 1962).

O sistema convencional teve a maior densidade do solo nas camadas de 0-2,5 e de 10-20 cm em relação ao conservacionista. Tais resultados contrariam os obtidos por Vieira & Muzilli (1984), Bertol et al. (2000), Silva et al. (2000), Stone & Silveira (2001), que ao compararem sistemas de preparo do solo verificaram maior densidade do solo no PD em relação ao PC. Esses autores atribuem a maior densidade do solo no PD à ausência de revolvimento. É possível que a menor densidade do solo no PD nesse estudo, seja decorrente do histórico dos cultivos e do alto aporte de restos culturais e consequentemente alto teor de matéria orgânica no solo em comparação ao PC. Além disso, a estrutura denominada de “pô-de-café”, comum em solos oxídicos e também presente neste Latossolo Bruno, confere ao solo agregados estáveis e resistentes, que resultam em menor densidade, mesmo no plantio direto (COSTA, 2001; ALVES (2002).

A aplicação ou não do calcário, bem como o seu modo de aplicação, não alterou a densidade do solo nos sistemas de manejo.

Em todos os sistemas de uso e manejo do solo a densidade ficou abaixo dos valores críticos obtidos pelo teste de Proctor para esse Latossolo ($1,2 \text{ Mg m}^{-3}$) e dos propostos por Reinert & Reichert (2001) para culturas comerciais ($\geq 1,45 \text{ Mg m}^{-3}$ para solos argilosos) (Figura 2).

Neste mesmo experimento, aos 21 anos de condução, Costa et al. (2003) também não observaram compactação. Ressaltam que a classe de solo, a condição de umidade em que são feitas as operações ao longo do ciclo da cultura e o tempo de utilização dos sistemas de manejo, são variáveis importantes que devem ser consideradas na avaliação da densidade do solo em diferentes sistemas de manejo.

Figura 2 - Densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade em diferentes sistemas de uso e manejo num Latossolo Bruno, Guarapuava, PR. NC = Nível Crítico propostos por Reinert & Reichert (2001). NCP = Nível Crítico obtido pelo teste de Proctor. NCPA = Nível Crítico de Porosidade de Aeração.

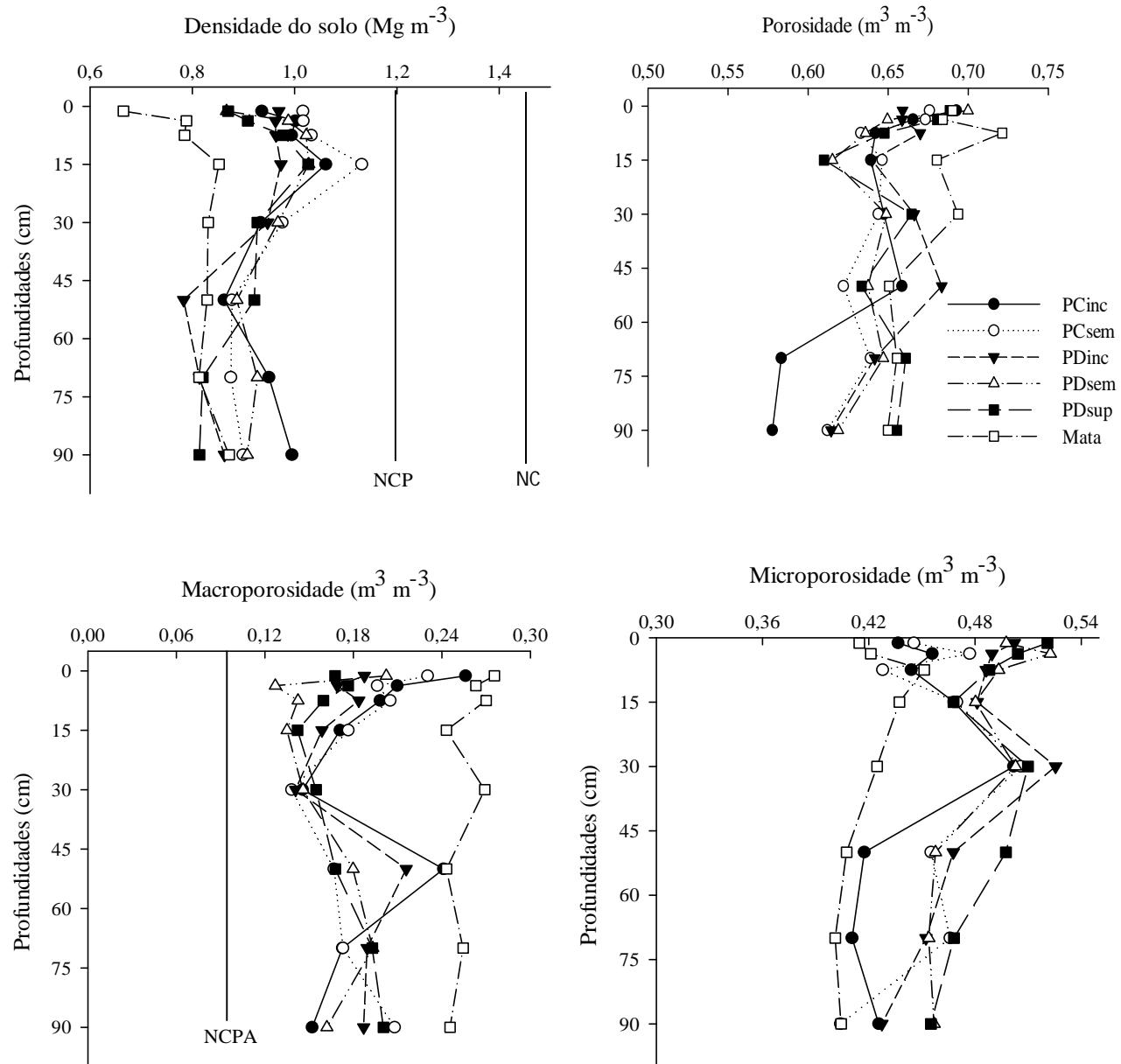


Tabela 3 - Contrastes das combinações entre sistemas de uso e manejo para a densidade do solo (Ds), porosidade total (PT), macroporosidade (Macro) e microporosidade (Micro) num Latossolo Bruno, Guarapuava, PR.

Contrastes	Camadas (cm)							
	0-2,5	2,5-5	5-10	10-20	20-40	40-60	60-80	80-100
Ds (Pr > F)								
PCsem x Mata	**	**	**	**	**	ns	ns	ns
PDsem x Mata	**	**	**	**	**	ns	ns	ns
PCs x PDs	*	ns	ns	*	ns	ns	ns	*
PCsem x PCinc	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
PDsem x PDinc e PDSup	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns
PDinc x PDsup	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
PT (Pr > F)								
PCsem x Mata	ns	ns	**	ns	*	ns	ns	ns
PDsem x Mata	ns	ns	**	**	*	ns	ns	ns
PCs x PDs	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns
PCsem x PCinc	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**	ns
PDsem x PDinc e PDSup	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
PDinc x PDsup	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*
Macro (Pr > F)								
PCsem x Mata	ns	**	**	**	**	**	**	ns
PDsem x Mata	**	**	**	**	**	*	*	**
PCs x PDs	**	**	*	ns	ns	ns	ns	ns
PCsem x PCinc	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	*
PDsem x PDinc e PDSup	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns
PDinc x PDsup	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Micro (Pr > F)								
PCsem x Mata	ns	**	ns	ns	*	*	**	ns
PDsem x Mata	**	**	*	*	**	**	**	**
PCs x PDs	**	**	**	ns	ns	*	ns	*
PCsem x PCinc	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
PDsem x PDinc e PDSup	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
PDinc x PDsup	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

ns: não significativo; * significativo a 5% de probabilidade; ** significativo a 1% de probabilidade

A porosidade total (PT) do solo da mata diferiu dos sistemas de manejo do solo nas camadas de 5-10, 10-20 e 20-40 cm (Tabela 3). Com isso pode-se afirmar que a menor densidade na mata, nestas camadas, se deve à menor densidade da matéria orgânica, a qual está em maior proporção na mata, bem como pelo efeito agregador da matéria orgânica. A maior porosidade do solo está diretamente relacionada à densidade e/ou ao nível de compactação do solo (SIDIRAS et al., 1982; De MARIA et al., 1999)

A PT não diferiu entre os sistemas de manejo, com exceção da camada de 60-80 cm. Essa situação difere da observada por Albuquerque et al. (2001), Stone & Silveira (2001) e Secco et al. (2005), os quais verificaram que os sistemas convencionais tiveram maior porosidade em relação aos conservacionistas. Acredita-se que essas diferenças estejam relacionadas principalmente com as distintas condições de umidade no momento do preparo

do solo, com os diferentes tratos culturais aplicados e os variados aportes de material vegetal das diferentes culturas. Além disso, o elevado teor de argila e matéria orgânica, e a presença de óxidos de ferro e alumínio desse solo (COSTA, 2001), lhe confere uma estrutura mais estável e resistente mediante intervenções antrópicas, podendo assim resultar em poucas alterações na porosidade total.

A prática da calagem nos sistemas de manejo não alterou a PT, a não ser na camada de 60-80 e 80-100 cm, as quais, nestas camadas devem estar mais relacionadas a variabilidade do solo e menos ao efeito do calcário.

Quando avaliada em profundidade, observou-se redução da PT até 100 cm de profundidade em todos os sistemas (Figura 2). Segundo Silva et al. (2005) esse comportamento pode ser atribuído aos ciclos sucessivos de umedecimento-secamento que ocorrem na superfície do solo, além da melhoria de sua estrutura pela intensa atividade biológica e pelo crescimento das raízes. Outro fator que altera a PT do solo é o sistema sulcador da semeadora utilizada, o qual mobiliza no verão e no inverno todos os sistemas para a semeadura das culturas, com menor espaçamento entre sulcos na semeadura de inverno, para o cultivo de trigo, cevada, aveia, nabo forrageiro e ervilhaca, e maior espaçamento no verão para a semeadura de soja e milho.

A mata teve maior macroporosidade em relação ao PDsem até 100 cm de profundidade (Tabela 3). Isso se deve principalmente à maior exploração de solo pelo sistema radicular das plantas, à atividade biológica que promove a formação de galerias de tamanhos variados, ao maior teor de matéria orgânica (MACHADO & BRUM 1978) e a ausência de trânsito de máquinas na mata nativa.

Os sistemas convencionais tiveram maior macroporosidade até 10 cm de profundidade, em comparação aos conservacionistas. A maior macroporosidade nos sistemas convencionais se deve principalmente à mobilização do solo nos dois cultivos anuais.

Por outro lado, a presença ou ausência do calcário no PC alterou a macroporosidade do solo somente nas camadas de 40-60 e 80-100 cm. Possivelmente essas diferenças estejam mais relacionadas à variabilidade do solo e menos ao efeito do calcário. Já nos sistemas conservacionistas, a calagem alterou a macroporosidade do solo apenas na camada de 2,5 a 5 cm. A maior macroporosidade nos sistemas conservacionistas após a aplicação do calcário está relacionada indiretamente à maior produção de fitomassa aérea e radicular das culturas (PÉRTILE et al., 2012), a qual aumenta a matéria orgânica e a atividade microbiana no solo, fatores que auxiliam na estabilização dos agregados e consequentemente melhoram a aeração do solo.

Todavia, é importante ressaltar que, independente do sistema de manejo adotado, da presença ou ausência do calcário, bem como do modo de aplicação do calcário, a macroporosidade foi superior ao mínimo considerado restritivo ao desenvolvimento radicular de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (XU et al., 1992) (Figura 2).

A microporosidade do solo da mata foi menor em relação ao PCsem nas camadas de 2,5-5, 20-40, 40-60 e 60-80 cm. Comparativamente ao PDsem a mata teve menor microporosidade até 100 cm de profundidade (Tabela 3). Os sistemas conservacionistas tiveram maior microporosidade, principalmente nas camadas mais superficiais, em relação aos convencionais. O trânsito de máquinas, a baixa mobilização e o arranjoamento natural do solo, quando este não é mobilizado, diminui o volume de macroporos e aumenta de microporos, principalmente nas camadas mais superficiais (VIEIRA & MUZILLI, 1984). Costa et al. (2003) também observaram maior microporosidade nos sistemas conservacionistas em relação aos convencionais nesse mesmo experimento após 21 anos de implantação. A aplicação ou não de calcário tanto no sistema conservacionista como no convencional não influenciou a microporosidade do solo.

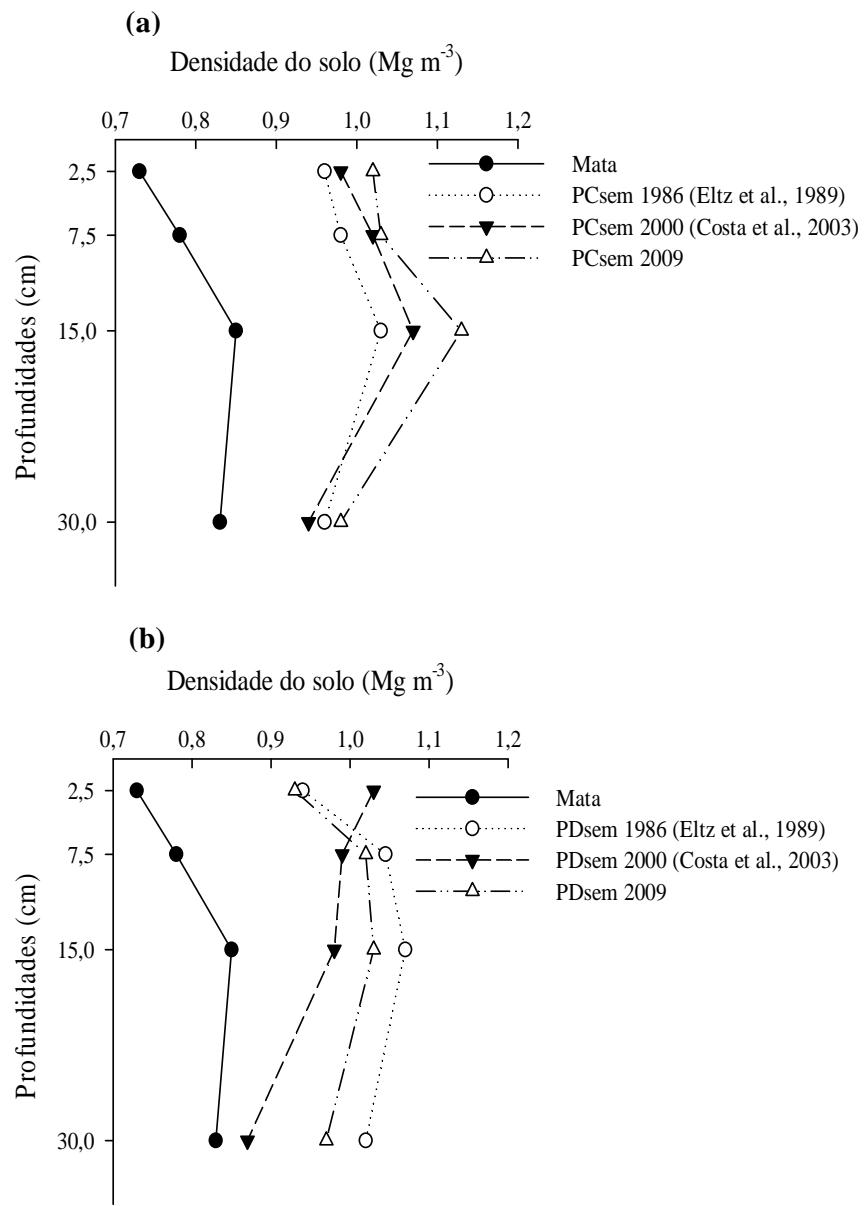
5.3.1.1 Variação temporal da densidade do solo

Ao longo de 31 anos de condução do experimento, observou-se pequenas variações na densidade do solo no PCsem, até 30 cm, quando comparado com as avaliações realizadas por Eltz et al. (1989) e Costa et al. (2003) (Figura 3a). Na camada de 10-20 cm (profundidade média de 15 cm) houve aumento na densidade de aproximadamente 6% no período de 2000 a 2009. A maior densidade nessa camada indica a formação de um possível “pé-de-arado” ou “pé-de-grade”, a qual ocorre devido ao uso contínuo de implementos em uma mesma profundidade durante longos períodos de tempo. Para amenizar esse problema é recomendado o uso de escarificadores principalmente se a camada estiver no máximo entre 15 a 20 cm de profundidade.

No PDsem, a densidade determinada em 2009 foi menor em relação àquelas avaliadas em 1986 e em 2000 na camada de 0 a 5cm. Nas demais camadas a densidade foi maior na avaliada por Eltz et al. (1989) e menor na avaliada por Costa et al. (2003) em relação à densidade determinada em 2009 (Figura 3b). A menor densidade do solo no ano de 2000 em relação ao ano de 1989 e de 2009 pode estar relacionado a época de coleta do solo, uma vez que, em 2000 o solo foi coletado em janeiro após a implantação das culturas e em 1989 e

2009 as amostras foram coletadas em maio, após a colheita da cultura de verão, antes do preparo do solo para a cultura de inverno.

Figura 3 - Densidade do solo determinada em 1986 (Eltz et al., 1989), em 2000 (Costa et al., 2003) e 2009 em áreas sob PCsem (a), PDsem (b) e mata nativa, num Latossolo Bruno, Guarapuava, PR.



5.3.2 Ensaio de Proctor

A densidade máxima de compactação na mata variou de 1,19 a 1,30 Mg m^{-3} , no sistema de preparo convencional de 1,27 a 1,33 Mg m^{-3} , e no plantio direto de 1,18 a

1,31 Mg m⁻³ (Figura 4). Portanto, em todas as camadas dos sistemas de uso e manejo do solo, as densidades máximas não ultrapassaram a densidade de 1,35 Mg m⁻³. Esta densidade é menor do que a considerada crítica por Reinert & Reichert (2001) para solos argilosos que é de 1,45 Mg m⁻³.

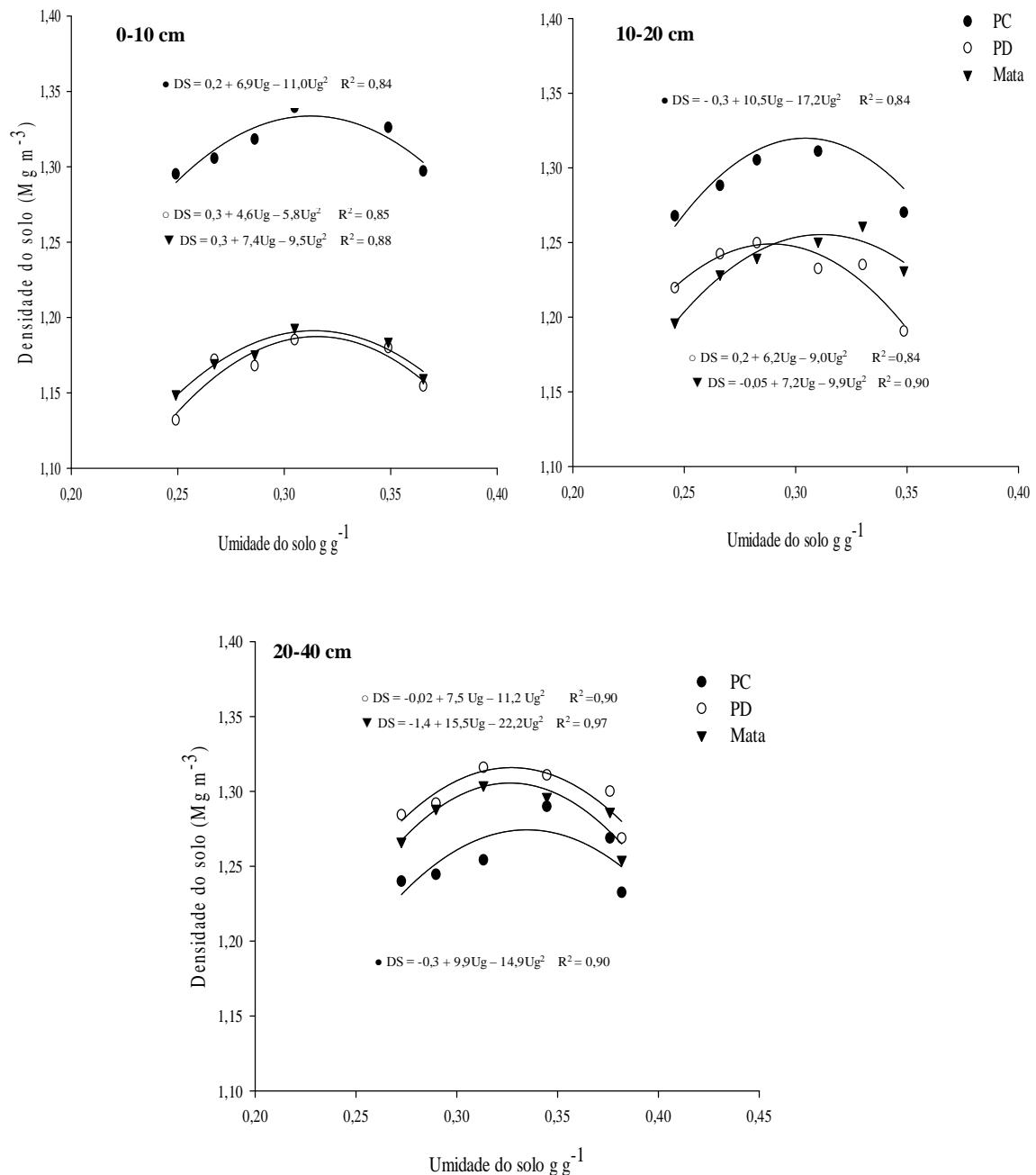
O solo com mata nativa e sob plantio direto teve a menor densidade máxima de compactação, quando comparado ao preparo convencional na camada de 0-10 e 10-20 cm. Comportamento contrário ocorreu na camada de 20-40 cm (Figura 4). O maior teor de matéria orgânica tanto na mata quanto no sistema sob plantio direto em relação ao preparo convencional, principalmente nas camadas mais superficiais, explica esse comportamento.

Em trabalho realizado num Latossolo Vermelho após 30 anos sob plantio direto, Bettioli Júnior et al. (2012) encontraram uma densidade máxima de 1,52 Mg m⁻³. Em solos do Rio Grande do Sul cultivados com sistema de plantio direto há mais de dez anos, Marcolin & Klein (2011) verificaram que dos dez solos coletados em diferentes camadas até 30 cm de profundidade, apenas dois solos tiveram densidade máxima menor que 1,30 Mg m⁻³, sendo estes os que tinham os maiores teores de matéria orgânica em relação aos demais.

Segundo Braida et al. (2006) a susceptibilidade à compactação, avaliada pelo ensaio de Proctor, torna-se menor no solo com mais matéria orgânica. Afirmaram também que, para um mesmo nível de energia, quanto maior o teor de matéria orgânica do solo, menor é a densidade máxima obtida para um mesmo nível de energia de compactação. Isso se deve principalmente ao efeito amortecedor da matéria orgânica e dos resíduos vegetais presentes na superfície do solo, os quais absorvem parte da energia de compactação produzida pelo trânsito de máquinas e dos animais que transitam sobre os solos (FIGUEIREDO et al., 2000; BRAIDA et. al., 2006; BAYER et. al. 2009), bem como pelo efeito agregador que este constituinte possui (TISDALL & OADES, 1982; SIX et al., 1999; SALTON et al., 2008; VEZZANI & MIELNICZUK, 2011). Além disso, a baixa densidade da matéria orgânica reduz a densidade do solo (ZHANG et. al., 1997).

Em relação à umidade ótima de compactação, houve poucas diferenças entre os sistemas e camadas, sendo que a umidade ótima para compactar o solo está próximo de 0,32 g g⁻¹, exceção é o sistema de PD na camada de 10-20 cm que foi de 0,28 g g⁻¹. Considerando as densidades de cada camada e sistema, a umidade volumétrica variou de 0,25 a 0,39 g g⁻¹ (Figura 4).

Figura 4 - Curvas de compactação em diferentes camadas e sistemas de uso e manejo num Latossolo Bruno, Guarapuava, PR.



5.3.3 Estabilidade de agregados e variação temporal

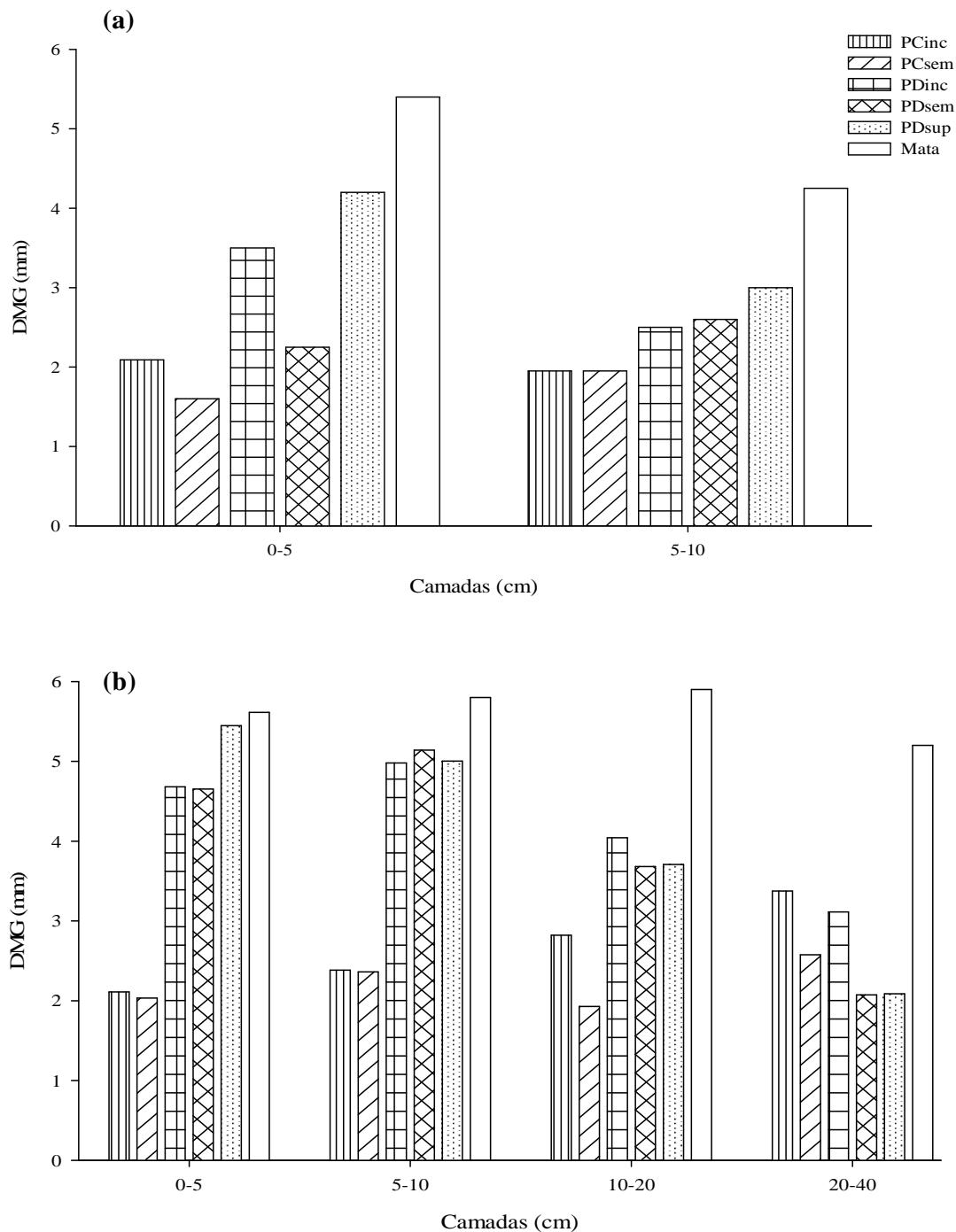
A mata teve elevada estabilidade de agregados (DMG) em todas as camadas, logo, o DMG da mata foi maior em relação ao PCsem até 40 cm de profundidade (Tabela 4). Isso se deve a ausência de intervenção antrópica, à atuação do sistema radicular, e ao alto teor de matéria orgânica da mata. Resultados semelhantes foram encontrados por Assis & Lanças (2005) num Nitossolo Vermelho, os quais observaram maior DMG na mata nativa comparativamente ao sistema sob pregaro convencional utilizado durante 1, 4, 5 e 12 anos.

Por outro lado, o DMG da mata foi igual ao do PDsem nas camadas superficiais (0-5 e 5-10 cm) (Tabela 4). Essa igualdade na estabilidade de agregados entre o PDsem e a mata na camada de 0 a 10 cm, indica melhorias deste atributo para um patamar igual ao dos solos sem intervenções antrópicas. O aumento da estabilidade se deve a incorporação de matéria orgânica no PD ao longo dos anos, mas também devido ao aumento da densidade do solo, processo que aumenta as forças de coesão entre as partículas, conforme avaliado por Carpenedo & Mielniczuk (1990).

Com o uso do solo para produção de culturas agrícolas, observa-se que o pregaro contínuo do solo sob pregaro convencional diminui a estabilidade de agregados até 20 cm de profundidade comparativamente aos sistemas conservacionistas. O não revolvimento do solo e o maior teor de matéria orgânica nos sistemas conservacionistas são responsáveis pelo maior DMG nesse sistema. Portanto, é um sistema que permite a recuperação da estabilidade do solo quando utilizado por longo prazo.

Com a adição de calcário no PCinc a estabilidade de agregados aumentou comparado ao PCsem nas camadas de 10 a 40 cm. A calagem também aumentou a estabilidade de agregados na camada de 10-20 cm nos sistemas conservacionistas (Tabela 4). A calagem neutraliza o Al trocável e aumenta as cargas elétricas negativas, mecanismo que dispersa os solos de carga variável (COSTA et al., 2004a), porém adiciona cátions bivalentes, como o Ca e o Mg, os quais passam a ocupar as cargas elétricas negativas criadas pelo aumento do pH e pela desobstrução de cargas ocupadas por algumas formas não trocáveis de Al, diminuindo assim a carga líquida negativa e a dispersão dos colóides (CHARLET & SPOSITO, 1989). A resultante destes efeitos determina se haveria maior repulsão ou atração entre os colóides do solo, mecanismo que pode afetar a agregação do solo, principalmente a nível de microagregação.

Figura 5 - Diâmetro médio geométrico (DMG) dos agregados do solo em diferentes profundidades e sistemas de uso e manejo, em janeiro de 2000 (**a**) (COSTA, 2001) e em janeiro de 2012 (**b**) num Latossolo Bruno, Guarapuava, PR.



O DMG da camada superficial (0-10 cm) dos sistemas convencionais observado em 2000 (COSTA, 2001) foi aparentemente semelhante (média 1,9 mm) ao observado em 2012

(média 2,2 mm). Já, nos sistemas conservacionistas houve aumento de aproximadamente 66% no DMG em relação ao ano de 2000 (Figura 5a,b). A estabilidade estrutural dos solos ocorre em tempos mais reduzidos do que a recuperação da forma da estrutura, sendo que o aumento da estabilidade está diretamente associado ao aumento do conteúdo de matéria orgânica dos solos (REINERT, 1998). Assim, com o transcorrer do tempo, o plantio direto foi responsável por recuperar a estabilidade dos agregados do solo, anteriormente degradado pelo preparo convencional que era utilizado na área antes da implantação do experimento. E, transcorridos 34 anos, o sistema de plantio direto têm maior DMG em relação ao preparo convencional, devido principalmente, ao maior teor de carbono orgânico.

Em relação ao índice de estabilidade dos agregados (IEA) a mata teve maior IEA comparativamente aos demais tratamentos em todas as camadas (Tabela 4). Porém, não houve diferenças estatísticas entre os preparos convencionais e os sistemas conservacionistas, assim como não houve diferença quanto à presença ou ausência de calcário e ao modo de aplicação desse corretivo. Tais resultados corroboram com Wendling et al. (2005) e Oliveira et al. (2010) os quais não observaram diferenças no IEA em diferentes sistemas de manejo num Latossolo Vermelho e num Argissolo respectivamente.

Desta forma, como o DMG representa a estimativa do tamanho da classe de agregados de maior ocorrência, e o IEA não considera a distribuição por classes de agregados, o DMG foi mais sensível às variações da estabilidade do solo do que o IEA.

Figura 6 - Índice de estabilidade de agregados do solo (IEA) em diferentes profundidades e sistemas de uso e manejo num Latossolo Bruno, Guarapuava, PR.

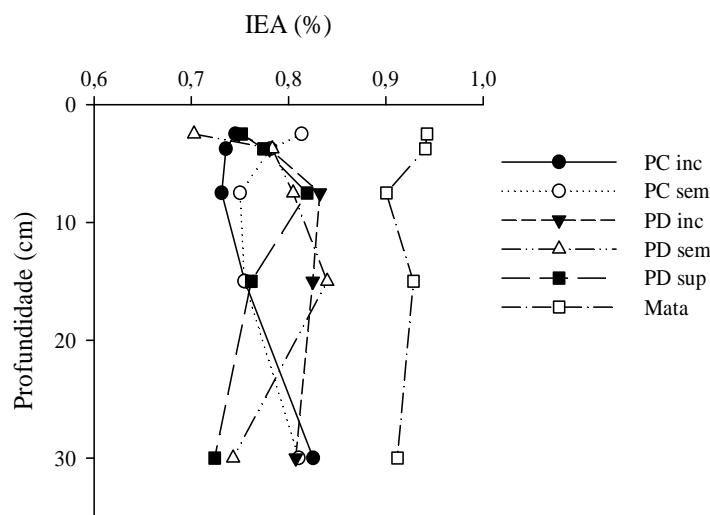


Tabela 4 - Contrastess das combinações entre sistemas de uso e manejo, para a estabilidade de agregados do solo (DMG) e índice de estabilidade de agregados (IEA) num Latossolo Bruno, Guarapuava, PR.

Contrastes	Camadas (cm)			
	0-5	5-10	10-20	20-40
DMG (Pr > F)				
PCsem x Mata	**	**	**	**
PDsem x Mata	ns	ns	**	**
PCs x PDs	**	**	**	**
PCsem x PCinc	ns	ns	**	*
PDsem x PDinc e PDsup	ns	*	*	ns
PDinc x PDsup	ns	ns	ns	ns
IEA (Pr > F)				
PCsem x Mata	**	**	**	**
PDsem x Mata	**	**	*	**
PCs x PDs	ns	ns	ns	ns
PCsem x PCinc	ns	ns	ns	ns
PDsem x PDinc e PDsup	ns	ns	ns	ns
PDinc x PDsup	ns	ns	ns	ns

ns: não significativo; * significativo a 5% de probabilidade; ** significativo a 1% de probabilidade

5.3.4 Resistência do solo à penetração

A mata teve menor resistência à penetração das raízes (RP) até 30 cm de profundidade comparativamente, ao PCsem e ao PDsem na determinação realizada em maio de 2009 (Tabela 5). A ausência de ação antrópica, maior teor de matéria orgânica e menor densidade do solo na mata determinam esta menor RP. Na determinação realizada em março de 2011 as diferenças entre a mata e os sistemas de manejo foram observadas somente até 10 cm de profundidade. As diferenças na RP entre a mata e os sistemas de manejo realizadas em maio de 2009 e em março de 2011 estão possivelmente associadas à umidade do solo no momento das leituras. Na segunda avaliação (março de 2011) a umidade gravimétrica da mata foi aproximadamente 26% maior em relação aos sistemas de manejo (conservacionistas e convencionais) na média das camadas avaliadas, enquanto que na primeira avaliação (maio de 2009) a umidade da mata foi 16% maior do que os demais sistemas (Figura 7). Assim, a medida que a umidade do solo aumentou não houve diferença entre a mata e os sistemas de manejo abaixo da camada de 10 cm. Segundo Assis et al. (2009), há grande dependência da RP com o teor de água do solo. À medida que aumenta o teor de água a RP diminui. Além disso, o aumento da RP com as alterações da umidade não são lineares.

Figura 7 - Resistência à penetração e umidade gravimétrica em diferentes sistemas de uso e manejo, em maio de 2009 (**a**) e em março de 2011 (**b**) num Latossolo Bruno, Guarapuava, PR.

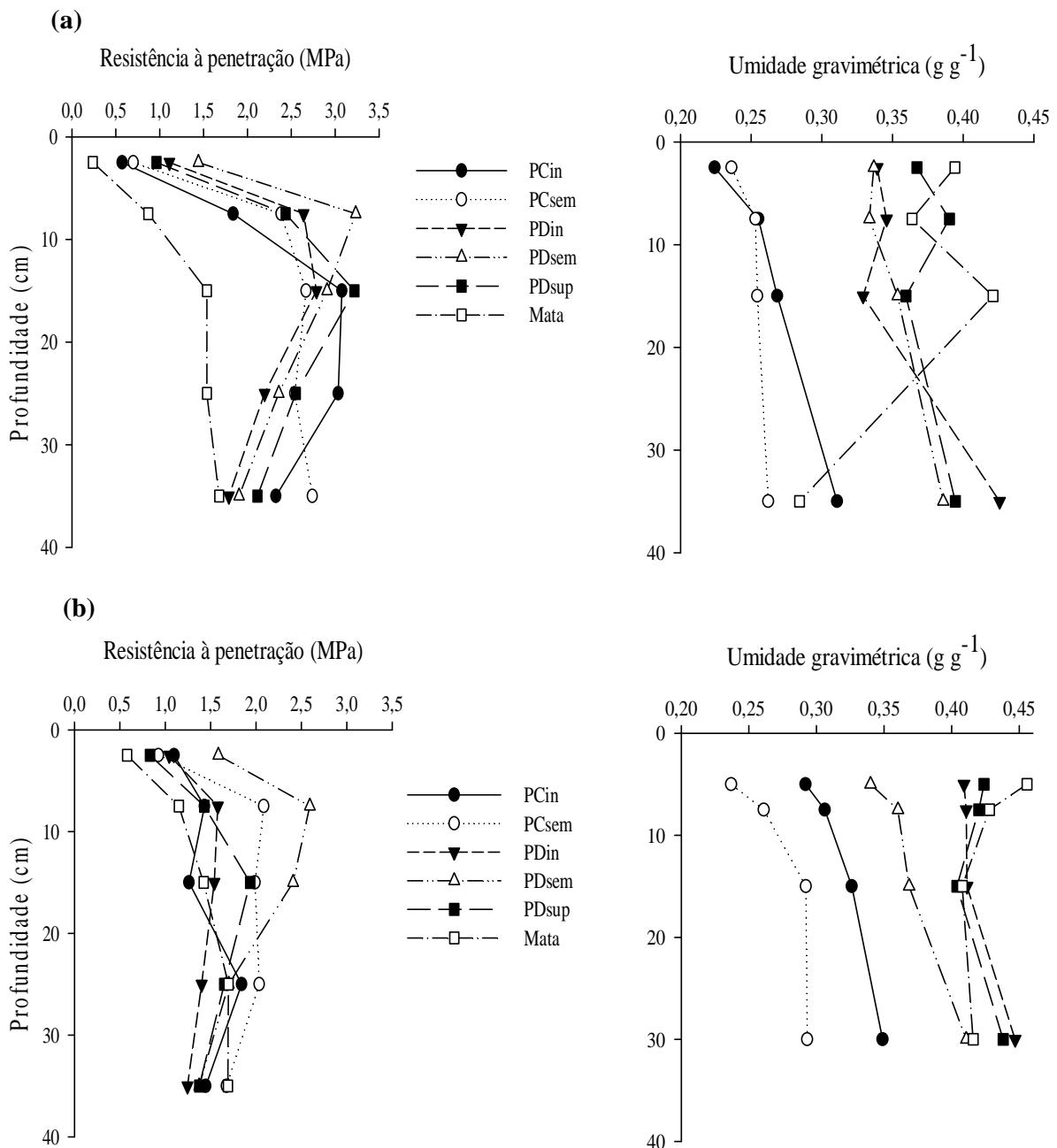


Tabela 5 - Contrastess das combinações entre sistemas de uso e manejo para a resistência do solo a penetração, em maio de 2009 e em março de 2011, num Latossolo Bruno, Guarapuava, PR.

Contrastess	Camadas (cm)				
	0-5	5-10	10-20	20-30	30-40
Maio 2009 (Pr > F)					
PCsem x Mata	**	**	**	**	ns
PDsem x Mata	**	**	**	**	ns
PCs x PDs	**	**	ns	ns	ns
PCsem x PCinc	ns	*	*	ns	ns
PDsem x PDinc e PDsup	**	**	ns	ns	ns
PDinc x PDsup	ns	ns	ns	ns	ns
Março 2011 (Pr > F)					
PCsem x Mata	ns	**	ns	ns	ns
PDsem x Mata	**	**	ns	ns	ns
PCs x PDs	ns	ns	**	*	ns
PCsem x PCinc	ns	**	**	ns	ns
PDsem x PDinc e PDsup	**	**	ns	ns	ns
PDinc x PDsup	ns	ns	*	ns	ns

ns: não significativo; * significativo a 5% de probabilidade; ** significativo a 1% de probabilidade

Os sistemas conservacionistas tiveram maior RP até 10 cm de profundidade em relação aos sistemas convencionais em maio de 2009. Em março de 2011 a maior RP dos sistemas conservacionistas foi entre 10 e 30 cm de profundidade (Tabela 5). A menor RP nos preparos convencionais relaciona-se diretamente à mobilização periódica do solo antecedente à semeadura das culturas nesses sistemas. Resultados semelhantes foram obtidos por Beutler et al. (2001), Tavares Filho et al. (2001), Albuquerque et al. (2001) e Ralisch et al. (2008). O PDsem foi o tratamento que teve maior RP na camada superficial (0-10 cm), média de 2,4 MPa em maio de 2009 e de 2,1 MPa em março de 2011 (Figura 7a,b). A maior RP no PDsem parece indicar compactação subsuperficial no solo, uma vez que o solo sob plantio direto teve o maior conteúdo de água no solo em ambos os anos (Figura 7). Efeitos semelhantes também foram observados por Costa (2001) aos 21 anos nesse mesmo experimento, porém isso não foi comprovado pelos resultados de densidade nas determinações aos 21 e 31 anos de condução de experimento, já que nestas duas avaliações, a densidade do solo pouco diferiu entre os sistemas. Logo, avaliações ao longo do tempo da RP juntamente com outros atributos, como a densidade, permitem uma melhor interpretação do real efeito da RP sobre o crescimento das raízes das plantas, uma vez que, medidas pontuais de RP apenas indicam se a resistência do solo é alta ou baixa (KAISER, 2010).

No sistema convencional a calagem alterou a RP em ambas as datas da realização da RP, nas camadas de 5-10 e 10-20 cm (Tabela 5). No sistema conservacionista a presença do calcário diminuiu a RP do solo nas camadas mais superficiais (Tabela 5). Nesse caso

específico, a calagem estimulou o crescimento radicular, as quais, podem amenizar o impedimento mecânico do solo, devido à capacidade de penetrar camadas com alta resistência mecânica e pela formação de canais após sofrer decomposição. Em trabalho realizado por Pértille et al. (2012) num Cambissolo Húmico observou-se que as raízes cresceram em maior profundidade nos tratamentos com maior adição de corretivos de acidez.

5.3.5 Grau de Floculação

O grau de floculação não diferiu entre a mata e os sistemas de manejo do solo, assim como não houve diferença entre os sistemas conservacionistas e convencionais (Tabela 6). Em estudo realizado por Costa et al. (2003) nessa mesma área experimental, 21 anos após a implantação do experimento, também não observaram diferenças significativas no grau de floculação, entre os sistemas de uso e manejo do solo até 20 cm de profundidade.

Diferenças quanto à aplicação de calcário só foram observadas nos sistemas conservacionistas na camada de 2,5 a 5 cm (Tabela 6). Nessa camada o PDsem teve maior floculação da argila comparativamente ao PDinc e PDsup. A redução do GF com a aplicação superficial de calcário pode ser relacionada principalmente ao aumento da espessura da dupla camada elétrica, devido à criação de cargas negativas (ALBUQUERQUE et al. 2003; PRADO, 2003). Albuquerque et al. (2003) observaram redução no GF de 69 %, em média, no solo não calcariado, para aproximadamente 58 %, quando adicionaram 9,0 Mg ha⁻¹ de calcário num Latossolo Bruno argiloso. Ao avaliar o efeito da aplicação de quantidades crescentes de calcário na dispersão de argila e na estabilidade de agregados de um Latossolo Bruno, Albuquerque et al. (2000) relataram maior dispersão de argila, porém não observaram mudanças na estabilidade de agregados.

Figura 8 - Grau de floculação de argila em diferentes sistemas de uso e manejo num Latossolo Bruno, Guarapuava, PR

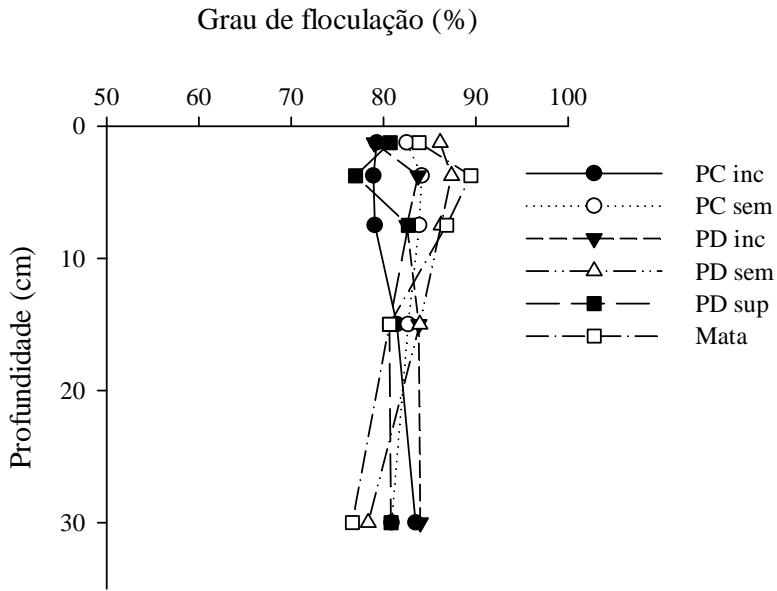


Tabela 6 - Contrastes das combinações entre sistemas de uso e manejo para o grau de floculação num Latossolo Bruno, Guarapuava, PR.

Contrastes	Camadas (cm)				
	0-2,5	2,5-5	5-10	10-20	20-40
	(Pr > F)				
PCsem x Mata	ns	ns	ns	ns	ns
PDsem x Mata	ns	ns	ns	ns	ns
PCs x PDs	ns	ns	ns	ns	ns
PCsem x PCinc	ns	ns	ns	ns	ns
PDsem x PDinc e PDsup	ns	*	ns	ns	ns
PDinc x PDsup	ns	ns	ns	ns	ns

ns: não significativo; * significativo a 5% de probabilidade; ** significativo a 1% de probabilidade

5.3.6 Umidade volumétrica e armazenamento de água

A umidade volumétrica do solo variou em função dos sistemas de manejo, da profundidade avaliada e da distribuição e intensidade da precipitação no tempo. A mata teve maior umidade volumétrica em relação ao PCsem nos dias 06, 08, 16, 18 e 25 de janeiro de 2010, principalmente na camada compreendida entre 0 a 5 cm. Nesses mesmos dias, com exceção do dia 06 e 25 de janeiro, a mata teve maior umidade volumétrica em relação ao PDsem nas camadas superficiais (Tabela 7), devido ao maior teor de matéria orgânica no solo da mata. Segundo Braida et al. (2011) a matéria orgânica influencia na disponibilidade de água no solo devido à alta higroscopidade e à grande área superficial específica, além disso, os efeitos indiretos da matéria orgânica, que estão relacionados com as mudanças na estrutura

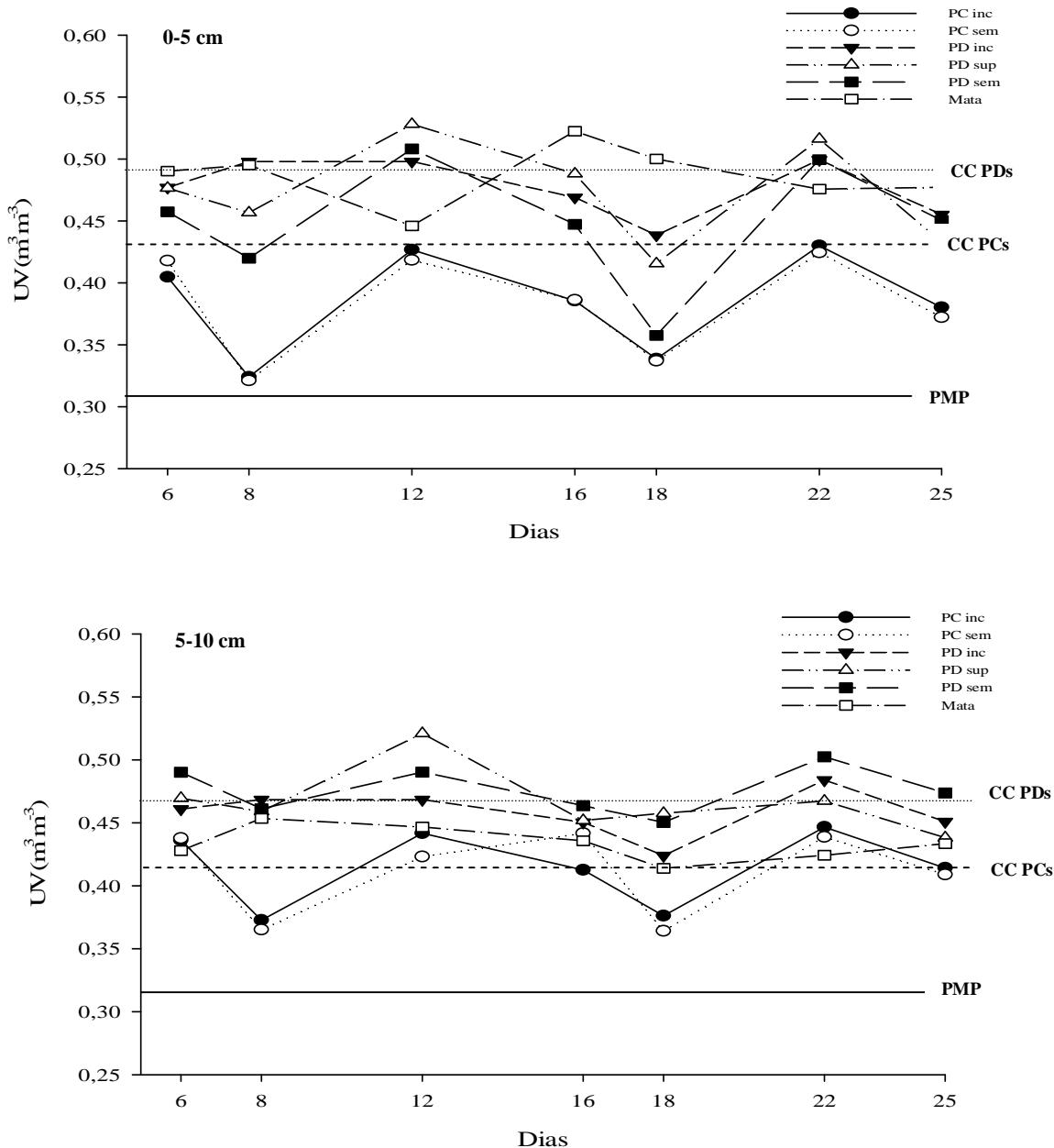
e, consequentemente no volume, diâmetro e continuidade dos poros do solo também influenciam as forças de retenção de água no solo e, portanto na sua disponibilidade.

A umidade volumétrica, média das sete datas de coleta, foi maior nos sistemas conservacionistas em relação aos convencionais principalmente na camada de 0-10 cm. Este comportamento pode ser explicado, principalmente pela maior microporosidade e menor macroporosidade do solo no PD em relação ao PC. Além disso, práticas que diminuem a perda de água para a atmosfera, como por exemplo, sistemas de preparo com menor revolvimento e a presença de resíduos vegetais sob a superfície do solo aumentam a taxa de infiltração e ajudam a reduzir as perdas por evaporação e mantêm a umidade do solo (VEIGA, 2005; REICHERT et al., 2011), o favorece o balanço hídrico para as culturas.

Quando a precipitação foi maior e mais contínua (10/01 a 13/01/2010) (Anexo F) maior foi à diferença da umidade no solo entre os sistemas de manejo, observada principalmente nas camadas de 0-5 e 5-10 cm (Figura 9). Nesse período os sistemas convencionais tiveram menor umidade volumétrica em relação aos conservacionistas. Esse comportamento se deu em função da maior macroporosidade e menor capacidade de campo dos sistemas convencionais até 10 cm de profundidade. Nas camadas mais profundas (10-20 e 20-40 cm) a diferença entre os sistemas de preparo foi menos evidente.

Ao avaliar a variação temporal da umidade nesse mesmo experimento aos 21 e 24 anos de condução Costa (2001) e Passos (2004) também verificaram maior umidade nos sistemas conservacionistas em relação aos convencionais na camada de 0-10 cm. Tais resultados contrariam os obtidos por Albuquerque et al. (2001) os quais não observaram diferença na umidade volumétrica entre os sistemas de plantio direto e preparo convencional até 20 cm de profundidade após seis anos de implantação num Nitossolo Vermelho. O pouco tempo de adoção dos sistemas de manejo pode ter contribuído para a ausência de diferenças entre eles. Num experimento com mais de dez anos de condução, Dalmago (2004) verificou maior umidade volumétrica no PD do que no PC num Argissolo Vermelho. Azzoz & Arshad (1996) afirmam que o tempo é uma variável de grande importância no que diz respeito ao caráter evolutivo dos sistemas de manejo referente às propriedades hidráulicas e físicas do solo. No entanto, as condições hídricas do solo dependem do processo de evolução inserido em cada sistema de manejo e de todas as variáveis intervenientes que atuam ao longo do tempo (DALMAGO, 2004). Em trabalho realizado num Argissolo, Kaiser (2010), constatou que a compactação adicional do solo no PD aumentou a retenção de água em relação ao PC, mas reduziu a capacidade da planta em explorar um maior volume de solo, por dificultar o crescimento do sistema radicular e reduzir a aeração do solo.

Figura 9 - Umidade volumétrica do solo (Uv) nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm, em diferentes sistemas de uso e manejo de um Latossolo Bruno, Guarapuava, PR. Dias 6, 8, 12, 16, 18, 22 e 25 de janeiro de 2010. As linhas pontilhadas e tracejadas representam a umidade na capacidade de campo nos sistemas conservacionistas (PDs) e convencionais (PCs) respectivamente e a linha cheia representa a umidade no ponto de murcha permanente dos sistemas.



Continuação...

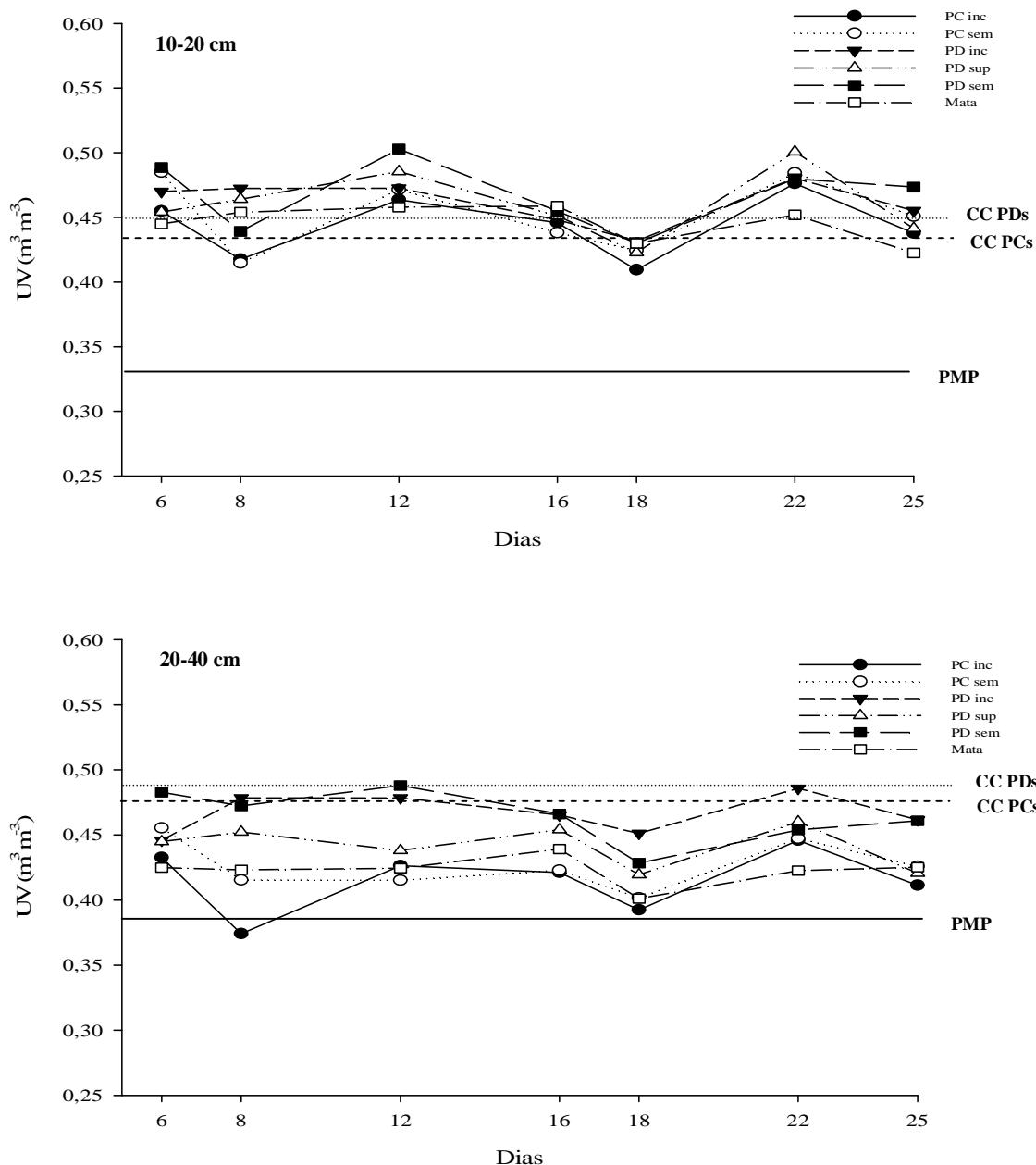


Tabela 7 - Contrastess das combinações entre sistemas de uso e manejo num Latossolo Bruno, para a umidade volumétrica do solo no dias 06, 08, 12, 16, 18, 22 e 25 de janeiro de 2010.

Contrastes	Camadas (cm)			
	0-5	5-10	10-20	20-40
06 de janeiro (Pr > F)				
PCsem x Mata	**	ns	ns	ns
PDsem x Mata	ns	ns	ns	ns
PCs x PDs	**	*	ns	ns
PCsem x PCinc	ns	ns	ns	ns
PDsem x PDinc e PDsup	ns	ns	ns	**
PDinc x PDsup	ns	ns	ns	ns
08 de janeiro (Pr > F)				
PCsem x Mata	**	**	ns	ns
PDsemx Mata	**	ns	ns	*
PCs x PDs	**	**	**	ns
PCsem x PCinc	ns	ns	ns	ns
PDsem x PDinc e PDsup	**	ns	ns	ns
PDinc x PDsup	ns	ns	ns	ns
12 de janeiro (Pr > F)				
PCsem x Mata	ns	ns	ns	ns
PDsem x Mata	**	*	ns	*
PCs x PDs	**	**	*	**
PCsem x PCinc	ns	ns	ns	ns
PDsem x PDinc e PDsup	ns	ns	ns	ns
PDinc x PDsup	ns	*	ns	**
16 de janeiro (Pr > F)				
PCsem x Mata	**	ns	ns	ns
PDsem x Mata	**	ns	ns	ns
PCs e PDs	**	ns	*	ns
PCinc x PCsem	ns	ns	ns	ns
PDsem x PDinc e PDsup	ns	ns	ns	ns
PDinc x PDsup	ns	ns	ns	ns
18 de janeiro (Pr > F)				
PCsem x Mata	**	ns	ns	ns
PDsem x Mata	**	ns	ns	ns
PCs x PDs	*	*	ns	ns
PCsem x PCinc	ns	ns	ns	ns
PDsem x PDinc e PDsup	*	ns	ns	ns
PDinc x PDsup	ns	ns	ns	ns
22 de janeiro (Pr > F)				
PCsem x Mata	ns	ns	ns	ns
PDsem x Mata	ns	**	ns	ns
PCs x PDs	**	*	ns	ns
PCsem x PCinc	ns	ns	ns	ns
PDsem x PDinc e PDsup	ns	ns	ns	ns
PDinc x PDsup	ns	ns	ns	ns
25 de janeiro (Pr > F)				
PCsem x Mata	**	ns	ns	ns
PDsem Mata	ns	*	ns	ns
PCs x PDs	**	**	ns	ns
PCsem x PCinc	ns	ns	ns	ns
PDsem x PDinc e PDsup	ns	ns	ns	ns
PDinc x PDsup	ns	ns	ns	ns

ns: não significativo; * significativo a 5% de probabilidade; ** significativo a 1% de probabilidade

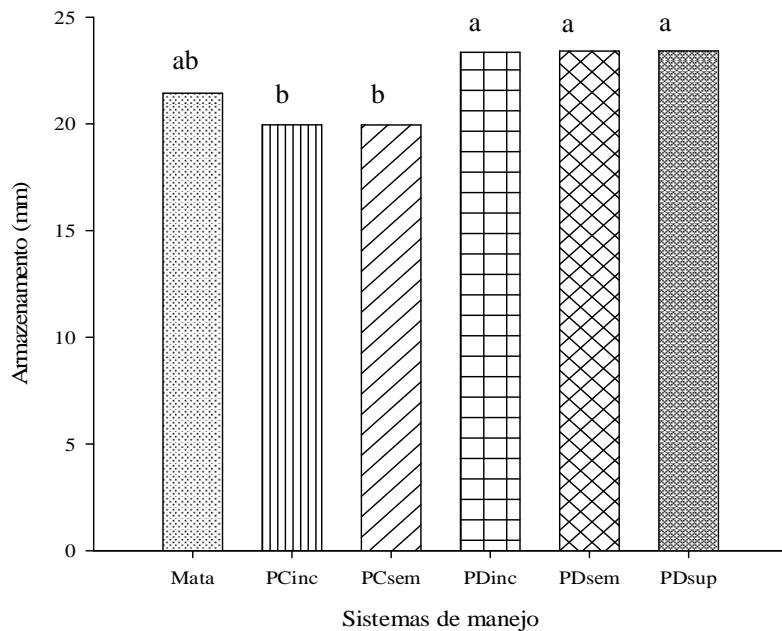
Nos sistemas convencionais não houve diferença na umidade volumétrica quanto a ausência ou presença da calagem (sem calcário ou calcário incorporado) nas camadas avaliadas. Porém no sistema conservacionista, na camada de 0 a 5 cm, nos dias 08 e 18 de

janeiro o PDsem teve menor umidade em relação ao PDinc e o PDsup (Tabela 7). Por alterar a eletroquímica dos solos, acredita-se que calagem interfira na afinidade entre a fase sólida e as moléculas de água (PROST et al., 1998). Segundo Bortoluzzi et al. (2008) a retenção de água e consequentemente o aumento da umidade volumétrica pode ser alterada pela prática da calagem. A diferença também pode ser devido ao maior aporte de resíduos ao solo e maior teor de matéria orgânica nos sistemas sem calcário. Todavia, a carência de trabalho relacionando a prática da calagem com a umidade do solo, bem como a grande divergência entre os resultados dos trabalhos existentes, instiga a realização de novos trabalhos sobre o assunto.

Os sistemas conservacionistas armazenaram aproximadamente 17% mais água do que os sistemas convencionais na camada de 0-10 cm (Figura 10). A melhoria na estrutura resultou na correlação positiva da microporosidade ($r = 0,47^*$) e negativa da macroporosidade ($r = -0,48^*$) com a umidade volumétrica (Anexo E). Além disso, a cobertura do solo por resíduos explica o maior armazenamento de água nos sistemas conservacionistas em relação aos convencionais. Resultado semelhante foi observado por Sampaio et al. (2010) ao estudar a umidade de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob plantio direto e sua relação com atributos do solo.

Segundo Sidiras (1983), o aumento da armazenagem de água no PD em relação ao PC assume especial importância, principalmente para diminuir os riscos climáticos e as flutuações nos rendimentos das culturas em períodos de estiagem. Em estudo realizado por Webber et al. (1987) num solo franco-argiloso do México, foi verificado que mesmo em períodos com precipitação abaixo da exigida pela soja, o PD teve maior rendimento da cultura do que o PC. Assim, pequenos acréscimos de umidade no solo, em períodos de déficit hídrico, podem garantir rendimentos satisfatórios (DALMAGO, 2004).

Figura 10 - Armazenamento médio de água no solo (0-10 cm) no período de 08/01 a 25/01/2010 sob sistemas de uso e manejo num Latossolo Bruno, Guarapuava, PR. Teste t a 5% de significância.



5.3.7 Curva de retenção de água

A mata teve menor capacidade de retenção de água no solo, em relação aos sistemas de manejo até 100 cm de profundidade (Figura 11), principalmente nas maiores tensões. Exceção foi a camada de 10-20 cm.

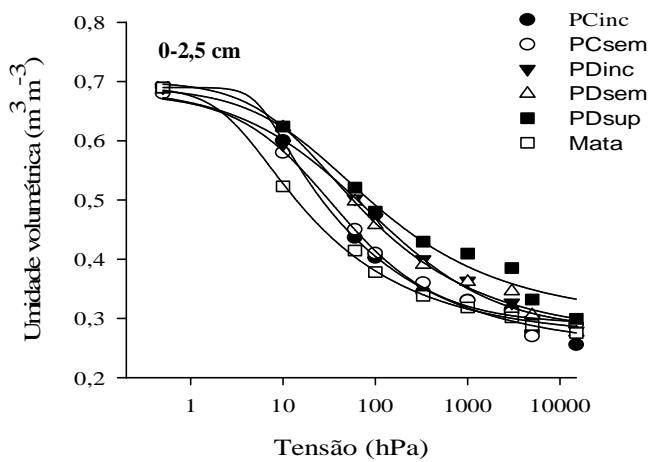
Os sistemas conservacionistas tiveram maior capacidade de retenção de água no solo em relação aos sistemas convencionais somente nas camadas superficiais (0-2,5 e 2,5-5 cm). A maior microporosidade e menor macroporosidade, além do maior teor de matéria orgânica dos sistemas conservacionistas ajudam a explicar a maior retenção de água em relação aos convencionais. Nas camadas mais profundas as diferenças foram menores entre os sistemas, as quais são mais relacionadas as variações do solo do que as diferenças entre os sistemas de manejo propriamente.

Segundo Silva et al. (2005) as variações observadas entre as curvas relacionam-se à influência da estrutura e composição dos materiais em termos de matéria orgânica e argila, o que determina alterações na quantidade e distribuição de poros. Em trabalho realizado num Latossolo Vermelho, Silva et al. (2001) observaram que o sistema sob plantio direto teve maior retenção de água na camada superficial em relação ao preparo convencional. Efeitos

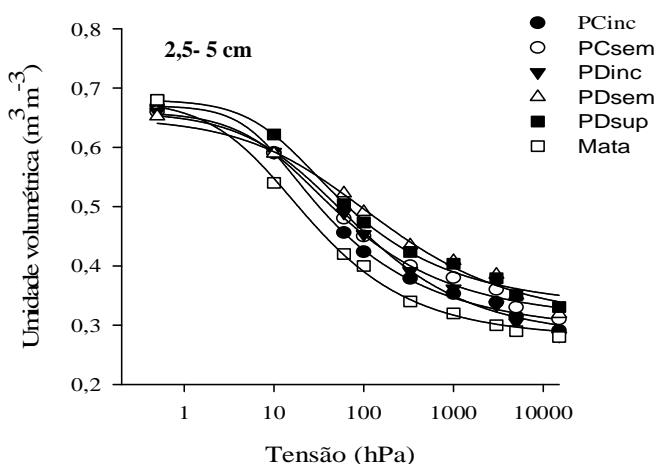
semelhantes também foram observados por Dalmago et al. (2009) num Argissolo Vermelho. A maior retenção de água no solo em plantio direto normalmente é atribuída à modificação da geometria porosa do solo. O não revolvimento do solo e o tráfego intenso de máquinas provocam a redução na macroporosidade e o aumento da microporosidade, aumentando dessa forma a retenção de água no solo (MEEK et al., 1992).

A ausência ou presença de calcário não alterou a retenção de água no solo nos sistemas de manejo estudados. Contrariamente, o modo de aplicação do calcário no sistema conservacionista alterou a retenção de água no solo, uma vez que, o PDsup teve maior retenção de água comparativamente ao PDinc até 100 cm. A alteração da estrutura devido o revolvimento do solo para a incorporação do calcário pode ter contribuído para a redução da água retida nesse sistema, principalmente nas camadas superiores.

Figura 11 - Curvas de retenção de água no solo nos sistemas de uso e manejo num Latossolo Bruno nas diferentes profundidades, e os respectivos contrastes.

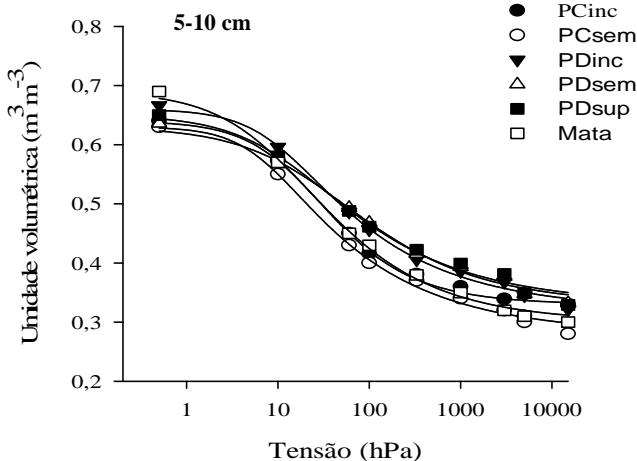


Parâmetros da equação de Van Genuchten		
Contrastes	α	n
PCsem x Mata	*	ns
PDsem x Mata	**	ns
PCs x PDs	ns	*
PCsem x PCinc	ns	ns
PDsem x PDinc e PDsup	ns	ns
PDinc x PDsup	ns	**

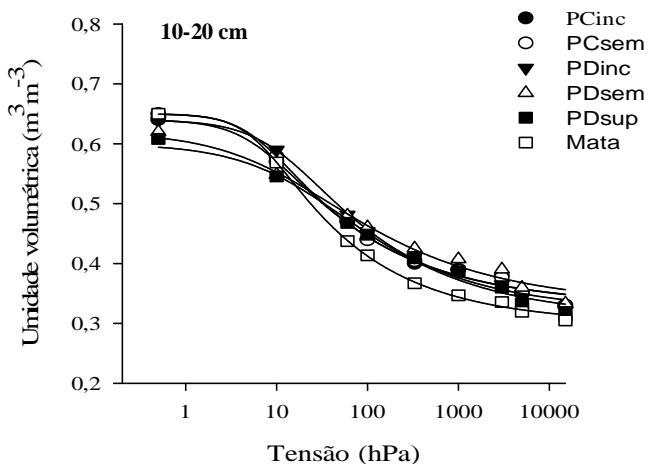


Parâmetros da equação de Van Genuchten		
Contrastes	α	n
PCsem x Mata	**	*
PDsem x Mata	**	**
PCs x PDs	**	ns
PCsem x PCinc	ns	ns
PDsem x PDinc e PDsup	ns	ns
PDinc x PDsup	ns	**

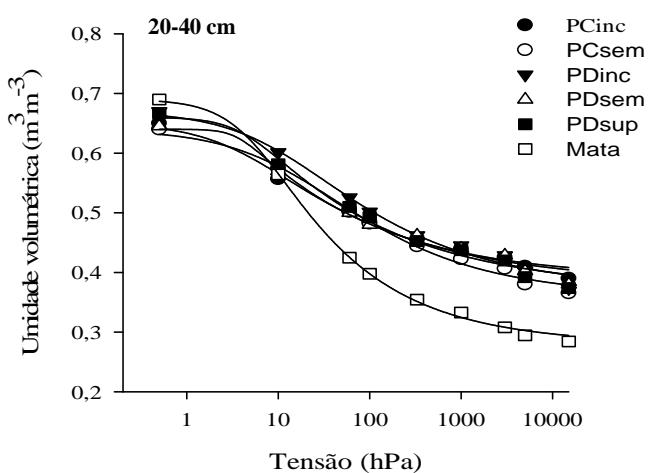
Continuação...



Parâmetros da equação de Van Genuchten		
Contrastes	α	n
PCsem x Mata	ns	ns
PDsem x Mata	**	ns
PCs x PDs	ns	ns
PCsem x PCinc	ns	ns
PDsem x PDinc e PDsup	ns	ns
PDinc x PDsup	ns	**

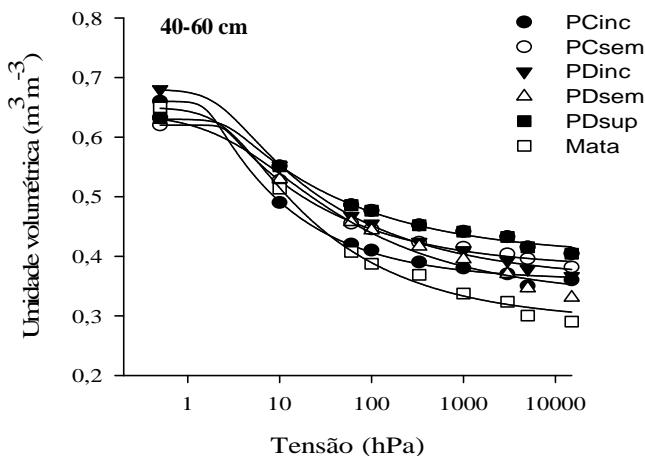


Parâmetros da equação de Van Genuchten		
Contrastes	α	n
PCsem x Mata	ns	ns
PDsem x Mata	ns	ns
PCs x PDs	ns	ns
PCsem x PCinc	ns	ns
PDsem x PDinc e PDsup	ns	ns
PDinc x PDsup	ns	**

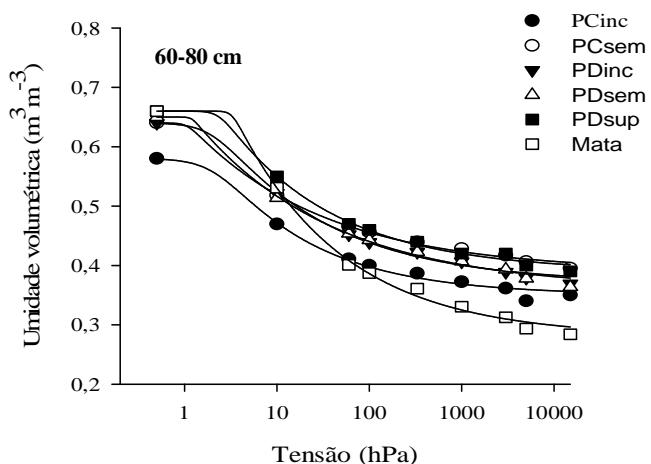


Parâmetros da equação de Van Genuchten		
Contrastes	α	n
PCsem x Mata	ns	*
PDsem x Mata	ns	*
PCs x PDs	ns	ns
PCsem x PCinc	ns	ns
PDsem x PDinc e PDsup	*	ns
PDinc x PDsup	*	**

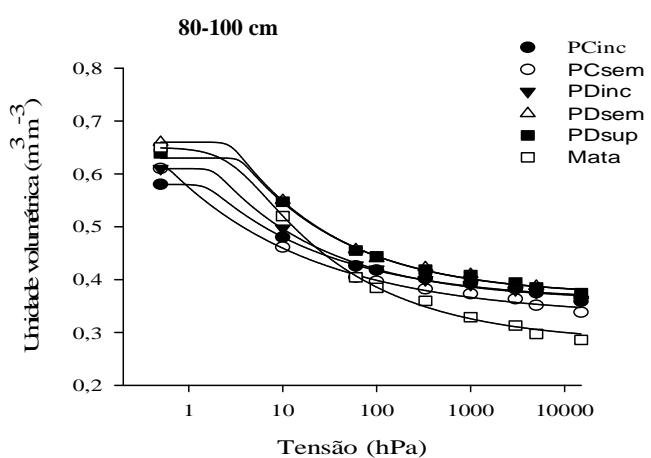
Continuação...



Contrastes	Parâmetros da equação de Van Genuchten	
	α	n
PCsem x Mata	ns	*
PDsem x Mata	ns	**
PCs x PDs	ns	ns
PCsem x PCinc	ns	ns
PDsem x PDinc e PDsup	*	ns
PDinc x PDsup	*	**



Contrastes	Parâmetros da equação de Van Genuchten	
	α	n
PCsem x Mata	ns	ns
PDsem x Mata	ns	*
PCs x PDs	ns	ns
PCsem x PCinc	ns	ns
PDsem x PDinc e PDsup	ns	ns
PDinc x PDsup	ns	**



Contrastes	Parâmetros da equação de Van Genuchten	
	α	n
PCsem x Mata	*	*
PDsem x Mata	ns	ns
PCs x PDs	*	*
PCsem x PCinc	ns	ns
PDsem x PDinc e PDsup	ns	ns
PDinc x PDsup	**	**

5.3.8 Índice S

Com exceção da primeira camada (0-2,5 cm), visualmente o índice S foi maior na mata (média de 0,078) em relação aos sistemas de manejo do solo até 100 cm (média 0,055) (Tabela 8). Com o aumento da profundidade houve pequena redução do índice S em todos os sistemas de uso e manejo do solo, provavelmente pelo peso das camadas superiores, o que promove acomodação estrutural, tornando mais compacta essas camadas.

Independentemente da camada e do sistema de uso e manejo do solo utilizado, o índice S foi superior a 0,035 (Tabela 8), portanto superior ao considerado restritivo conforme Dexter (2004). Segundo Dexter (2004), $S < 0,035$ indica inadequada distribuição do tamanho dos poros do solo (macro/microporos), ou seja solos com qualidade estrutural “pobre”. Porém, esse valor por ser arbitrário pode ser inadequado para nosso uso, uma vez que, aquele trabalho foi desenvolvido em solos de clima temperado, baseado em observações sobre teores críticos de matéria orgânica. Assim, a sua comparação com solos de clima tropical fica limitada devido a grande variação entre as características edafoclimáticas dessas regiões.

Beutler et al. (2008) verificaram que num Latossolo Vermelho o índice S limitante à produtividade da soja e milho foi de 0,056 a 0,062, respectivamente. Ao verificar a adequação do índice S no diagnóstico da qualidade estrutural de um Latossolo Vermelho sob cultivo intensivo, Silva et al. (2012) constataram que o índice S foi superior a 0,045. Segundo estudo realizado por Andrade & Stone (2009) em solos das regiões Centro-Oeste, Norte e Nordeste do Brasil, o índice S limite foi de 0,045, sendo este mais adequado à divisão entre solo de boa qualidade estrutural e solo com tendências a se tornar degradado.

Para efeitos de comparação com o atual trabalho, o índice $S=0,045$ é aparentemente mais apropriado para qualificar os solos, principalmente pelo fato de ter sido realizado em solos tropicais. Todavia, como não há nenhum fator físico restringindo de forma importante o desenvolvimento do sistema radicular das culturas no solo, mesmo após 31 anos do uso do solo com PD e PC, fica difícil avaliar se o índice S de 0,045 ou menor, seria limitante para esse Latossolo. Logo, faz-se necessário o desenvolvimento de novas pesquisas referentes ao assunto, principalmente para a região sul do Brasil.

Tabela 8 - Parâmetros do ajuste da curva de retenção de água no solo à equação de Van Genuchten e Índice “S” nos sistemas de uso e manejo nas diferentes camadas.

Tratamento	Camadas (cm)	Parâmetros da equação de Van Genuchten						Índice S
		a⁽¹⁾	n⁽¹⁾	m⁽¹⁾	θ_s⁽²⁾	θ_r⁽³⁾	m³ m⁻³	
PCinc	0-2,5	0,126	1,414	0,293	0,69	0,26	0,091	
PCsem	0-2,5	0,129	1,419	0,295	0,68	0,27	0,085	
PDinc	0-2,5	0,109	1,360	0,265	0,69	0,28	0,077	
PDsem	0-2,5	0,095	1,380	0,275	0,70	0,28	0,083	
PDsup	0-2,5	0,062	1,331	0,248	0,69	0,30	0,069	
Mata	0-2,5	0,296	1,406	0,289	0,69	0,28	0,085	
PCinc	2,5-5	0,119	1,406	0,289	0,67	0,29	0,077	
PCsem	2,5-5	0,127	1,371	0,271	0,66	0,31	0,071	
PDinc	2,5-5	0,076	1,388	0,279	0,66	0,28	0,075	
PDsem	2,5-5	0,078	1,341	0,254	0,65	0,32	0,060	
PDsup	2,5-5	0,062	1,389	0,280	0,68	0,33	0,069	
Mata	2,5-5	0,231	1,433	0,302	0,68	0,28	0,086	
PCinc	5-10	0,120	1,424	0,298	0,64	0,31	0,072	
PCsem	5-10	0,153	1,383	0,277	0,63	0,28	0,069	
PDinc	5-10	0,121	1,380	0,275	0,67	0,32	0,068	
PDsem	5-10	0,108	1,362	0,266	0,64	0,33	0,057	
PDsup	5-10	0,079	1,352	0,260	0,65	0,33	0,059	
Mata	5-10	0,255	1,394	0,283	0,72	0,30	0,084	
PCinc	10-20	0,212	1,259	0,206	0,64	0,33	0,052	
PCsem	10-20	0,129	1,388	0,279	0,65	0,33	0,063	
PDinc	10-20	0,090	1,382	0,276	0,64	0,32	0,063	
PDsem	10-20	0,149	1,306	0,235	0,62	0,33	0,047	
PDsup	10-20	0,085	1,328	0,247	0,61	0,31	0,052	
Mata	10-20	0,159	1,370	0,270	0,68	0,30	0,070	
PCinc	20-40	0,305	1,305	0,233	0,65	0,39	0,044	
PCsem	20-40	0,129	1,346	0,257	0,64	0,37	0,051	
PDinc	20-40	0,148	1,313	0,239	0,67	0,37	0,050	
PDsem	20-40	0,248	1,300	0,231	0,65	0,38	0,045	
PDsup	20-40	0,068	1,370	0,270	0,66	0,37	0,056	
Mata	20-40	0,185	1,442	0,307	0,69	0,28	0,089	
PCinc	40-60	0,751	1,370	0,270	0,66	0,35	0,060	
PCsem	40-60	0,356	1,371	0,271	0,62	0,38	0,046	
PDinc	40-60	0,388	1,364	0,267	0,68	0,37	0,060	
PDsem	40-60	0,341	1,299	0,230	0,64	0,33	0,051	
PDsup	40-60	0,223	1,342	0,255	0,64	0,36	0,041	
Mata	40-60	0,320	1,372	0,271	0,65	0,29	0,069	
PCinc	60-80	0,560	1,341	0,254	0,58	0,34	0,044	
PCsem	60-80	0,810	1,328	0,247	0,64	0,39	0,043	
PDinc	60-80	0,457	1,364	0,267	0,64	0,37	0,052	
PDsem	60-80	0,709	1,311	0,237	0,65	0,36	0,048	
PDsup	60-80	0,252	1,366	0,268	0,66	0,39	0,052	
Mata	60-80	0,223	1,411	0,291	0,66	0,28	0,077	
PCinc	80-100	0,594	1,332	0,249	0,58	0,36	0,039	
PCsem	80-100	0,120	1,323	0,244	0,61	0,34	0,048	
PDinc	80-100	0,487	1,382	0,276	0,61	0,36	0,049	
PDsem	80-100	0,419	1,348	0,258	0,62	0,38	0,044	
PDsup	80-100	0,129	1,446	0,308	0,66	0,37	0,061	
Mata	80-100	0,250	1,406	0,289	0,65	0,29	0,074	

⁽¹⁾ Parâmetros empíricos da equação de Van Genuchten; ⁽²⁾ Conteúdo de água na condição de solo saturado. ⁽³⁾ Conteúdo de água do solo na tensão de 1.500 kPa (PMP).

5.3.9 Capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e água disponível (AD)

A CC variou entre 0,38 a 0,50 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$. A mata teve menor conteúdo de água na CC comparativamente ao PDsem até 100 cm de profundidade, e em relação ao PCsem nas camadas de 2,5-5, 20-40, 40-60 e 60-80 cm (Tabela 10).

Os sistemas conservacionistas tiveram maior conteúdo de água na CC nas camadas de 0-10, 40-60 e 60-80 cm em relação aos sistemas convencionais. Nas camadas superficiais, o maior conteúdo de água na CC nos sistemas conservacionistas se deve aos poros de menor diâmetro e ao maior teor de matéria orgânica, a qual atua tanto no aumento da retenção de água, quanto na melhoria das condições físicas do solo, especialmente na sua estrutura (CARPENDO & MIELNICZUK, 1990). Nas camadas mais profundas as diferenças entre os PCs e PDs estão mais relacionadas à variabilidade espacial do solo e menos aos efeitos do manejo.

O conteúdo de água no PMP variou de 0,26 a 0,40 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ entre as camadas e sistemas de uso e manejo do solo (Tabela 10). A mata teve menor conteúdo de água no PMP em relação ao PDsem nas de 2,5-5, 5-10, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm. Em relação ao PCsem, a mata teve menor conteúdo de água no PMP apenas nas camadas mais profundas, 20 a 100 cm (Tabela 10). Entre os sistemas de manejo só foi observada diferença nas camadas de 5-10 e 80-100 cm. Na tensão que é determinado o PMP (15000 hPa) a textura e a composição mineralógica do solo possuem maior efeito na retenção de água do que as condições estruturais do solo, motivo esse que refletiu na ausência de diferenças entre os sistemas convencionais e conservacionistas nas demais camadas.

A quantidade de água disponível (AD) para as plantas, considerada a umidade na CC e PMP, variou de 0,06 a 0,19 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ entre os sistemas e camadas (Tabela 10). A mata teve menor conteúdo de AD em relação aos sistemas de manejo (PCsem e PDsem) até 5 cm de profundidade, possivelmente pelo grande acúmulo de material orgânico com baixo grau de decomposição e, com isso, elevada macroporosidade, a qual favorece a drenagem de água na capacidade de campo. Nas camadas mais profundas a mata teve maior AD comparada aos os sistemas de manejo.

Os sistemas conservacionistas tiveram maior conteúdo de AD (média 0,18 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) em relação aos sistemas convencionais (média 0,14 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) até a profundidade de 20 cm. Essa diferença representa um aumento de 28% na AD, fator que pode influenciar o rendimento das culturas agrícolas. No PD o aumento da disponibilidade de água no solo é explicado por

alguns autores (CENTURION & DEMATTÉ, 1985; SALTON & MIELNICZUK, 1995) como resultado da melhoria da estrutura dos solos, como aumento da microporosidade do solo, que por sua vez é influenciada pelo aumento da matéria orgânica, principalmente nas camadas mais superficiais do solo. Além disso, solos com maior teor de matéria orgânica têm mais AD do que aqueles com menor teor de matéria orgânica (GROHMANN & MEDINA, 1962). Isso foi confirmado nesse estudo, uma vez que, o aumento da AD acompanhou o aumento da microporosidade ($r=0,45^*$) e da matéria orgânica ($r = 0,54^*$) (Anexo E). Ao estimar a retenção e a disponibilidade de água em solos de Santa Catarina, Costa (2012) constatou maior conteúdo de água disponível em solos com textura franca e com maior teor de MO.

Tabela 9 - Capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e água disponível (AD) nas camadas de 0-2,5, 2,5-5, 5-10, 10-20, 20-40 40-60, 80-100 cm, em diferentes sistemas de uso e manejo de um Latossolo Bruno, Guarapuava, PR.

Camadas (cm)	CC ($\text{m}^{-3}\text{m}^{-3}$)					
	Mata ⁽¹⁾	PCinc	PCsem	PDinc	PDsem	PDsup
0-2,5	0,38	0,40	0,41	0,47	0,46	0,48
2,5-5	0,40	0,42	0,45	0,45	0,49	0,47
5-10	0,43	0,42	0,40	0,46	0,47	0,46
10-20	0,41	0,44	0,44	0,45	0,46	0,45
20-40	0,40	0,48	0,48	0,50	0,48	0,49
40-60	0,39	0,41	0,45	0,45	0,44	0,45
60-80	0,39	0,40	0,46	0,44	0,44	0,46
80-100	0,38	0,42	0,40	0,42	0,45	0,44
PMP ($\text{m}^{-3}\text{m}^{-3}$)						
0-2,5	0,28	0,26	0,27	0,28	0,28	0,30
2,5-5	0,28	0,29	0,31	0,28	0,32	0,33
5-10	0,30	0,31	0,28	0,32	0,33	0,33
10-20	0,30	0,33	0,33	0,32	0,33	0,31
20-40	0,28	0,39	0,37	0,37	0,38	0,37
40-60	0,29	0,35	0,38	0,37	0,33	0,40
60-80	0,28	0,34	0,39	0,37	0,36	0,39
80-100	0,29	0,36	0,34	0,36	0,38	0,37
AD ($\text{m}^{-3}\text{m}^{-3}$)						
0-2,5	0,10	0,15	0,14	0,19	0,18	0,18
2,5-5	0,11	0,13	0,14	0,17	0,17	0,14
5-10	0,13	0,11	0,12	0,14	0,14	0,13
10-20	0,11	0,11	0,11	0,13	0,13	0,13
20-40	0,11	0,10	0,12	0,13	0,10	0,12
40-60	0,10	0,06	0,06	0,09	0,11	0,09
60-80	0,10	0,06	0,06	0,07	0,08	0,07
80-100	0,10	0,06	0,06	0,06	0,07	0,07

⁽¹⁾ Sistemas de uso e manejo do solo: Preparo convencional com calcário incorporado (PCinc); Preparo convencional sem calcário (PCsem); Plantio direto com calcário incorporado (PDinc); Plantio direto sem calcário (PDsem); Plantio direto com calcário superficial (PDsup) e Mata

As diferenças existentes nos conteúdos de água na CC, PMP e AD nos sistemas que receberam ou não calcário, bem como o modo de aplicação, parecem estar mais relacionadas à alteração na estrutura, decorrente à mobilização do solo para a incorporação do corretivo, do que às mudanças eletroquímicas no solo provocadas pelo calcário.

Tabela 10 - Contrastes das combinações entre sistemas de uso e manejo do solo para a capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e água disponível (AD).

Contrastes	Camadas (cm)							
	0-2,5	2,5-5	5-10	10-20	20-40	40-60	60-80	80-100
CC (Pr > F)								
PCsem x Mata	ns	**	ns	ns	**	**	**	ns
PDsem x Mata	**	**	**	**	**	**	**	**
PCs x PDs	**	**	**	ns	ns	**	ns	*
PCsem x PCinc	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns
PDsem x PDinc e PDsup	ns	*	*	ns	ns	ns	ns	ns
PDinc x PDsup	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
PMP (Pr > F)								
PCsem x Mata	ns	Ns	ns	ns	**	**	**	**
PDsemx Mata	ns	*	*	ns	**	**	**	**
PCs x PDs	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns	*
PCsem x PCinc	ns	ns	ns	ns	ns	*	**	ns
PDsem x PDinc e PDsup	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns
PDinc x PDsup	ns	**	ns	ns	ns	**	ns	ns
AD (Pr > F)								
PCsem x Mata	**	**	ns	ns	ns	**	**	**
PDsem x Mata	**	**	ns	ns	ns	ns	ns	**
PCs x PDs	**	**	**	**	ns	**	ns	ns
PCsemx PCinc	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
PDsem x PDinc e PDsup	ns	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns
PDinc x PDsup	ns	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns

ns: não significativo; * significativo a 5% de probabilidade; ** significativo a 1% de probabilidade

5.3.10 Condutividade hidráulica saturada e não saturada

A condutividade hidráulica saturada foi superior na mata em relação aos sistemas de manejo na camada arável (Tabela 12), corroborando com os resultados observados por Assis & Lanças (2005) num Nitossolo e por Albuquerque et al. (1995) num Nitossolo Bruno. A menor densidade do solo da mata em relação a esses sistemas, a continuidade dos poros formados com o crescimento e a decomposição das raízes nos solos da mata são responsáveis por esse comportamento.

Entre os sistemas convencionais e conservacionistas não houve diferenças na condutividade saturada, com exceção da camada de 60-80 cm. Em relação ao modo de aplicação e presença ou ausência do calcário, as diferenças foram observadas apenas nas

camadas mais profundas, nas quais a alta variabilidade do solo é a principal responsável por essas diferenças. Entretanto, segundo Costa et al. (2003), a alta variabilidade dos dados de condutividade hidráulica saturada, muitas vezes, não possibilita a diferenciação estatística entre tratamentos.

Tabela 11 - Condutividade hidráulica saturada (K_s) nas camadas de 0-2,5; 2,5-5, 5-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm num Latossolo Bruno, Guarapuava, PR.

Profundidade (cm)	Mata⁽¹⁾	PCinc	PCsem	PDin	PDsem	PDsup
	(mm h ⁻¹)					
0-2,5	517	206	133	97	171	124
2,5-5	453	191	99	73	70	133
5-10	429	198	162	129	83	129
10-20	292	91	63	153	74	70
20-40	382	204	214	112	160	143
40-60	183	607	327	515	224	194
60-80	415	354	443	400	557	506
80-100	303	567	610	775	994	263

Tabela 12 - Contrastess das combinações entre sistemas de uso e manejo, para a condutividade hidráulica saturada num Latossolo Bruno, Guarapuava, PR.

Contrastes	Camadas (cm)							
	0-2,5	2,5-5	5-10	10-20	20-40	40-60	60-80	80-100
	(Pr > F)							
PCsem x Mata	**	**	**	*	ns	ns	ns	**
PDsem x Mata	**	**	**	*	*	ns	ns	**
PCs x PDs	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns
PCsem x PCinc	ns	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns
PDsem x PDinc e PDsup	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**
PDinc x PDsup	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**

ns: não significativo; * significativo a 5% de probabilidade; ** significativo a 1% de probabilidade

Visualmente, a mata teve menor Kr em todas as sucções entre 10 e 15.000 hPa, em relação aos sistemas convencionais e conservacionistas até 10 cm de profundidade (Tabela 13). Entre os sistemas de manejo do solo houve pequena diferença entre os parâmetros “n” e “m” obtidos no ajuste da curva de retenção de água no solo (Tabela 8). Com isso, a Kr estimada com os parâmetros obtidos no ajuste da curva de retenção, foi aparentemente semelhante entre os sistemas de manejo (Tabela 13), mas na média, os sistemas convencionais tiveram menor Kr em relação aos conservacionistas em todas as sucções e camadas avaliadas. Como a Kr expressa a capacidade que o solo tem em fornecer água e nutrientes ao sistemas radicular das plantas através do seu fluxo de água (KLEIN, 2008), a maior Kr nos sistemas conservacionistas pode influenciar no crescimento e

desenvolvimento das culturas e consequentemente na maior produtividade em relação aos sistemas convencionais.

Segundo Klein & Libardi (2002) o movimento da água no solo não saturado é afetado principalmente pelo aumento da densidade, mais especificamente pela alteração na distribuição do diâmetro dos poros. Uma vez preenchidos com água numa mesma tensão há o aumento da área útil (secção de poros preenchidos com água) e consequentemente há o aumento do fluxo de água. Todavia, as medidas reais da Kr são difíceis de serem obtidas, principalmente devido a grande variabilidade no campo (VAN GENUCHTEN, 1980).

Tabela 13 - Condutividade hidráulica relativa estimada pelo modelo de VAN GENUCHTEN (1980) até 100 cm de profundidade para os diferentes sistemas de uso e manejo num Latossolo Bruno, Guarapuava, PR.

Tratamento	Camadas (cm)	Condutividade hidráulica não saturada, log (Kr)						
		10*	60	100	300	1000	3000	5000
PCin	0-2,5	-1,7	-3,8	-4,4	-6,0	-7,4	-8,9	-9,6
PCsem	0-2,5	-1,7	-3,8	-4,5	-6,0	-7,5	-8,9	-9,6
PDin	0-2,5	-1,7	-3,6	-4,2	-5,7	-7,1	-8,4	-9,1
PDsem	0-2,5	-1,5	-3,4	-4,0	-5,5	-7,0	-8,4	-9,0
PDsup	0-2,5	-1,3	-2,9	-3,5	-4,9	-6,3	-7,6	-8,3
Mata	0-2,5	-2,6	-4,9	-5,5	-7,1	-8,5	-10,0	-10,6
PCin	2,5-5	-1,7	-3,7	-4,3	-5,9	-7,3	-8,8	-9,4
PCsem	2,5-5	-1,8	-3,8	-4,4	-5,9	-7,3	-8,7	-9,3
PDin	2,5-5	-1,3	-3,1	-3,7	-5,2	-6,6	-8,0	-8,7
PDsem	2,5-5	-1,4	-3,2	-3,8	-5,2	-6,6	-7,9	-8,6
PDsup	2,5-5	-1,2	-2,9	-3,5	-5,0	-6,4	-7,9	-8,5
Mata	2,5-5	-2,3	-4,6	-5,3	-6,8	-8,3	-9,8	-10,5
PCin	5-10	-1,7	-3,7	-4,4	-5,9	-7,4	-8,9	-9,6
PCsem	5-10	-1,9	-4,0	-4,6	-6,2	-7,6	-9,0	-9,6
PDin	5-10	-1,7	-3,7	-4,3	-5,8	-7,3	-8,7	-9,3
PDsem	5-10	-1,7	-3,6	-4,2	-5,7	-7,1	-8,4	-9,1
PDsup	5-10	-1,4	-3,2	-3,8	-5,2	-6,6	-8,0	-8,6
Mata	5-10	-2,5	-4,6	-5,3	-6,8	-8,3	-9,7	-10,4
PCin	10-20	-2,4	-4,3	-4,9	-6,3	-7,5	-8,8	-9,4
PCsem	10-20	-1,8	-3,8	-4,4	-5,9	-7,4	-8,8	-9,5
PDin	10-20	-1,5	-3,3	-4,0	-5,5	-6,9	-8,3	-9,0
PDsem	10-20	-2,0	-3,9	-4,5	-5,9	-7,3	-8,6	-9,2
PDsup	10-20	-1,5	-3,3	-3,9	-5,3	-6,7	-8,0	-8,6
Mata	10-20	-2,0	-4,0	-4,7	-6,2	-7,6	-9,0	-9,6
PCin	20-40	-2,7	-4,8	-5,4	-6,8	-8,1	-9,4	-10,1
PCsem	20-40	-1,8	-3,8	-4,4	-5,9	-7,2	-8,6	-9,2
PDin	20-40	-2,0	-3,9	-4,5	-5,9	-7,3	-8,6	-9,2
PDsem	20-40	-2,5	-4,5	-5,1	-6,5	-7,9	-9,2	-9,8
PDsup	20-40	-1,3	-3,0	-3,6	-5,1	-6,5	-7,9	-8,5
Mata	20-40	-2,1	-4,3	-5,0	-6,6	-8,1	-9,5	-10,2
PCin	40-60	-3,7	-6,0	-6,6	-8,1	-9,6	-10,9	-11,6
PCsem	40-60	-2,8	-5,0	-5,7	-7,2	-8,6	-10,0	-10,6
PDin	40-60	-3,0	-5,1	-5,8	-7,3	-8,7	-10,1	-10,7
PDsem	40-60	-2,8	-4,9	-5,5	-6,9	-8,2	-9,5	-10,2
PDsup	40-60	-2,4	-4,4	-5,0	-6,5	-7,9	-9,3	-9,9
Mata	40-60	-2,7	-4,9	-5,6	-7,1	-8,5	-9,9	-10,5
PCin	60-80	-3,4	-5,5	-6,2	-7,7	-9,0	-10,4	-11,0
PCsem	60-80	-3,8	-6,0	-6,6	-8,1	-9,4	-10,8	-11,4
PDin	60-80	-3,1	-5,3	-6,0	-7,5	-8,9	-10,3	-10,9
PDsem	60-80	-3,7	-5,8	-6,4	-7,8	-9,2	-10,5	-11,1
PDsup	60-80	-2,5	-4,6	-5,2	-6,7	-8,1	-9,5	-10,2
Mata	60-80	-2,3	-4,5	-5,2	-6,7	-8,2	-9,6	-10,3
PCin	80-100	-3,5	-5,6	-6,2	-7,7	-9,1	-10,4	-11,0
PCsem	80-100	-4,3	-6,4	-7,1	-8,5	-9,9	-11,2	-11,8
PDin	80-100	-3,2	-5,5	-6,1	-7,6	-9,1	-10,5	-11,1
PDsem	80-100	-3,0	-5,2	-5,8	-7,3	-8,7	-10,1	-10,7
PDsup	80-100	-1,7	-3,8	-4,5	-6,1	-7,6	-9,1	-9,8
Mata	80-100	-2,4	-4,6	-5,3	-6,9	-8,3	-9,8	-10,4

* succção em hPa

5.4 CONCLUSÕES

A adoção do sistema de preparo convencional por longos períodos, altera a estrutura do Latossolo Bruno, observado principalmente pelo aumento da densidade em subsuperfície e diminuição da estabilidade de agregados (DMG) quando comparados com a mata e o sistema de plantio.

O sistema de plantio direto utilizado por longos períodos, melhora a estrutura do Latossolo Bruno para um patamar igual ao dos solos sem intervenções antrópicas, indicado pelo aumento da estabilidade de agregados (DMG) principalmente na camada de 0-10 cm. Neste sistema, a maior RP em relação ao sistema de preparo convencional não indica compactação do solo, uma vez que não foi observado aumento da densidade nesse sistema.

O uso conservacionista do solo, ao longo do tempo, aumenta a microporosidade, a umidade volumétrica, a retenção de água e consequentemente aumenta a água disponível às plantas.

As alterações nos atributos físicos e hídricos devido à aplicação do calcário, estão mais relacionadas à alteração na estrutura, decorrente da mobilização do solo para a incorporação do corretivo, do que às características eletroquímicas do calcário.

5 CAPÍTULO II - SISTEMAS DE MANEJO EM LATOSOLO BRUNO: ATRIBUTOS QUÍMICOS E PRODUTIVIDADE DAS CULTURAS

RESUMO

A adoção de sistemas de manejo, como preparo convencional e plantio direto, produzem mudanças graduais nos atributos físicos, químicos e biológicos do solo ao longo do tempo. Experimentos de longa duração podem informar sobre a evolução desses atributos, principalmente os químicos, e suas consequências na produtividade das culturas. O objetivo deste estudo foi avaliar os atributos químicos e a produtividade de culturas agrícolas em sistemas de manejo e de correção da acidez do solo, após trinta e um anos de sua implantação. O experimento foi conduzido na Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária, em Guarapuava, PR. Os sistemas de manejo do solo são: plantio direto (sem calcário, com calcário aplicado em superfície e com calcário incorporado); preparo convencional (sem calcário e com calcário incorporado); e mata nativa para efeito de comparação. As amostras foram coletadas nas profundidades de 0-2,5; 2,5-5; 5-10; 10-20 e 20-40 cm e avaliadas quanto às características químicas do solo. Nos sistemas que receberam calcário o pH foi mais elevado. No plantio direto com calcário aplicado na superfície o pH na camada superficial foi maior e em subsuperfície foi semelhante ao plantio direto com calcário incorporado. Teve os menores teores de H+Al, evidenciando dessa forma a eficiência da calagem superficial na correção da acidez do solo no plantio direto. A aplicação de calcário tanto nos sistemas conservacionistas como nos convencionais diminuíram os teores de H+Al e foram suficientes para manter o Al trocável abaixo de 1,0 cmol_c kg⁻¹. Os sistemas conservacionistas melhoraram os atributos químicos do solo, em relação sistema convencional, demonstrado pelo maior teor de cátions trocáveis, P extraível, CTC e carbono orgânico, principalmente na camada de 0 a 5 cm. Apesar dos sistemas conservacionistas possuírem altos teores de carbono orgânico, estes permaneceram abaixo dos teores de carbono orgânico da mata. Todavia, o estoque de carbono do sistema conservacionista foi igual ao da mata. A melhoria nos atributos químicos do solo contribuiu para o maior rendimento das culturas no sistema conservacionista em relação ao convencional ao longo dos 31 anos de experimento. A produtividade das culturas no plantio direto com calcário superficial ou incorporado foi semelhante.

Palavras chave: Plantio direto. Preparo convencional. Calagem.

5.1 INTRODUÇÃO

Os diferentes manejos alteram os atributos químicos e a disponibilidade de nutrientes no solo. As modificações nos atributos químicos sob plantio direto em comparação com o preparo convencional apresentam variações associadas à classe de solo, ao sistema de manejo das culturas e dos fertilizantes (CAVALIERI et al., 2004) os quais afetam diretamente a fertilidade e refletem na produtividade das culturas. Segundo Ciotta et al. (2003) a disponibilidade de nutrientes às plantas e consequentemente a produtividade, dependem do manejo do solo e das fertilizações anteriores e/ou aplicadas no momento da implantação das culturas.

O uso intensivo e inadequado dos solos diminui o teor de matéria orgânica, fonte importante da fertilidade dos solos (LOURENTE et al., 2010). A incorporação de fertilizantes e corretivos através do revolvimento do solo aumenta a taxa de decomposição da matéria orgânica. Em contrapartida, o plantio direto melhora a qualidade química em razão do aumento da matéria orgânica e da disponibilidade de nutrientes às plantas, principalmente na camada superficial (CIOTTA et al., 2003; CAVALIERI et al., 2004). Segundo Bayer et al. (2009) as alterações na química dos solos cultivados com plantio direto em longo período, são relacionadas principalmente ao acúmulo de matéria orgânica no solo. A menor adsorção de fósforo em formas indisponíveis, a diminuição da toxidez do alumínio, através da sua complexação e o aumento da capacidade de troca de cátions (CTC) são alguns dos fatores alterados pelo aumento da matéria orgânica (BAYER et al., 2009).

Os resíduos vegetais mantidos na superfície do solo além de manter a umidade do solo (CAMPOS et al. 1994; VEIGA, 2005), atuam como reservatório de nutrientes, pois são liberados gradualmente para o solo pela ação de microrganismos. O alto aporte de resíduos vegetais e a sua manutenção na superfície do solo no plantio direto favorece a ciclagem de N e P, comparativamente ao preparo convencional. A mineralização da matéria orgânica libera N, P e outros nutrientes às plantas, constituindo assim, fonte importante nos sistemas de cultivo (CANTARELLA, 2007). Por apresentar alta quantidade de N na fitomassa, as leguminosas são importantes fontes de N às plantas, a partir da sua mineralização, a qual depende da relação C/N dos resíduos. Resíduos de leguminosas apresentam relação C/N baixa (<20), enquanto que as gramíneas apresentam relação C/N alta (>30), as quais durante a decomposição dos seus resíduos determinam a predominância do processo de mineralização e de imobilização respectivamente (BAYER et al., 2009).

Diferentemente do N e do P, o teor de K na matéria orgânica é baixo, uma vez que não faz parte de nenhuma fração orgânica, pois não integra nenhum composto orgânico estável (ERNANI, 2008). No entanto a sua dinâmica é influenciada pela CTC e por sua ciclagem, via culturas comerciais e/ou cobertura do solo. A criação de cargas, seja pelo aumento da CTC promovido pela matéria orgânica ou pela elevação do pH do solo através da calagem, aumenta a sua adsorção e consequentemente diminui sua lixiviação (ANGHINONI, 2009).

No entanto, é importante considerar que, além da classe do solo, dos sistemas de manejo adotado e das doses de fertilizantes e corretivos aplicadas, a magnitude das alterações na química dos solos também é dependente do tempo. Logo, estudos relacionando às alterações químicas em diferentes sistemas de manejo conduzidos em longo prazo são necessários, uma vez que, indicadores da qualidade química do solo, acompanhados ao longo do tempo através da análise do solo, são importantes instrumentos para se inferir se a maneira como o solo está sendo manejado está adequada, bem como predizer à produtividade das culturas.

O objetivo deste estudo foi avaliar os atributos químicos e a produtividade de culturas agrícolas em sistemas de manejo e de correção da acidez do solo, após trinta e um anos de sua implantação.

5.2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento está localizado no Campo Experimental da Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária – FAPA, da Cooperativa Agrária Mista Entre Rios Ltda., em Guarapuava, Paraná. O solo da área experimental é um Latossolo Bruno Alumínico típico (EMBRAPA, 2006). Foram analisados cinco sistemas de manejo do solo além de uma mata nativa, como segue:

- 1) Preparo convencional no inverno e no verão, com calcário incorporado (**PCinc**);
- 2) Preparo convencional no inverno e no verão, sem calcário (**PCsem**);
- 3) Plantio direto no inverno e verão, com calcário incorporado (**PDinc**);
- 4) Plantio direto no inverno e verão, sem calcário (**PDsem**);
- 5) Plantio direto no inverno e verão, com calcário superficial (**PDsup**);
- 6) Mata.

Detalhes do experimento estão apresentados no Capítulo I.

5.2.1 Coleta das amostras e determinações de laboratório

As amostras de solo para determinações químicas foram coletadas em maio de 2009, após a colheita da soja, nas seguintes camadas: 0-2,5; 2,5-5; 5-10; 10-20; 20-40 cm, em seguida as amostras foram secas em estufa a 60°C, moídas e peneiradas em malha de 2,0 mm. Foram determinados e/ou calculados os seguintes atributos: pH em água realizado na relação 1:1 com leitura em potenciômetro; K⁺ trocável e P extraível determinados pelo método do extrator duplo ácido (Mehlich⁻¹) com solução ácida de HCl 0,05 mol L⁻¹ e H₂SO₄ 0,0125 mol L⁻¹, sendo o K⁺ quantificado por fotometria de chama e o P com leitura da absorbância em espectrofotômetro UV-VIS com comprimento de onda ajustado para 660 nm; Ca²⁺, Mg²⁺ e Al³⁺ trocáveis foram extraídos com solução salina neutra de KCl 1 mol L⁻¹, sendo Ca²⁺ e Mg²⁺ determinados por espectrofotometria de absorção atômica e o Al³⁺ quantificado por titulometria ácido-base com NaOH 0,0125 mol L⁻¹ (TEDESCO et al., 1995). A acidez potencial não trocável foi extraída com solução de Ca (CH₃COO)₂ 0,5 mol L⁻¹ tamponada a pH 7,0 e quantificada por titulometria ácido-base com NaOH 0,0125 mol L⁻¹ (EMBRAPA, 1997). O carbono orgânico foi determinado pelo método de Walkley & Black modificado por Tedesco et al. (1995), por oxidação com K₂Cr₂O₇ 1,25 mol L⁻¹ em meio ácido de H₂SO₄ concentrado e titulação com FeSO₄ 0,25 mol L⁻¹. Os estoques de carbono do solo foram calculados em massa equivalente, segundo procedimento descrito por ELLERT & BETTANY (1995), utilizando-se a mata nativa como referência. A CTC efetiva (CTCefetiva) foi calculada.

5.2.2 Análise estatística

A análise foi realizada através do programa de análises SAS 9.2 (SAS INSTITUTE INC., 2010). Os resultados foram submetidos ao teste F para análise de variância, utilizando um modelo misto. Consideraram-se os diferentes sistemas de manejo como um fator de efeito fixo e a profundidade como uma medida repetida no tempo. As médias foram comparadas por camadas através de contrastes segundo descrito abaixo:

1. Preparo Convencional sem calcário *versus* Mata (**PCsem x Mata**);
2. Plantio Direto sem calcário *versus* Mata (**PDsem x Mata**);
3. Preparo Convencional sem calcário e com calcário incorporado *versus* Plantio Direto sem calcário, calcário incorporado e com calcário superficial (**PCs x PDs**);

4. Preparo Convencional sem calcário *versus* Preparo Convencional com calcário (**PCsem x PCinc**);
5. Plantio Direto sem calcário *versus* Plantio Direto com calcário incorporado e calcário superficial (**PDsem x PDinc e PDsup**);
6. Plantio Direto com calcário incorporado *versus* Plantio Direto com calcário superficial (**PDinc x PDsup**).

A diferença entre médias de produtividade foi avaliada através de contrastes ortogonais explicitados a seguir:

1. Preparo convencional sem calcário e com calcário incorporado *versus* Plantio Direto sem calcário, calcário incorporado e com calcário superficial (**PCs x PDs**);
2. Preparo Convencional sem calcário *versus* Preparo Convencional com calcário incorporado (**PCsem x PCinc**);
3. Plantio Direto sem calcário *versus* Plantio Direto com calcário incorporado e calcário superficial (**PDsem x PDinc e PDsup**);
4. Plantio Direto com calcário incorporado *versus* Plantio Direto com calcário superficial (**PDinc x PDsup**).

5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.3.1 Componentes da acidez do solo: pH, Al e H+Al.

A mata teve o menor pH em água. Diferiu do sistema PCsem na camada de 0-10 cm e de 20-40 cm e do PDsem na camada de 20-40 cm (Tabela 15). O menor pH da mata pode estar relacionado, provavelmente, ao maior aporte de resíduos orgânicos, os quais geram ácidos orgânicos durante a decomposição, bem como devido à mobilização anual do solo com arações e gradagens nos sistemas de manejo, com isso maior quantidade de solo atua no tamponamento da acidez, diminuindo a formação da frente de acidificação.

Ao avaliar conjuntamente os sistemas convencionais e os conservacionistas, houve diferença apenas na primeira camada avaliada (0-2,5 cm), tendo os sistemas conservacionistas, na média, o maior pH. Devido à incorporação do calcário, o PCinc teve o maior pH em todas as camadas avaliadas comparativamente ao PCsem. Entre os sistemas conservacionistas, a ausência da calagem no PDsem fez com que este tivesse menor pH em

relação ao PDinc e PDsup até 40 cm de profundidade. É importante considerar que a última aplicação de calcário foi realizada em 2007, portanto dois anos antes desta avaliação.

Na mata e nos sistemas com incorporação de calcário, o pH do solo foi praticamente homogêneo em profundidade, enquanto que no PDsup, devido à aplicação superficial, houve decréscimo do pH a partir da superfície ao longo do perfil. Porém, o pH do PDsup não diferiu do PDinc na camada de 5 a 40 cm.

Tabela 14 - pH em água e teores de Al e H+Al, nas camadas de 0-2,5; 2,5-5; 5-10; 10-20 e 20-40 cm, em diferentes sistemas de uso e manejo de um Latossolo Bruno, Guarapuava, PR.

Camadas (cm)	Mata ⁽¹⁾	PCinc	PCsem	PDinc	PDsem	PDsup
	pH					
0-2,5	4,2	5,4	4,8	5,4	4,5	6,5
2,5-5	4,2	5,4	4,6	5,1	4,2	6,1
5-10	4,3	5,4	4,7	5,4	4,3	5,3
10-20	4,5	5,4	4,6	5,3	4,6	5,1
20-40	4,4	5,3	4,9	5,3	4,9	5,3
Al (cmol _c kg ⁻¹)						
0-2,5	2,8	0,1	1,7	0,2	1,3	0,1
2,5-5	3,3	0,2	1,8	0,5	2,6	0,1
5-10	3,2	0,2	1,6	0,3	2,1	0,3
10-20	3,1	0,2	2,0	0,4	2,0	0,7
20-40	2,9	0,4	1,0	0,4	1,6	0,6
H+Al (cmol _c kg ⁻¹)						
0-2,5	19	10	13	10	14	4
2,5-5	17	10	12	12	16	6
5-10	16	9	12	11	16	11
10-20	12	9	12	11	13	12
20-40	12	9	11	10	10	11

⁽¹⁾ Sistemas de manejo: Preparo convencional com calcário incorporado (PCinc); Preparo convencional sem calcário (PCsem); Plantio direto com calcário incorporado (PDinc); Plantio direto sem calcário (PDsem); Plantio direto com calcário superficial (PDsup) e Mata.

O efeito da calagem superficial, em profundidade do solo em plantio direto, ao longo do tempo, tem sido atribuído à alguns mecanismos, os quais podem atuar isoladamente ou em conjunto: formação e migração de $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ e $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$, sendo importante a presença de ácidos orgânicos; deslocamento de partículas finas de calcário nos canais formados por raízes mortas e insetos, mantidos intactos ou pela porosidade continua no perfil do plantio direto; adição de fertilizantes nitrogenados, com a redução da acidez na rizosfera pela absorção de nitrato e exudação de OH^- e HCO_3^- pelas raízes e pela produção contínua de ácidos orgânicos hidrossolúveis (de baixo peso molecular); os resíduos vegetais complexam os cátions divalentes (cálcio e magnésio) e formam pares iônicos, facilitando a mobilidade do complexo até a camada subsuperficial, onde os cátions divalentes são deslocados pelo alumínio trocável,

formando complexos mais estáveis com o alumínio, diminuindo a toxidez às raízes (BAYER et al., 2009).

Tabela 15 - Contrastess das combinações entre sistemas de uso e manejo de um Latossolo Bruno, para o pH em água, Al e H+Al.

Contrastes	Camadas (cm)				
	pH(Pr > F)				
	0-2,5	2,5-5	5-10	10-20	20-40
PCsem x Mata	**	**	**	ns	**
PDsem x Mata	ns	ns	ns	ns	**
PCs x PDs	**	ns	ns	ns	ns
PCsem x PCinc	**	**	**	**	**
PDsem x PDinc e PDsup	**	**	**	**	**
PDinc x PDsup	**	**	ns	ns	ns
Al(Pr > F)					
PCsem x Mata	**	**	**	*	**
PDsem x Mata	*	ns	*	*	**
PCs x PDs	ns	ns	ns	ns	ns
PCsem x PCinc	**	**	**	**	**
PDsem x PDinc e PDsup	**	**	**	**	**
PDinc x PDsup	ns	ns	ns	ns	ns
H+Al(Pr > F)					
PCsem x Mata	**	**	**	*	ns
PDsem x Mata	**	**	**	ns	ns
PCs x PDs	ns	ns	ns	ns	ns
PCsem x PCinc	**	**	**	**	ns
PDsem x PDinc e PDsup	**	**	**	**	ns
PDinc x PDsup	**	**	ns	ns	ns

ns: não significativo; * significativo a 5% de probabilidade; ** significativo a 1% de probabilidade

A mata teve maior teor de Al e H+Al em relação aos sistemas de manejo. Todavia, não houve diferença entre os sistemas convencionais e entre os conservacionistas (PCs x PDs), em todas as camadas avaliadas (Tabela 15). O maior teor de Al no PCsem (média 1,6 cmol_c kg⁻¹) em relação ao PCinc (0,2 cmol_c kg⁻¹) até 40 cm, é reflexo do longo período (1978 a 2009) em que o solo vem sendo cultivado sem calagem.

A ausência de calagem no PDsem refletiu em maior teor de Al no solo comparativamente ao PDinc e ao PDsup até 20 cm de profundidade. A neutralização do Al até a camada de 20 cm no PDsup evidencia a eficiência da correção da acidez do solo no plantio direto. Porém, prática da calagem excessiva deve ser evitada, uma vez que, o excesso de calcário na superfície do solo pode ocasionar redução na absorção de zinco e de manganês, em decorrência do aumento do pH nas camadas superficiais do solo (CAIRES & FONSECA, 2000).

Destaca-se ainda que a aplicação de calcário, tanto nos sistemas conservacionistas como nos convencionais diminui os teores de H+Al, e foi suficiente para manter o Al trocável abaixo de 1,0 cmol_c kg⁻¹, até a profundidade de 40 cm, nos três sistemas calcariados (Tabela 14).

5.3.2 Bases trocáveis: Ca, Mg e K; P extraível e CTC efetiva.

A mata teve maior teor de Ca em relação ao PCsem e PDsem nas camadas mais superficiais (0-2,5 e 2,5-5 cm) (Tabela 17). O menor teor de Ca no PCsem e no PDsem em relação à mata é explicado principalmente pela sua extração através das plantas na forma de grãos durante todo o período em que o solo não recebeu corretivos, apenas fertilizantes.

Os sistemas conservacionistas tiveram os maiores teores de Ca até os 10 cm de profundidade comparativamente aos sistemas convencionais. O mesmo foi observado por Eltz et al. (1989) após 7 anos da implantação e por Ciotta et al. (2002) aos 21 anos da implantação deste mesmo experimento. O acúmulo das bases trocáveis na camada superficial do solo nos sistemas conservacionistas ocorre em função da menor taxa de decomposição (AMADO & MIELNICZUK, 2000) que lhe confere o aumento da CTC. Além disso, a aplicação de fertilizantes sobre o solo, basicamente potássicos e fosfatos solúveis, aumenta as bases trocáveis como o Ca, devido à presença deste na sua composição (CIOTTA et al., 2002).

A aplicação de calcário tanto nos sistemas convencionais como nos conservacionistas, fez aumentar o teor de Ca até 40 cm de profundidade. Logo, os teores de Ca nos sistemas de manejo passaram para o nível médio, enquanto nos sistemas que não receberam calcário (PCsem e PDsem) os teores de Ca foram baixos (CQFS-RS/SC, 2004).

O PDsup teve maior teor de Ca em relação ao PDinc principalmente nas camadas superficiais (0-2,5 cm e 2,5-5 cm). Nessas camadas os teores de Ca no PDsup são considerados altos (CQFS-RS/SC, 2004), ou seja maiores que 4 cmol_c kg⁻¹. Caires & Fonseca (2000) também observaram aumentos dos teores de Ca principalmente nas camadas superficiais (0-5 e 5-10 cm) com aplicação superficial de calcário num Latossolo Vermelho de textura média. Kaminski et al. (2005) relata que a eficiência da calagem superficial tem relação direta com a dose aplicada, sendo que a aplicação da maior dose (17 t ha⁻¹) num Argissolo Acinzentado de textura média, foi a mais eficiente em aumentar os teores de Ca (média de 9 cmol_c kg⁻¹) até a camada de 10 cm, diminuindo com a redução da dose e com o aumento da profundidade.

Efeitos semelhantes ao Ca foram observados para o Mg, mas com magnitudes menores. A mata teve maior teor de Mg em relação ao PCsem apenas na camada de 0-2,5 cm, mas não diferiu do sistema PDsem (Tabela 17).

O teor de Mg foi maior nos sistemas conservacionistas em relação aos convencionais na camada de 0 a 5 cm. A calagem nos sistemas conservacionistas aumentou o teor de Mg no PDinc e no PDsup em relação ao PDsem. Quanto ao modo de aplicação do calcário no sistema conservacionista, observou-se maior teor de Mg no PDsup (média 4,6 cmol_c kg⁻¹) em relação ao PDinc (média 1,2 cmol_c kg⁻¹) principalmente nas primeiras camadas (0-2,5 e 2,5-5 cm). No PDsup e no PDinc os teores de Mg são superiores ao nível considerado crítico pela CQFS-RS/SC (2004).

A maior capacidade de troca de cátions (CTC) no sistema PDsup (Tabela 16) e a não incorporação do calcário favorecem a adsorção dos cátions mais próximos da superfície, principalmente os poucos móveis. Considerando que tanto o Ca como o Mg são elementos com capacidade de manterem-se adsorvidos no solo e pouco exportados pelas culturas, fica justificado porque os solos calcariados superficialmente submetidos a cultivos ao longo dos anos tendem a apresentar altos teores de Ca e Mg (CERETTA, 2009).

Em função da ausência de fertilização a mata teve o menor teor de K comparado ao PCsem e ao PDsem até 10 cm (Tabela 17). No solo cultivado o teor de K foi maior no sistema conservacionista em relação ao convencional até 5 cm de profundidade. Maiores teores de K no PD em comparação ao PC, nas camadas mais superficiais, também foram observados por Costa et al. (2009); Ciotta et al. (2002); Maria & Castro (1993). Os autores elucidam esta diferença pelo gradiente de concentração formado no PD na camada superficial, em relação ao PC. Segundo Hernani et al. (1999) as perdas de K em sistemas que revolvem periodicamente o solo estão associadas principalmente à erosão hídrica, diferentemente do plantio direto, onde a erosão é significativamente menor. A manutenção de maior cobertura morta no plantio direto favorece essa redução. Com o tempo, os resíduos vegetais existentes na superfície do solo, elevam os teores de matéria orgânica o que, aliado à melhor fertilidade, pode aumentar a capacidade de retenção e manutenção do K no sistema solo-planta.

No sistema convencional, a aplicação ou não do calcário não alterou o teor de K até 40 cm de profundidade. Já no sistema conservacionista, a aplicação de calcário teve maior teor de K apenas na camada de 2,5 a 5 cm em relação a ausência de calcário. O modo de aplicação do calcário (incorporado ou superficial) não afetou os teores de K no sistema conservacionista.

Tabela 16 - Teores de Ca, Mg, K, P e CTC efetiva , nas camadas de 0-2,5; 2,5-5, 5-10, 10-20, 20-40 cm, em diferentes sistemas de uso e manejo de um Latossolo Bruno, Guarapuava, PR.

Camada (cm)	Mata ⁽¹⁾	PCinc	PCsem	PDinc	PDsem	PDsup
Ca (cmol _c kg ⁻¹)						
0-2,5	3,5	2,8	1,0	3,8	2,5	8,0
2,5-5	2,1	2,8	0,9	2,6	1,0	7,5
5-10	0,7	2,9	1,0	3,3	1,0	3,7
10-20	0,4	2,8	0,7	3,2	0,6	2,2
20-40	0,1	1,9	1,0	1,4	0,6	1,9
Mg (cmol _c kg ⁻¹)						
0-2,5	0,9	1,2	0,2	1,5	0,5	4,9
2,5-5	0,7	1,1	0,2	1,0	0,1	4,3
5-10	0,3	1,3	0,1	1,3	0,2	1,6
10-20	0,2	1,2	0,1	1,5	0,1	0,7
20-40	0,1	0,7	0,2	0,4	0,1	0,4
K (cmol _c kg ⁻¹)						
0-2,5	0,7	1,7	1,5	2,4	2,1	2,2
2,5-5	0,5	1,1	0,9	1,9	0,9	1,6
5-10	0,3	0,9	0,8	1,0	0,7	0,8
10-20	0,4	0,7	0,8	0,8	0,6	0,7
20-40	0,2	0,5	0,7	0,5	0,5	0,7
P (mg kg ⁻¹)						
0-2,5	8	8	7	12	23	13
2,5-5	5	6	7	12	26	13
5-10	3	5	8	9	12	13
10-20	2	6	6	7	14	8
20-40	2	5	2	4	1	3
CTCefetiva (cmol _c kg ⁻¹)						
0-2,5	7,0	6,0	4,5	8,2	6,6	15,4
2,5-5	6,2	5,3	4,0	6,1	4,9	13,5
5-10	4,8	5,5	3,8	6,1	4,2	6,6
10-20	4,3	5,1	3,7	6,0	3,5	4,4
20-40	3,4	3,8	3,1	2,9	3,1	3,8

⁽¹⁾ Sistemas de manejo: Preparo convencional com calcário incorporado (PCinc); Preparo convencional sem calcário (PCsem); Plantio direto com calcário incorporado (PDinc); Plantio direto sem calcário (PDsem); Plantio direto com calcário superficial (PDsup) e Mata.

Vale ressaltar que, em todos os tratamentos houve queda nos teores de K com a profundidade (Tabela 16), comportamento semelhante ao observado por Ciotta et al. (2002; 2004) nesse mesmo experimento, após 21 anos de condução. Com exceção da última camada da mata, em todos os sistemas e profundidades, o teor de K foi superior ao nível considerado crítico pela CQFS-RS/SC (2004). Isso tem a ver com a presença de K na composição da fração argila na maioria dos solos da região de Guarapuava-PR, e ao fato de que em grande parte das culturas apenas 20% da quantidade de K absorvida ser exportado nos grãos, o que mostra que, dentre os macronutrientes primários, o K é o que proporciona maior ciclagem no sistema (CERETTA, 2009).

Tabela 17 - Contrastos das combinações entre sistemas de uso e manejo de um Latossolo Bruno, para cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K) e fósforo (P).

Contrastes	Camadas (cm)				
	0-2,5	2,5-5	5-10	10-20	20-40
Ca (Pr > F)					
PCsem x Mata	**	**	ns	ns	ns
PDsem x Mata	**	**	ns	ns	ns
PCs x PDs	**	**	*	ns	ns
PCsem x PCinc	**	**	**	**	*
PDsem x PDinc e PDsup	**	**	**	**	**
PDinc x PDsup	**	**	ns	*	ns
Mg (Pr > F)					
PCsem x Mata	*	ns	ns	ns	ns
PDsemx Mata	ns	ns	ns	ns	ns
PCs x PDs	**	**	ns	ns	ns
PCsem x PCinc	**	**	**	**	ns
PDsem x PDinc e PDsup	**	**	**	**	ns
PDinc x PDsup	**	**	ns	**	ns
K (Pr > F)					
PCsem x Mata	**	*	*	ns	*
PDsem x Mata	**	*	*	ns	*
PCs x PDs	**	**	ns	ns	ns
PCsem x PCinc	ns	ns	ns	ns	ns
PDsem x PDinc e PDsup	ns	**	ns	ns	ns
PDinc x PDsup	ns	ns	ns	ns	ns
P (Pr > F)					
PCsem x Mata	ns	ns	**	ns	ns
PDsem x Mata	**	**	**	**	ns
PCs x PDs	**	**	*	*	ns
PCinc x PCsem	ns	ns	*	ns	ns
PDsem x PDinc e PDsup	**	**	ns	**	ns
PDinc x PDsup	ns	ns	ns	ns	ns

ns: não significativo; * significativo a 5% de probabilidade; ** significativo a 1% de probabilidade

Comparativamente à mata, o teor de P no PCsem foi maior na camada de 5 a 10 cm e no PDsem até 20 cm de profundidade (Tabela 17).

Analizando conjuntamente os PDs e os PCs, observa-se que os PDs possuem maiores teores de P até 20 cm de profundidade. Maior teor de P no PD em relação ao PC também foi observado por Maria & Castro (1993) após 7 anos de uso do solo com PD, e por Ciotta et al. (2002) após 21 anos sob sistemas de manejo direto. Segundo Dick (1983) em áreas sob longo período em PD, a adição periódica de fertilizantes fosfatados, associada ao maior teor de matéria orgânica, a qual se relaciona diretamente à atividade microbiana na camada superficial do solo, aumenta o teor deste elemento na camada superficial, assim como pode favorecer a sua descida pelo movimento de compostos orgânicos de P no perfil do solo. Além disso, a mobilização periódica do solo no PC uniformiza os nutrientes no perfil, e aumenta o

contato do P com a fração mineral e, assim, sua fixação, resultando em menor disponibilidade (ALBUQUERQUE et al., 2005; BAYER, et al., 2009).

O fato desse Latossolo Bruno ser argiloso e com mineralogia predominantemente caulinítica e gibbsítica, atribui grande importância à ciclagem de P através dos resíduos culturais. O P acumulado no tecido vegetal é liberado lentamente para o solo, tendo as plantas maior possibilidade de absorção devido ao menor tempo de contato com as partículas de solo, logo menor é a quantidade de P que poderá ficar fixado às partículas coloidais do solo (CERETTA, 2009).

A aplicação de calcário não alterou o teor de P no PC e não aumentou o teor de P nas camadas mais superficiais no PD (Tabela 17). Segundo Ernani et al. (2000) a presença de Al no solo inibe o crescimento das raízes com reflexos negativos na absorção de água e de alguns nutrientes, especialmente do P. Sendo assim, a adição de grandes quantidades de fertilizantes fosfatados torna a absorção de P menos dependente da existência de um amplo sistema radicular e com isto diminui a resposta das culturas à calagem.

Na última camada (20-40 cm) do sistema conservacionista o teor de P foi considerado como “baixo”, nas camadas superficiais foi considerado como “muito alto”, e nas camadas subsuperficiais como “alto”, conforme CQFS-RS/SC (2004). Todavia, na mata e no sistema convencional o teor de P foi superior ao nível considerado crítico pela CQFS-RS/SC (2004) apenas nas camadas mais superficiais.

5.3.3 Carbono orgânico e estoques de carbono

A mata teve o maior teor de carbono orgânico até 10 cm de profundidade em relação ao PCsem e até 5 cm em relação ao PDsem. O sistema conservacionista teve maiores teores de carbono orgânico nos primeiros 10 cm de profundidade comparativamente ao sistema convencional (Tabela 19). Os maiores teores de carbono orgânico no sistema conservacionista e na mata em relação aos preparamos convencionais, como podem ser visualizados na Figura 12, se deve à maior proteção da matéria orgânica no interior de agregados (BAYER et al., 2004), ao maior aporte de fitomassa na superfície e ao menor revolvimento do solo devido à redução no uso de implementos agrícolas para o preparo do solo (LEITE et al., 2010). Por outro lado a mobilização do solo aumenta a aeração, a temperatura, a atividade biológica, e consequentemente a taxa de decomposição da matéria orgânica (BAYER & MIELNICZUK, 1997). Resultado semelhante foi obtido por Tormena et al. (2004) num Latossolo Vermelho cultivado durante dez anos. Após nove anos sob diferentes sistemas de manejo num

Cambissolo Húmico, BAYER et al. (2003) observaram maior teor de carbono orgânico nas camadas superficiais no plantio direto comparativamente ao preparo reduzido e ao preparo convencional.

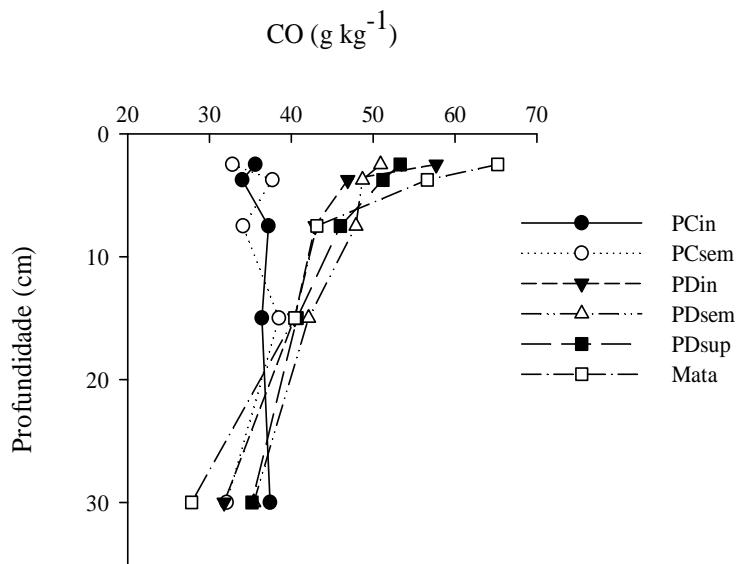
A aplicação ou não do calcário, bem como o modo de aplicação de calcário não alterou o teor de carbono orgânico nos sistemas de manejo do solo (Tabela 19). Tal fato também foi observado por Ciotta et al. (2004) nesse mesmo experimento aos 21 anos de condução. Seria esperado maior teor de carbono orgânico nos tratamentos com calcário, pois são sistemas que aumentam a produção de C fotossintetizado e de resíduos orgânicos. Entretanto isso foi contrabalanceado pelo aumento da atividade microbiana e da decomposição da matéria orgânica do solo, conforme relatado por Albuquerque et al. (2003).

Nos sistemas conservacionistas os teores de carbono orgânico diminuíram gradativamente a partir da superfície, o que não ocorreu no preparo convencional, onde houve uma distribuição uniforme dos teores de carbono orgânico no perfil, resultado do revolvimento periódico do solo (Figura 12).

O estoque de carbono da mata foi maior em relação ao solo sob PCsem apenas na primeira camada avaliada. Todavia, não houve diferença entre os estoques de carbono da mata e do PDsem até a camada 4 (Tabela 19). Esse resultado indica que, mesmo após 31 anos de cultivo, os sistemas de manejo não diminuíram drasticamente os estoques de carbono do solo.

O sistema conservacionista teve maior estoque de carbono apenas na camada mais superficial do solo em relação ao sistema convencional (Tabela 19). Assim, observa-se que houve recuperação do estoque de C, uma vez que, antes da implantação do experimento, a área era cultivada sob PC durante muitos anos.

Figura 12 - Carbono orgânico no solo nos sistemas de uso e manejo e profundidades.



Maiores estoques de estoque de carbono no PDsem e do PCsem em comparação à mata foram também observados na última camada do solo (Tabela 19). O acúmulo de carbono em camadas mais profundas pode ser decorrente de percolação da matéria orgânica dissolvida dos horizontes superficiais. Segundo Bayer et al. (2004) a migração de carbono no perfil pode ser um importante mecanismo principalmente em Latossolos, como o do atual estudo. Por serem solos profundos e possuírem boa estrutura física, esses solos quando manejados com PD por longos períodos formam bioporos contínuos e preservados ao longo do perfil, o que associado à elevada precipitação, como por exemplo a do sul do Brasil (>1.500 mm/ano), favorecem a migração do carbono orgânico para camadas mais profundas.

Além disso, acúmulo de carbono em camadas mais profundas também pode ser devido ao aporte de carbono pelo sistema radicular (SANDERMAN et al., 2008). Em trabalho recente realizado num Cambissolo da Suécia, Kätterer et al. (2011) verificaram que o carbono derivado das raízes de culturas, como aveia, trigo e milho, foi cerca de 2,3 maior do que o derivado de resíduos na superfície do solo.

Tabela 18 - Estoques de carbono orgânico (ECO) calculados em massa equivalente de solo em diferentes sistemas de uso e manejo num Latossolo Bruno, Guarapuava, PR. A mata foi usada como referência.

Sistemas	Massa equivalente de solo		
	Camada⁽¹⁾	massa solo⁽²⁾	ECO
	cm	t ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹
PCinc	0-1,8	166	5,9
	1,8-3,9	215	7,3
	3,9-8,0	404	15,0
	8,0-16,1	852	31,1
	16,1-33,9	1662	61,8
	0-33,9		121,1
PCsem	0-1,6	166	5,5
	1,6-3,7	215	8,1
	3,7-7,6	404	13,8
	7,6-15,1	852	32,7
	15,1-32,1	1662	53,1
	0-32,1		113,2
PDinc	0-1,7	166	8,7
	1,7-3,9	215	10,1
	3,9-8,1	404	17,4
	8,1-16,9	852	34,2
	16,9-34,4	1662	52,8
	0-34,4		123,2
PDsem	0-1,9	166	8,5
	1,9-4,1	215	10,5
	4,1-8,1	404	19,3
	8,1-16,4	852	36,0
	16,4-33,6	1662	58,2
	0-33,6		132,5
PDsup	0-1,9	166	9,4
	1,9-4,3	215	11,0
	4,1-8,2	404	18,6
	8,2-16,5	852	34,8
	16,5-34,4	1662	58,5
	0-34,4		132,3
Mata	0-2,5	166	10,8
	2,5-5	215	11,2
	5-10	404	17,4
	10-20	852	33,9
	20-40	1662	46,0
	0-40		119,3

⁽¹⁾ Limites teóricos de cada camada que contém a mesma massa de solo da mata nativa (referência). ⁽²⁾ Massa de solo da mata nativa (referência), calculados de acordo com os valores de densidade apresentados no anexo C.

Tabela 19 - Contrastos das combinações entre sistemas de uso e manejo de um Latossolo Bruno, para carbono orgânico do solo (CO) e estoques de carbono orgânico do solo (ECO)

Contrastes	Camadas (cm)				
	0-2,5	2,5-5	5-10	10-20	20-40
CO (Pr > F)					
PCsem x Mata	**	*	**	ns	ns
PDsem x Mata	**	**	ns	ns	*
PCs x PDs	**	**	**	ns	ns
PCsem x PCinc	ns	ns	ns	ns	ns
PDsem x PDinc e PDsup	ns	ns	ns	ns	ns
PDinc x PDsup	ns	ns	ns	ns	ns
Camadas (cm)					
	1 ⁽¹⁾	2 ⁽²⁾	3 ⁽³⁾	4 ⁽⁴⁾	5 ⁽⁵⁾
Contrastes	ECO (Pr > F)				
PCsem x Mata	*	ns	ns	ns	**
PDsem x Mata	ns	ns	ns	ns	*
PCs x PDs	*	ns	ns	ns	ns
PCsem x PCinc	ns	ns	ns	ns	*
PDsem x PDinc e PDsup	ns	ns	ns	ns	ns
PDinc x PDsup	ns	ns	ns	ns	ns

⁽¹⁾corresponde as camadas de 0-1,8; 0-1,6; 0-1,7; 0-1,9; 0-1,9 e 0-2,5 cm respectivamente do PCinc, PCsem, PDinc, PDsem, PDsup e mata. ⁽²⁾corresponde as camadas de 1,8-3,9; 1,6-3,7; 1,7-3,9; 1,9-

4,1; 4,1-8,2 e 2,5-5 cm respectivamente do PCinc, PCsem, PDinc, PDsem, PDsup e mata. ⁽³⁾corresponde as camadas de 3,9-8,0; 3,7-7,6; 3,9-8,1; 4,1-8,1; 4,1-8,2 e 5-10 cm respectivamente do PCinc, PCsem, PDinc, PDsem, PDsup e mata. ⁽⁴⁾corresponde as camadas de 8,0-16,1; 7,6-15,1; 8,1-

16,9; 8,1-16,4; 8,2-16,5 e 10-20 cm respectivamente do PCinc, PCsem, PDinc, PDsem, PDsup e mata. ⁽⁵⁾corresponde as camadas de 16,1-33,9; 15,1-32,1; 16,9-34,4; 16,4-33,6; 16,5-34,4 e 20-40 cm respectivamente do PCinc, PCsem, PDinc, PDsem, PDsup e mata.

ns: não significativo; * significativo a 5% de probabilidade; ** significativo a 1% de probabilidade.

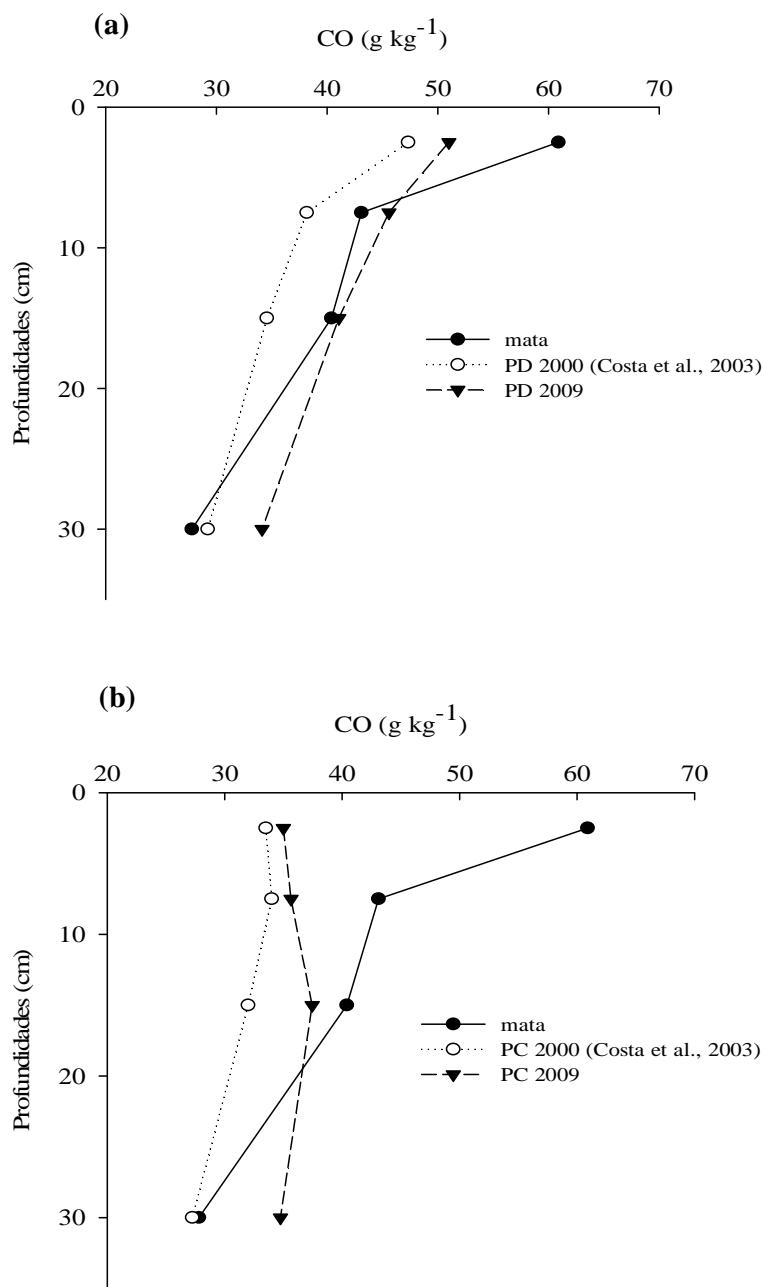
Quando somados os estoques de carbono ao longo do perfil avaliado, o sistema conservacionista teve maior acúmulo de carbono (média 129 Mg ha⁻¹) em comparação ao convencional (média 117 Mg ha⁻¹) (Tabela 18). O sistema conservacionista teve um incremento de carbono de 12 Mg ha⁻¹ no perfil em comparação ao convencional, sendo que o maior incremento foi na camada superficial e o menor na última camada avaliada. Segundo De Bona et al. (2006) o acúmulo de carbono no solo nas camadas mais superficiais é preferível pois grande parte do sistema radicular localizam-se nessas camadas.

5.3.3.1. Variação temporal do carbono

O teor de carbono no PD determinado em 2009 foi visualmente maior comparativamente ao determinado por Costa et al. (2003) no ano de 2000 (Figura 13a) até 30 cm de profundidade, porém manteve-se abaixo do teor da mata na camada superficial. Na média de todas as camadas o teor de carbono do PD aumentou aproximadamente 15% entre os anos. Esse aumento está associado principalmente ao emprego de sistemas planejados de

rotação de culturas que aportam grande quantidade de resíduos da parte aérea e de raízes ao solo ao longo tempo. Segundo Bayer et al. (2009) uma adequada rotação de culturas contribui substancialmente para o aumento do teor de matéria orgânica no solo. Reinert et al. (1990) também verificaram no solo sob plantio direto que o teor de carbono orgânico passou de 0,55% para 1,08%, num período de um ano e meio.

Figura 13 - Teor de carbono orgânico determinado em 2000 (Costa et al., 2003) e 2009 em área sob plantio direto (PD) (a), preparo convencional (PC) (b) e mata nativa num Latossolo Bruno, Guarapuava, PR.



Ao longo de nove anos o teor de carbono aumentou aproximadamente 12% no PC na média de todas as camadas avaliadas (Figura 13b). A adoção de práticas de manejo eficientes, como fertilizações adequadas, diversidade de espécies de cobertura associada a sistemas de rotação de culturas com alto aporte de fitomassa aérea e radicular, são alguns dos fatores que propiciaram o aumento do teor de carbono no PC.

5.3.4 Produtividade de grãos das culturas

Na safra 2009/2010 com soja, e na safra de 2010/2011 com milho, as maiores produtividades foram observadas no sistema conservacionista. Já na safra de 2011/2012 com a cultura da soja a produtividade não diferiu entre os sistemas de manejo (Tabela 20).

Na safra de 2009/2010 a produtividade média da soja no PD foi 2.985 kg ha^{-1} e no PC de 2.099 kg ha^{-1} . Na safra de 2010/2011 a produtividade média do milho no PD foi de $10.293 \text{ kg ha}^{-1}$ e no PC de 9.171 kg ha^{-1} . Esses resultados corroboram com Pereira et al. (2009) que obtiveram as maiores produtividades de milho no PD em comparação ao PC. O maior rendimento das culturas, principalmente da soja nos sistemas conservacionistas, está relacionado à melhor fertilidade e a maior umidade volumétrica ($r = 0,46^*$) (Anexo E), principalmente nas primeiras camadas do solo.

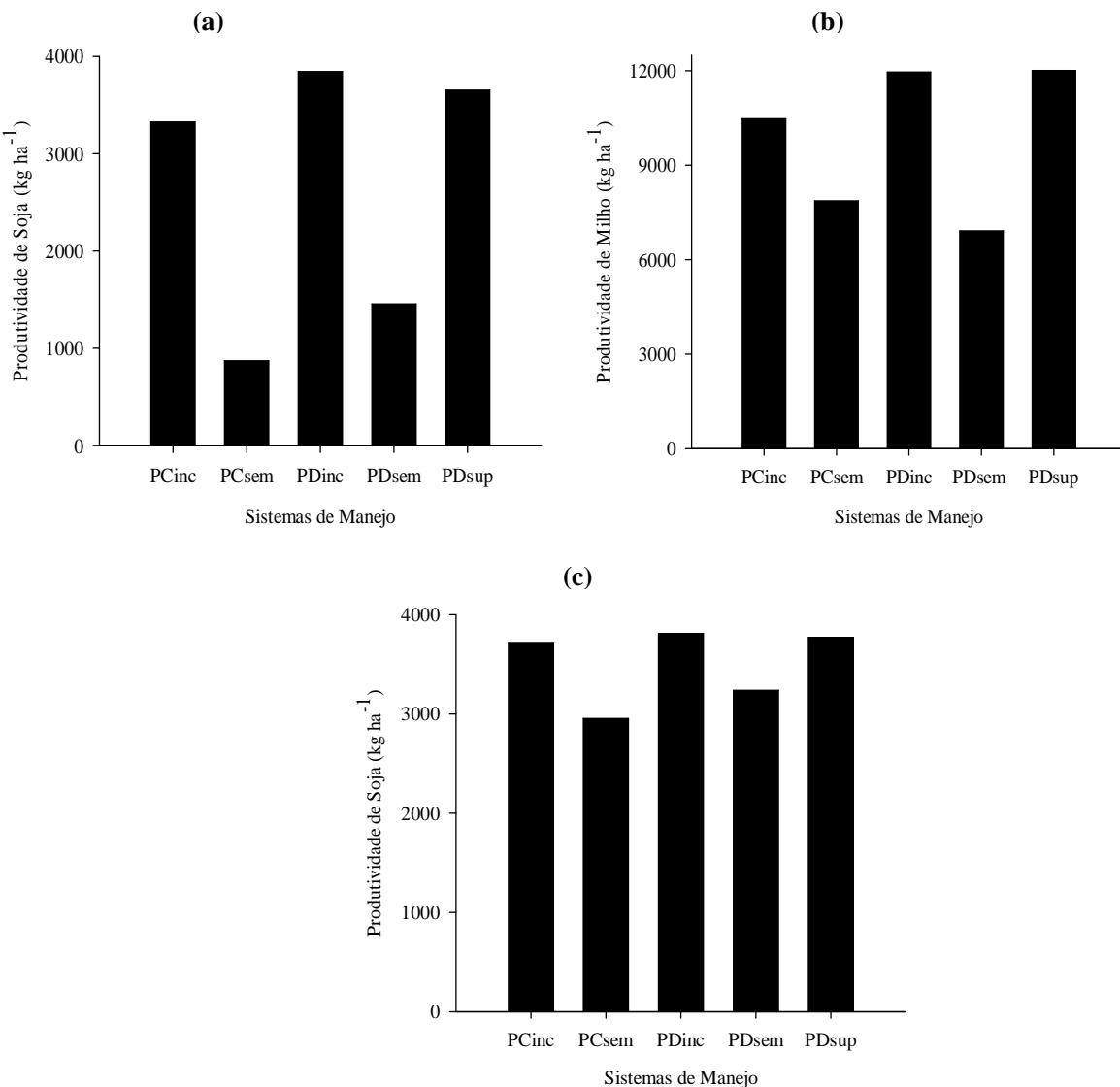
A adição de calcário nos dois sistemas de manejo aumentou a produtividade em todas as safras avaliadas. Por outro lado, no PD o modo de aplicação do calcário (incorporado ou superficial) não modificou a produtividade da soja e do milho.

No período de 1978-2012, foram avaliadas 57 safras, das quais 26 foram de soja, 7 de milho, 10 de trigo, 9 de cevada e 5 de aveia branca. Fontoura & Bayer (2008) avaliaram a média de seis safras de milho e de vinte e três safras de soja, desse mesmo experimento, e constataram que o rendimento, tanto do milho como o da soja, foi maior no sistema sob PD do que em PC. Esses autores atribuíram os maiores rendimentos no PD principalmente à melhoria dos atributos químicos do solo em relação ao PC.

Além disso, as características intrínsecas do solo podem determinar maior ou menor susceptibilidade do solo às alterações de estrutura, com reflexos na produtividade das culturas. Alguns autores relatam redução da produtividade no PD (ALBUQUERQUE et al., 2001; OLIVEIRA et al., 2001; CARVALHO et al., 2004) em relação ao PC. Segundo esses autores, a redução dos macroporos e da porosidade total e o aumento da densidade do solo e da resistência do solo à penetração podem ter reduzido a produtividade de grão no PD. Porém, em trabalho realizado num Latossolo conduzido há 21 anos com diferentes sistemas de

manejo Costa (2001) verificou que a produtividade das culturas de verão, foi superior no PD comparado ao PC. A maior produtividade no PD foi atribuída à maior retenção de água no solo, a qual foi influenciada pela maior microporosidade e teor de matéria orgânica nesse sistema, notadamente nas camadas superficiais.

Figura 14 - Produtividade da soja (safra 2009/2010) (a), produtividade de milho (safra 2010/2011) (b) e produtividade da soja (safra 2011/2012) (c), num Latossolo Bruno nos diferentes sistemas de manejo.



Todavia, diante dos resultados de produtividade desse Latossolo, não há nenhum fator físico restringindo de forma importante o desenvolvimento do sistema radicular das culturas no solo sob PD, o qual está há 31 anos sem revolvimento. Segundo Jaster et al. (1993) quando os sistemas de PD são bem manejados, a compactação não atinge níveis

prejudiciais às culturas e não reduz a produtividade. Assim, além de promover maior proteção ao solo e conservação do ambiente, o PD geralmente permite maiores e mais estáveis rendimentos das culturas, o que se traduz em maiores lucros (COSTA, 2001).

Tabela 20 - Contrastess das combinações entre sistemas de manejo do solo, para as produtividade da soja (safra 2009/2010), de milho (safra 2010/2011) e de soja (safra 2011/2012), num Latossolo Bruno, Guarapuava, PR.

Contrastes	Soja 2009/2010	Milho 2010/2011	Soja 2011/2012
PCs x PDs	*	**	ns
PCsem x PCinc	**	**	*
PDsem x PDinc e PDsup	**	**	*
PDinc x PDsup	ns	ns	ns

ns: não significativo; * significativo a 5% de probabilidade; ** significativo a 1% de probabilidade

5.2 CONCLUSÕES

A introdução de sistemas conservacionistas em 1978, numa área que estava sendo cultivada sob sistema convencional desde 1950, melhorou os atributos químicos e hídricos do solo, em relação ao sistema convencional, demonstrado pelo maior teor de cátions trocáveis, P extraível, carbono orgânico, CTC e umidade volumétrica, principalmente nas primeiras camadas de solo. Essas alterações juntamente com a maior retenção e disponibilidade de água no solo, resultaram em maior produtividade das culturas.

Apesar dos sistemas conservacionistas possuírem maiores teores de carbono orgânico em relação aos convencionais, estes permaneceram abaixo dos teores de carbono orgânico da mata na camada superficial. Todavia, o estoque de carbono do sistema conservacionista foi igual ao da mata, indicando que houve recuperação do estoque de carbono, uma vez que, antes da implantação do experimento, a área era cultivada sob PC.

A calagem no PC e no PD melhorou a produtividade das culturas, independente da forma de sua aplicação. Assim, em longo prazo o calcário pode ser aplicado na superfície do Latossolo Bruno, para evitar mobilizar o solo para sua incorporação.

6 CAPÍTULO III - GRAU DE COMPACTAÇÃO DE UM LATOSSOLO BRUNO: EFEITOS NA CULTURA DA SOJA

RESUMO

A compactação do solo é um dos principais fatores que alteram a qualidade do solo e o crescimento das culturas. O objetivo principal deste trabalho foi determinar o grau de compactação que restringe o crescimento e o desenvolvimento da cultura da soja num Latossolo Bruno Alumínico típico. O experimento foi realizado em casa de vegetação em vasos, sendo a camada de 10-20 cm compactada para obtenção das densidades do solo: 0,9, 0,96, 1,02, 1,08, 1,14, 1,20 e 1,27 Mg m⁻³, o que corresponde a graus de compactação entre 75 e 105%. Cultivou-se soja para avaliar o crescimento radicular e da parte aérea. Durante a condução do experimento foi determinado a altura das plantas e a evapotranspiração diária de água, e após 60 dias da emergência foi determinada a massa seca da parte aérea e das raízes. Qualquer aumento no grau de compactação acima de 75% reduz o crescimento das raízes na camada compactada, sendo que as raízes não crescem verticalmente quando o grau de compactação é igual ou superior a 105%. Quando o grau de compactação é superior a 82% a altura das plantas diminui e quando é superior a 87% e 93% reduz respectivamente a massa seca da parte aérea e a evapotranspiração. Assim, o grau de compactação restritivo a cultura da soja depende do atributo que está sendo avaliado.

Palavras chave: Densidade do solo. Massa seca das plantas. Desenvolvimento radicular. Evapotranspiração.

6.1 INTRODUÇÃO

A mecanização agrícola facilita o trabalho do homem no campo, embora em alguns sistemas de manejo possa compactar o solo, sendo esta uma das causas da degradação em áreas cultivadas.

A compactação consiste na compressão do solo causada pela aplicação de energia mecânica (HOLTZ & KOVACS, 1981). Em áreas cultivadas a principal energia de compactação é aplicada por máquinas e implementos agrícolas que trafegam sobre o solo (CAMARGO & ALLEONI, 1997), o que diminui o volume de poros do solo.

Por estar diretamente relacionada ao aumento de massa ou redução do espaço poroso, a compactação tem estreita relação com algumas propriedades físicas e mecânicas do solo. Em solos compactados, a densidade do solo é aumentada e a porosidade e a permeabilidade são reduzidas (REICHERT et al., 2007; LOPES et al., 2011). Essas alterações afetam a retenção, o movimento e a disponibilidade de água no solo (REICHERT et al., 2011), com isso, os mecanismos que governam o fluxo de nutrientes no solo e sua absorção pelas plantas são afetados (BARBER, 1995). Diminui também a quantidade de oxigênio disponível na rizosfera e prejudica os processos metabólicos da planta (QUEIROZ-VOLTAN et al., 2000), com consequências na transpiração e acúmulo de massa seca (BERLATO et al., 1986).

Além dessas alterações, a compactação afeta direta e indiretamente o crescimento das raízes, sendo o sistema radicular afetado diretamente pela resistência à penetração. A resistência à penetração crítica ao desenvolvimento de raízes de diversas plantas pode variar entre 1,0 e 4,0 MPa (ARSHAD et al., 1996; ROSOLEM et al., 1999). Contudo, os valores de resistência entre 2 e 2,5 MPa tem sido mais utilizados como limitantes ao desenvolvimento das raízes (TAYLOR et al., 1966). Embora limitante, a maioria das raízes se desenvolve em solos com resistência à penetração acima desses valores devido à capacidade de explorarem zonas de menor resistência como poros entre unidades estruturais (PIKUL et al., 1993). Para tal, as raízes apresentam modificações morfológicas, tais como aumento de diâmetro acima da camada compactada e encurvamento para procurar pontos de menor resistência e ultrapassar a camada compactada (TAVARES FILHO et al., 2001). Além disso, em condições extremas, enviam sinais à parte aérea informando que as condições para o desenvolvimento da planta estão restritas, sendo necessário reduzir a taxa de crescimento, o que diminui a produção (TAYLOR & BRAR, 1991).

Com todas estas alterações, há comprometimento da produtividade das culturas pelo excesso ou pela inadequação de práticas a que o solo é submetido, desde o preparo do solo até a colheita da cultura (CENTURION & DEMATTÉ, 1992).

Porém, a magnitude dos efeitos da compactação é determinada principalmente pela classe textural do solo, pelos sistemas de rotação de culturas utilizados, pelo tempo de uso dos diferentes sistemas de manejo e condição de umidade do solo em que são realizadas as operações de campo (BERTOL et al., 2000; SECCO et al., 2009). Segundo Albuquerque et al. (2001), a textura do solo influencia o processo de compactação, devido à sua estreita relação com tamanho dos poros, retenção de água, densidade do solo e resistência crítica do solo à penetração. Geralmente a compactação é mais prejudicial às culturas em solos de textura argilosa e siltosa (TORRES & SARAIVA, 1999). Além da restrição mecânica, nestes solos é comum a redução do volume de macroporos para níveis críticos, aumento da retenção de água, processos que deixam os solos plásticos por maior período de tempo e suscetíveis a compactação (LOPES et al., 2011). Por outro lado, o maior atrito entre as partículas nos solos de textura arenosa dificulta a movimentação das partículas sólidas para posições de maior proximidade (LIMA et al., 2004), dificultando assim, o processo de compactação do solo. Mesmo em densidades mais elevadas, o volume de macroporos nos solos de textura arenosa é suficiente para que ocorram drenagem e crescimento radicular adequados. Logo, observa-se que a densidade do solo que é crítica ao desenvolvimento das culturas depende fortemente da textura do solo (SUZUKI et al., 2007).

O grau de compactação tem sido utilizado para caracterizar a relação entre compactação e crescimento das culturas (SECCO, et al., 2004; COLLARES et al., 2008). Esta variável é obtida pela divisão da densidade do solo que está sendo cultivado, pela densidade do solo máxima obtida no ensaio de Proctor Normal (VARGAS, 1977; LIPIEC et al., 1991). Esta relação é útil na caracterização da compactação e da resposta das culturas em diferentes tipos de solos principalmente devido à facilidade de medição para indicar mudanças nos atributos físicos como macroporosidade, permeabilidade ao ar e resistência à penetração do solo (CARTER, 1990).

Em trabalho desenvolvido por SUZUKI et al. (2007) observou-se que o grau de compactação ótimo num Latossolo Vermelho para a cultura da soja foi de 86%. Já CARTER (1990) constatou que a máxima produtividade de trigo e cevada se deu no grau de compactação de 81% em solo arenoso de clima temperado. É importante considerar que quando o grau de compactação é menor que 80% pode afetar a produtividade das culturas devido principalmente à redução da capacidade de armazenamento de água no solo.

(LINDSTRON & VOORHEES, 1994). Logo, o efeito da compactação está relacionado com o tipo de solo e planta e principalmente com a umidade do solo.

O objetivo deste trabalho foi determinar o grau de compactação máximo da cultura da soja em um Latossolo Bruno Alumínico típico de textura argilosa, cultivado há 31 anos com plantio direto.

6.2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação. O solo utilizado foi um Latossolo Bruno Alumínico típico de textura argilosa, coletado na camada arável (0–20 cm), na área experimental da Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária – FAPA manejada há 31 anos sob sistema de plantio direto. As principais características desse Latossolo Bruno estão descritas na Tabela 21.

Tabela 21 - Características do Latossolo Bruno na camada de 0 - 0,20 m.

Solo	pH	Al	Ca	Mg	K	P	CO*	Argila	Silte	Areia
			-----cmol _c kg ⁻¹ -----			mg kg ⁻¹		-----g kg ⁻¹ -----		
Latossolo Bruno	4,4	2,0	1,3	0,2	1,1	18,7	47	570	370	60

*Carbono orgânico

O solo foi seco ao ar e passado em peneira com malha de 4,76 mm e homogeneizado. O pH do solo foi elevado para 6,0 com calcário dolomítico (CaO:29%, MgO:19% e PRNT: 90%) conforme recomendação da CQFS- RS/SC (2004) para a soja.

Após 70 dias de incubação do solo corrigido, os vasos foram montados com três anéis de PVC sobrepostos, com diâmetro interno de 100 mm. A altura de cada anel (superior, intermediário e inferior) foi de 100 mm. Os anéis superiores e inferiores foram preenchidos com as porções de amostra do solo com massa determinada, para que apresentassem densidade de 0,9 Mg m⁻³. Para os anéis intermediários as amostras tinham uma massa para resultar em densidade do solo (Mg m⁻³) e num grau de compactação (%) respectivamente de: 0,90 (75); 0,96 (80); 1,02 (85); 1,08 (90); 1,14 (95); 1,20 (100); e 1,27 (105). O grau de compactação foi determinado através da relação entre a densidade do solo atual e a densidade do solo máxima, obtida através do ensaio de Proctor Normal segundo ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) pela norma NBR 7.182 (ABNT, 1986), a qual foi de 1,20 Mg m⁻³ para o Latossolo Bruno. Para compactar o solo, utilizou-se uma prensa hidráulica.

Antes da implantação do experimento, foi determinada a macroporosidade (6 kPa), a capacidade de campo (10 kPa), a porosidade total (diferença de umidade entre o solo saturado e o solo seco) e a porosidade de aeração (diferença entre a porosidade total e capacidade de campo a 80%) de todos os anéis da camada intermediária, conforme EMBRAPA (1997).

No momento da montagem dos vasos, foram sobrepostos os anéis intermediários, previamente compactados, sobre os inferiores e sobre os anéis intermediários acoplaram-se os superiores, que foram preenchidos com amostra de solo até a altura de 90 mm, reservando-se 10 mm para receber a água das irrigações. Para evitar o crescimento de raízes entre a parede do vaso e o solo compactado (anel intermediário), foram coladas fitas entre a parede do vaso (2 cm de fita) e a superfície superior do solo (1 cm de fita). A união e a vedação entre os três anéis foram feitas com fita adesiva. O anel inferior tinha o fundo fechado (“cap”) mas com orifícios para permitir o fluxo de água.

Em cada vaso foram semeadas quatro sementes de soja (*Glycine max*) variedade NS 4823, na profundidade de 5mm. Sete dias após a semeadura realizou-se o desbaste, mantendo-se duas plantas por vaso. Semanalmente fez-se a medição da altura das plantas. A umidade do solo foi controlada através de pesagem dos vasos diariamente e posterior irrigação, a fim de repor a água evapotranspirada, mantendo a umidade do solo a 80 % da capacidade de campo. A água evapotranspirada foi determinada a partir do 45º dia de implantação até o término da condução do mesmo. Após 60 dias da emergência as plantas foram cortadas rente ao solo, para determinação da massa seca em estufa a 60º C por 48 h.

Em seguida, as três camadas foram separadas e na camada intermediária foi determinada a resistência à penetração (seis repetições por amostra) com um penetrógrafo eletrônico de bancada (modelo MA 933, marca Marconi), composto de um atuador linear elétrico com motor, um painel para controle da velocidade, e uma base metálica para sustentação do conjunto mecânico e da amostra durante o ensaio além de uma célula de carga com capacidade nominal de 20 kg, acoplada a um microcomputador. Utilizou-se um cone de 3 mm de diâmetro, o qual foi introduzido nas amostras de solo até a profundidade de 5 cm, com velocidade constante de 10 cm min⁻¹ e leituras a cada 1s. Por conta do efeito de bordadura, descartaram-se os cinco valores iniciais para a determinação da média da resistência do solo à penetração das várias medições realizadas.

Simultaneamente à separação das três camadas, determinou-se a umidade gravimétrica do solo. Após, as raízes de cada camada foram separadas do solo através de jatos de água e secas em estufa a 60º C por 48 h, para a determinação da massa seca das raízes.

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, com quatro repetições. Os dados foram submetidos à análise de regressão com nível de significância de 5 % pelo teste F.

6.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com o aumento do grau de compactação de 75 a 105%, a resistência à penetração aumentou de 1,0 a 7,9 MPa, reduziu a macroporosidade, a porosidade de aeração do solo e o crescimento da cultura, observada pela altura das plantas, pela massa seca das raízes (camadas superior, intermediária e inferior) e massa seca da parte aérea (Figura 15).

Com o aumento do grau de compactação de 75 a 105%, a macroporosidade do solo diminuiu de 0,18 a 0,03 $m^3 m^{-3}$ e a porosidade de aeração, quando a umidade estava a 80% da capacidade de campo, diminuiu de 0,29 a 0,16 $m^3 m^{-3}$, respectivamente (Figura 15B,C). Como o bom crescimento e desenvolvimento das plantas, assim como a qualidade do solo dependem de um limite mínimo de porosidade de aeração de 0,10 $m^3 m^{-3}$ (XU et al., 1992), pode-se afirmar que não houve restrição de aeração mesmo nos maiores graus de compactação. Logo, o grau de compactação avaliado não está comprometendo a difusão de gases nesse Latossolo, na umidade em que o solo foi mantido, mas pode comprometer a porosidade de aeração quando o solo estiver mais úmido.

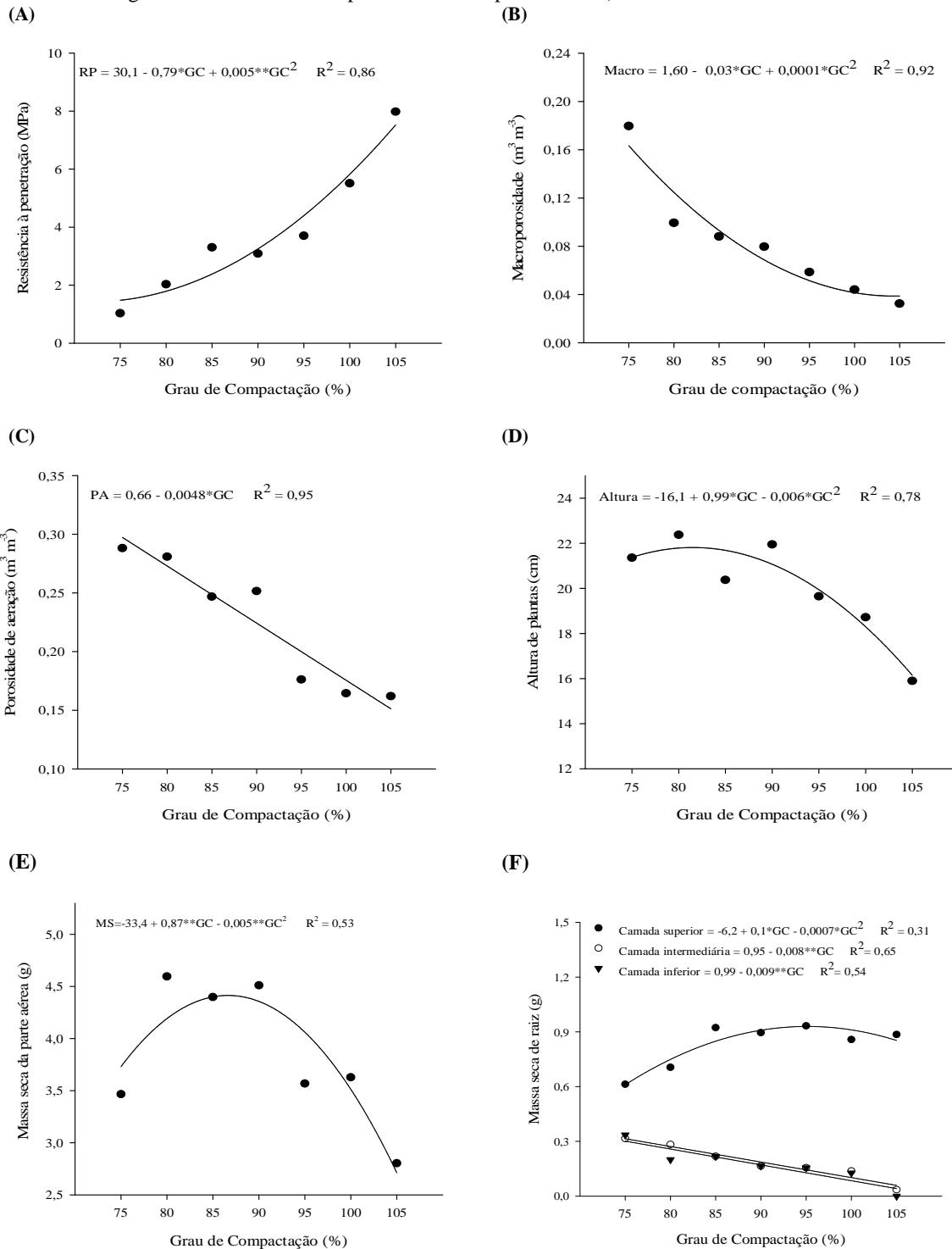
Na camada superior a massa seca das raízes aumentou até o grau de compactação de 95%, indicando que houve restrição de crescimento em profundidade. Em contrapartida, tanto na camada intermediária (compactada) como na inferior a massa seca de raiz diminuiu linearmente com o aumento do grau de compactação (Figura 15F). O aumento da massa seca de raiz na camada superior ocorreu em função da compactação subsuperficial do solo, a qual inibiu o crescimento radicular da soja na camada compactada e levou a um maior crescimento ou a um confinamento na camada superior. Tal fato corrobora com os resultados encontrados por Rosolem et al. (1994), os quais verificaram maior concentração de raízes na camada de 0-15 cm de um Latossolo Vermelho arenoso na maior densidade avaliada ($1,72 \text{ Mg m}^{-3}$). Observaram ainda que as raízes da soja conseguiram atravessar a camada intermediária (compactada) até a densidade de $1,48 \text{ Mg m}^{-3}$. Moraes et al. (1995) observaram que o desenvolvimento vertical das raízes das plantas de soja ficou impedido quando a densidade do solo era de $1,23 \text{ Mg m}^{-3}$, num Latossolo Roxo de textura argilosa. Para Alvarenga et al. (1996) a densidade entre $1,27$ a $1,57 \text{ Mg m}^{-3}$ é restritiva ao desenvolvimento das raízes das plantas e consequentemente a infiltração de água no solo, sendo esses valores influenciados grandemente pela classe textural e matéria orgânica do solo.

Na camada com grau de compactação de 100% (densidade de $1,2 \text{ Mg m}^{-3}$) praticamente não houve desenvolvimento de raiz, ao passo que, no grau de compactação de 105% as raízes não conseguiram atravessar a camada compactada, não havendo dessa forma, raízes na camada inferior. Assim, verifica-se que as raízes da soja são sensíveis à compactação do solo, e não se desenvolvem verticalmente quando o Latossolo Bruno está com grau de compactação igual ou acima de 105%. Logo, o desenvolvimento da parte aérea fica comprometido, uma vez que a habilidade das plantas em absorver água e nutrientes depende da distribuição de raízes, a qual é função principalmente de limitações físicas do solo (ALVARENGA & CRUZ, 2003).

A partir do grau de compactação de 82% (densidade de $0,99 \text{ Mg m}^{-3}$) e 87% (densidade de $1,04 \text{ Mg m}^{-3}$) diminui respectivamente, a altura das plantas e a massa seca da parte aérea.

A densidade de $1,04 \text{ Mg m}^{-3}$ em que foi observada a máxima produção de massa seca da parte aérea da soja, é menor do que a densidade observada por Silva et al. (2006), que foi de $1,20 \text{ Mg m}^{-3}$ em experimento com plantas cultivadas em vaso com diferentes graus de compactação num Latossolo Vermelho arenoso com 23 g kg^{-1} de carbono orgânico. Essa menor densidade relaciona-se principalmente ao elevado teor de matéria orgânica desse Latossolo Bruno (Tabela 21). Segundo Braida et al. (2006), a matéria orgânica tende a diminuir a densidade dos solos devido a sua baixa densidade, de modo que, diminui também a densidade crítica ao crescimento radicular. Ao avaliar um Nitossolo Vermelho argiloso com 15 g kg^{-1} de carbono orgânico compactado subsuperficialmente com anéis de PVC sobrepostos, Foloni et al. (2006) observaram redução na produção de matéria seca da parte aérea de soja acima da densidade do solo de $1,56 \text{ Mg m}^{-3}$. Num Latossolo Vermelho-Escuro de textura média com 16 g kg^{-1} de carbono orgânico, compactado em subsuperfície, Müller et al. (2001) observaram redução na produção de massa seca da parte aérea de diversas plantas na densidade de $1,58 \text{ Mg m}^{-3}$.

Figura 15 - Resistência mecânica do solo à penetração (A), Macroporosidade (B), Porosidade de aeração (C), Altura de plantas (D), Massa seca da parte aérea (E), Massa seca da camada superior, intermediária e inferior (F) em diferentes graus de compactação de um Latossolo Bruno. (*e** significativo a 5% e 1% de probabilidade respectivamente).



Considerando que, a altura e a massa seca das plantas de soja foram maiores quando o grau de compactação foi de 82 % e 87% respectivamente, é correto afirmar que esses valores possuem certa semelhança com os encontrados por Suzuki et al. (2007) em trabalho realizado a campo num Latossolo Vermelho com 654 g kg^{-1} de argila, 260 g kg^{-1} de silte e 85 g kg^{-1} de areia, em que o grau de compactação considerado ótimo para a cultura da soja, considerando altura de plantas e rendimento, foi de 86%. Segundo Lindstron & Voorhees (1994) quando o grau de compactação é menor que 80 % a produtividade de algumas culturas diminui, e quando é maior que 86% são considerados elevados e prejudiciais ao desenvolvimento das culturas. Porém, o grau de compactação considerado crítico às culturas depende grandemente do tipo de solo (SUZUKI et al., 2007).

As diferenças no grau de compactação entre os diversos estudos podem estar relacionadas às diferenças de métodos, a duração dos experimentos, os solos e as cultivares utilizadas (SILVA et al., 2006). É importante considerar a existência de diferenças entre a estrutura do solo observada a campo, daquela observada em estudos onde o solo é compactado artificialmente. Isto ocorre porque no campo existe maior heterogeneidade em relação ao solo compactado artificialmente, com existência de zonas de maior e outras de menor densidade, além da existência de porosidade contínua originada pela atividade biológica, da fauna e das raízes (LIMA et al., 2005). Além disso, em solos compactados artificialmente a resistência à penetração não é capaz de identificar e integrar o efeito de rachaduras e de poros biológicos existentes no solo, porém é nessas regiões de menor resistência que as raízes crescem, mesmo em solos com elevada resistência à penetração.

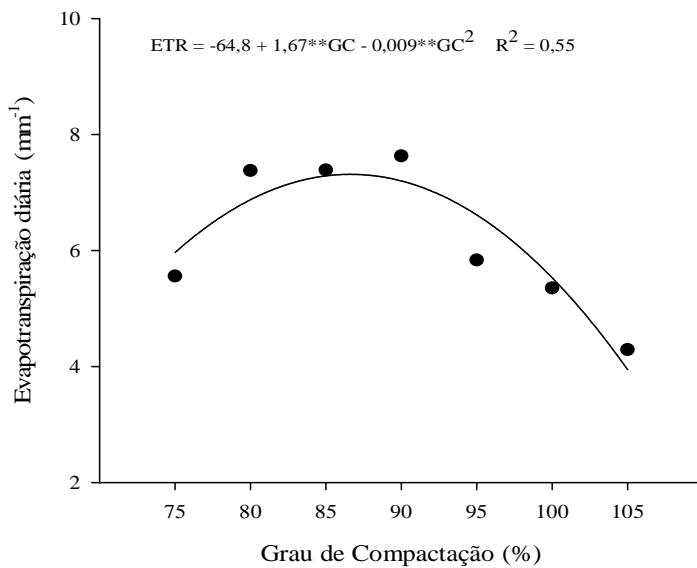
Em média, o aumento da densidade do solo eleva a resistência à penetração durante todo o ciclo de cultivo comparado a solo com menor densidade. Entretanto, diferente de experimentos em casa de vegetação, no perfil a umidade muda muito com o ciclo da cultura (COSTA et al., 2003). Assim, para uma mesma densidade, o solo tem diferentes resistências à penetração e quando ocorre restrição hídrica, aqueles mais densos comprometem o crescimento e a produção de massa seca da parte aérea da soja em função da menor capacidade de crescimento e desenvolvimento das raízes no perfil, bem como a diminuição na absorção de água e nutrientes pelas mesmas (FOLONI et al., 2006). Assim, os efeitos da densidade do solo no crescimento das culturas são dependentes da disponibilidade de água.

Em relação à evapotranspiração, observou-se que no menor grau de compactação do solo (75%) a evapotranspiração diária foi de 5,6 mm, e com o aumento do grau de compactação para 80, 85 e 93%, a evapotranspiração aumentou para próximo de $7,5 \text{ mm dia}^{-1}$ (Figura 16). Porém, nas maiores compactações houve redução acentuada da

evapotranspiração. Estas taxas estão de acordo com o estudo de Berlato et al. (1986), os quais encontraram evapotranspiração diária em torno de 7 mm para a cultura da soja no início do estádio de florescimento.

A maior evapotranspiração de água nas menores densidades está relacionada ao maior desenvolvimento de plantas associado à maior disponibilidade de água no solo. Segundo Pereira et al. (2002), a evapotranspiração é influenciada por fatores como: condições ambientais, vegetação, tipo de solo e sistema de manejo. Outro fator que pode ter influenciado a maior evapotranspiração nas menores densidades, está relacionado com o crescimento das raízes em profundidade, comparado ao solo mais compactado. Quanto maior é o sistema radicular da planta maior é o volume de solo explorado pelas raízes, visando o atendimento da demanda hídrica da atmosfera (PEREIRA et al., 2002).

Figura 16 - Evapotranspiração diária nas diferentes densidades num Latossolo Bruno. (* e ** significativo a 5% e 1% de probabilidade respectivamente).



As menores evapotranspirações nos maiores graus de compactação estão relacionadas à formação de poros de menor diâmetro, devido à compactação, os quais aumentam a energia de retenção e diminuem a disponibilidade de água, fatores que diminuem a evapotranspiração e o crescimento das plantas. Segundo Tormena et al. (1998) a energia de retenção de água no solo regula em parte o processo evapotranspiratório, principalmente, em função do conteúdo de água disponível refletir as alterações na estrutura e portanto, na distribuição do tamanho dos poros. Em trabalho comparando diferentes sistemas de cultivo do solo, López & Arrhé

(1997) verificaram menor evapotranspiração no sistema de semeadura direta, comparado ao cultivo mínimo e convencional. Os autores associaram a redução da evapotranspiração com a maior resistência à penetração e energia de retenção de água no solo, resultando em menor crescimento das plantas.

Portanto, nos graus entre 80 e 90%, apesar de existirem restrições ao crescimento em altura e massa seca da parte aérea, a evapotranspiração foi pouco afetada, ficando próximo do máximo. Apesar de ter restringido o crescimento radicular a partir de graus de 75% na camada compactada, como o solo estava com umidade de 80 % da capacidade de campo, a evapotranspiração não foi restringida. Assim, é necessário avaliar a relação entre o grau de compactação e os atributos da cultura quando ocorrem déficits hídricos.

6.4 CONCLUSÕES

O aumento do grau de compactação reduz a macroporosidade, a porosidade de aeração e aumenta a resistência do solo à penetração.

Na cultura da soja o grau de compactação afeta o crescimento e desenvolvimento de forma variada: Para as raízes o aumento acima de 75% reduz o crescimento na camada compactada; as raízes não crescem verticalmente quando o grau de compactação é igual ou superior a 105%; acima de 82% restringe o desenvolvimento o crescimento da parte aérea medido pela altura das plantas; acima de 87% restringe a massa seca da parte aérea; acima de 93% diminui a evapotranpiração. Assim, o grau de compactação restritivo a cultura da soja depende do atributo que está sendo avaliado.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em relação ao sistema convencional, o sistema conservacionista manejado por longo período melhora as condições químicas, físicas e hídricas do solo, favorecendo o crescimento e desenvolvimento das culturas, sendo esses efeitos mais evidentes nas camadas mais superficiais do solo.

Todavia, para melhor compreensão dos efeitos dos sistemas de manejo do solo nos atributos químicos, físicos e hídricos e no crescimento e desenvolvimento das culturas é necessário manter experimentos de longa duração, integrando as condições meteorológicas por longos períodos.

Além disso, é importante a realização de novos estudos em regiões tropicais a fim de determinar qual valor de índice S limitante à produtividade das culturas, bem como, o estudo da condutividade hidráulica não saturada à campo, uma vez que, a estimativa através de modelos pode não trazer a resposta real.

Outra questão é quanto ao grau de compactação restritivo ao desenvolvimento da cultura da soja, o qual, na maioria dos estudos se estabelece valores críticos ao desenvolvimento da soja e de outras culturas, no entanto, conforme resultados obtidos, o grau de compactação restritivo a cultura da soja depende do atributo que está sendo avaliado.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7182: **Solo: Ensaio de compactação.** Rio de Janeiro, 1986. 10p.

AGUIAR, M. I. Qualidade física do solo em sistemas agroflorestais. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, Minas Gerais, 2008.

ALBUQUERQUE, J.A. et al. Relação de atributos do solo com a agregação de um Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo e plantas de verão para cobertura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, p.415-424, 2005.

ALBUQUERQUE, J.A. et al. Aplicação de calcário e fósforo e estabilidade da estrutura de um solo ácido. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, p.799-806, 2003.

ALBUQUERQUE, J.A.; SANGOI, L.; ENDER, M. Efeitos da integração lavoura-pecuária nas propriedades físicas do solo e características da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, p.717-723, 2001.

ALBUQUERQUE, J.A. et al. Propriedades físicas e eletroquímicas de um Latossolo Bruno afetadas pela calagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, p. 295-300, 2000.

ALBUQUERQUE, J.A. et al. Rotação de culturas e sistemas de manejo do solo: efeito sobre a forma da estrutura do solo ao final de sete anos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 19, p. 115-119, 1995.

ALMEIDA, J.A. ; MAÇANEIRO, K. C. ; KLAMT, E. Mineralogia da fração argila de solos vermelhos com horizontes superficiais brunados do Planalto de Lages, SC. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 815-828, 2000.

ALMEIDA, J.A.; TORRENT, J; BARRÓN, V. Cor, formas do fósforo e adsorção de fosfatos em Latossolos desenvolvidos de basalto do extremo sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 985-1002, 2003.

ALVARENGA, R.C.; CRUZ, J.C. Manejo de solos e agricultura irrigada. In: RESENDE, M.; ALBUQUERQUE, P.E.P.; COUTO, L. (Ed). **A cultura do milho irrigado.** Brasília: Embrapa informação tecnológica, 2003. p.70-106.

ALVARENGA, R. C. et al. Crescimento de leguminosas em camadas de solo compactadas artificialmente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 20, p. 319-326, 1996.

ALVES, M.E. Atributos mineralógicos e eletroquímicos, absorção e dessorção de sulfato em solos paulistas. Piracicaba, Universidade Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2002. 169p (Tese de Doutorado).

AMADO, T. J. C.; MIELNICZUK, J. Estimativa da adubação nitrogenada para o milho em sistemas de manejo e culturas de cobertura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 553-560, 2000.

ANDRADE, R.S.; STONE, L. F. Índice S como indicador da qualidade física de solos do cerrado brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.13, p.382–388, 2009.

ANGINONI, I. Adubação fosfatada e potássica em plantio direto. In. FONTOURA, S. M. V. & BAYER, C. **Manejo e fertilidade de solos em plantio direto**. 2. ed. Guarapuava: Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária, 2009. p. 91 -110.

ARGENTON, J. et al. Comportamento de atributos relacionados com a forma da estrutura de Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo e plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 425-435, 2005.

ARSHAD, M.A. et al. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J.W.; JONES, A.J. Methods for assessing soil quality. **Soil Science Society of America**, Madison, 1996. p.123-141. (SSSA Special publication n.49).

ASSIS, R.L. et al. Avaliação da resistência do solo à penetração em diferentes solos com a variação do teor de água. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 29, p. 558-568, 2009.

ASSIS, R.L.; LANÇAS, K.P. Avaliação dos atributos físicos de um Nitossolo Vermelho distroférreo sob sistema plantio direto, preparo convencional e mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 515-522, 2005.

AZEVEDO, A.C.; KAMPF, N.; BOHNEN, H.. Alterações na dinâmica evolutiva de Latossolo Bruno pela calagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 20, p. 191-198, 1996.

AZOOZ, R. H.; ARSHAD, M. A. Soil infiltration and hydraulic conductivity under long-term no tillage and conventional tillage systems. **Canadian Journal of Soil Science**, Ontario, v. 76, p. 143-152, 1996.

BARBER, S.A. Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach. 2ed. New York, John Wiley & Sons, Inc., 1995. 414p.

BAYER, C.; BISSANI, C.A.; ZANATA, J.A. Química de solos em plantio direto. In. FONTOURA, S. M. V. & BAYER, C. **Manejo e fertilidade de solos em plantio direto**. 2 ed. Guarapuava, PR. Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária, 2009, p. 1-7.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. Fundamentos da dinâmica da matéria orgânica do solo - **Ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2 ed. Porto Alegre, v. 1, p. 7-18, 2008.

BAYER, C. et al. Armazenamento de carbono em frações lâbeis da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v. 39, p.677-683, 2004.

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; SAAB, S. C. Diminuição da humificação da matéria orgânica de um cambissolo húmico em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 537-544, 2003.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Características químicas do solo afetadas por métodos de preparo e sistemas de cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, p. 105-112, 1997.

BAVER, L.D.; GARDNER, W.H.; GARDNER, W.R. Soil physics. Nova York: John Wiley, 1972. 498 p.

BEN-HUR, C.C. et al. Avaliação temporal da umidade do solo como consequência do tipo e percentagem de cobertura vegetal. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 24, p. 459-463, 1999.

BENITO N.P.; GUIMARÃES M.F.; PASINI, A. Caracterização de sistemas de manejo em Latossolo Vermelho utilizando parâmetros biológicos, físicos e químicos. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 29, p. 473-484, 2008.

BERLATO, M.A.; MATZENAUER, R.; BERGAMASCHI, H. Evapotranspiração máxima da soja e relações com a evapotranspiração calculada pela equação de Penman, evaporação do tanque "classe A" e radiação solar global. **Agronomia Sulriograndense**, Porto Alegre, v.22, n.2, p.251-259, 1986.

BERTOL, I.; LEITE, D.; GUADAGNIN, J.C.; S.R. RITTER. Erosão hídrica em um Nitossolo Háplico submetido a diferentes sistemas de manejo sob chuva simulada. II – perdas de nutrientes e carbono orgânico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 1045-1054, 2004.

BERTOL, I.; SCHICK, J.; MASSARIOL, J.M.; REIS, E.F. dos; DILLY, L. Propriedades físicas de um Cambissolo Húmico álico afetadas pelo manejo do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.30, p.91-95, 2000.

BERTOL, I.; SANTOS, J.C.P. Uso do solo e propriedades físico-hídricas no Planalto Catarinense. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 30, p. 263-267, 1995.

BERTOL, I.; MIQUELLUTI, D.J. Perdas de solo, água e nutrientes reduzidas pela cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 28, p. 1205-1213, 1993.

BETIOLI JÚNIOR, E. et al. Intervalo Hídrico Ótimo e grau de compactação de um Latossolo Vermelho após 30 anos sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, p. 971-982, 2012.

BEUTLER, A.N. et al. Densidade do solo relativa e parâmetro “S” como indicadores da qualidade física para culturas anuais. **Revista de biologia e ciências da terra**, v.8, p.27-36, 2008.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SILVA, A.P. Soil resistance to penetration and least limiting water range for soybean yield in a Haplustox from Brazil. **Brazolina Archives of Biologic Technology**, Curitiba, v. 48, p. 863-871, 2005.

BEUTLER, A. N. et al. Resistência a penetração e permeabilidade de Latossolo Vermelho Distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 167-177, 2001.

BLAKE, G.R.; HARTGE, K. H. Bulk Density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis: Physical and Mineralogical Methods**. Part 1. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p. 363-375.

BODMAN, G. B.; RUBIN, J. Soils puddling. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, v. 13, p. 27-36, 1948.

BORTOLUZZI, E.C. et al. Efeito da calagem na relação entre solo e água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 2621-2628, 2008.

BOUKOUNGA, J.C. Propriedades físico-mecânicas de uma Argissolo sob diferentes sistemas de manejo e preparo do solo. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009. 78p. (Tese de Mestrado).

BRAIDA, J.A.; BAYER, C.; ALBUQUERQUE, J.A.; REICHERT, J.M. Matéria orgânica e seu efeito na física do solo. In: FILHO, O. K.; MAFRA, A. L.; GATIBONI, L. C. (Org.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. VII, p. 222-227, 2011.

BRAIDA, J.A.; REICHERT, J.M.; VEIGA, M.; REINERT, D.J. Resíduos Vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio proctor. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 605-614, 2006.

BRUSSAARD, L.; VAN FAASSEN, H.G. Effects of compaction on soil biota and soil biological processes. In: SOANE, B.D.; VANOUWERKERK, C. Soil compaction in crop production. London: Elsevier, 1994. p.215-235 (Developments in Agricultural Engineering, II).

BUTIERRES, M. F. M. Efeito do calcário e fosfato de potássio no ponto zero de carga (PCZ) e grau de floculação em três solos do Rio Grande do Sul. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria 1980. 259 f. (Dissertação de Mestrado).

CAIRES, E.F.; FONSECA, A.F. Absorção de nutrientes pela soja cultivada no sistema de plantio direto em função da calagem na superfície. **Bragantia**, Campinas, v. 59, p. 213-220, 2000.

CAMARA, R.K.; KLEIN, V.A. Propriedades físico-hídricas do solo sob plantio direto escarificado e rendimento da soja. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, p. 813-819, 2005.

CAMARGO, O.A.; ALLEONI, L.R.F. Compactação do Solo e o Desenvolvimento de Plantas. Piracicaba: ESALQ, 1997. 132p.

CAMPOS, B.C, et al. Avaliação temporal da umidade do solo como consequência do tipo e percentagem de cobertura vegetal. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 24, p. 459-463, 1994.

CANTARELLA, H. . Nitrogênio. In: Novais, R.F.; Alvares V.; V.H.; Barros, N.F.; Fontes, R.L.F.; Cantarutti, R.B.: Neves, J.C.L.. (Org.). Fertilidade do Solo. 1 ed. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.1, p.375-470, 2007.

CARPENEDO, V.; MIELNICZUK, J. Estado de agregação e qualidade dos agregados de Latossolos Roxos, submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 14, p. 99-105, 1990.

CARTER, M.R. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. **Canadian Journal of Soil Science**, v.70, p.425-433, 1990.

CARTER, M. R. Microbial biomass and index for tillage-induced changes in soil biological properties. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 7, n. 1, p. 29-40, 1986.

CARVALHO, M.A.C. et al. Produtividade do milho em sucessão a adubos verdes no sistema de plantio direto e convencional. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v. 39, n. 1, p. 47-53, 2004.

CASSOL, E. A. Erosão do solo: influência do uso agrícola do manejo e preparo do solo. Porto Alegre, RS.: iprnr: secretaria da agricultura do RGS (boletim iprnr n. 15), 1984 (boletim técnico).

CAVALIERI, K.M.V. et al. Alterações nas propriedades químicas de um Latossolo Vermelho eutroférico por dois sistemas de manejo de solo. **Acta Scientiarum: Agronomy**, v. 26, n. 4, p. 377-385, 2004.

CENTURION, J.F.; DEMATTÉ, J.L.I. Sistemas de preparo de solos de Cerrado: efeitos nas propriedades físicas e na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 27, p. 315-324, 1992.

CENTURION, J.F.; DEMATTÉ, J.L.I. Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um solo sob cerrado cultivado com soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 9, p. 263-266, 1985.

CERETTA, C.A. Ciclagem de nutrientes como estratégia à maior eficiência no uso de fertilizantes. In: FONTOURA, S. M. V. & BAYER, C. **Manejo e fertilidade de solos em plantio direto**. 2 ed. Guarapuava, PR. Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária, 2009, p. 111-128

CIOTTA, M.N. et al. Manejo da calagem e os componentes da acidez de Latossolo Bruno em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 317-326, 2004.

CIOTTA, M.N. et al. Matéria orgânica e aumento da capacidade de troca de cátions em solo com argila de atividade baixa sob plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, p. 1161-1164, 2003.

CIOTTA, M.N. et al. Acidificação de um Latossolo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 1055-1064, 2002.

CHARLET, L.; SPOSITO, G. Monovalent ion adsorption by an Oxisol. **Soil Science Society of America Journal**, v.51,p.1155-1160, 1987.

CHIOU, C.T.; LEE, J.F.; BOYD, S.A. The surface area of soil organic matter. **Environ. Sci. Technol.** v.24, p.1164-1166, 1990.

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, p. 933-942, 2008.

CQFS- RS/SC. COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO. **Manual de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 10.ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Núcleo Regional Sul. 2004. 400p.

CONCEIÇÃO, P.C.; AMADO, T.J.C.; MIELNICZUK, J.; SPAGONOLLO. Qualidade do solo em sistema de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 777-788, 2005.

CORRÊA, J.C. Efeito de métodos de cultivo em algumas propriedades físicas de um Latossolo Amarelo muito argiloso do Estado do Amazonas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 21,p. 1317-1322, 1985.

CORSINI, P.C. Modificações de características físico-hídricas em perfis das Séries Jaboticabal e Santa Tereza, ocasionado pelo cultivo intensivo. **Científica**, São Paulo, v. 2, p. 148-165, 1974.

COSTA, A. Retenção e disponibilidade de água em solos de Santa Catarina: avaliação e geração de funções de pedotransferência. Lages, Universidade do Estado de Santa Catarina, 2012. 423p. (Tese de Doutorado).

COSTA, F.S. et al. Calagem e as propriedades eletroquímicas e físicas de um Latossolo em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 1, 2004a.

COSTA, F.S. et al. Aumento de matéria orgânica num Latossolo Bruno em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 2, p. 587-589, 2004b.

COSTA, F.S. et al. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 527-535, 2003.

COSTA, F.S. Propriedades físicas e produtividade de culturas de um Latossolo Bruno sob sistemas de manejo do solo em experimentos de longa duração. Lages, Universidade do Estado de Santa Catarina, 2001. 98p. (Tese de Mestrado).

COSTA, S.E.V.G.A. et al. Distribuição de potássio e de raízes no solo e crescimento de milho em sistemas de manejo do solo e da adubação em longo prazo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p.1291-1301, 2009.

DALMAGO, G.A. et al. Retenção e disponibilidade de água às plantas, em solo sob plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, v. 13, p. 855–864, 2009.

DALMAGO, G.A. Dinâmica da água no solo em cultivo de milho sob plantio direto e preparo convencional. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004. 219p. (Tese de Doutorado).

De BONA, F. D.; BAYER, C.; BERGAMASC et al. Carbono orgânico no solo em sistemas irrigados por aspersão sob plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 911-920, 2006.

De MARIA, I.C.; CASTRO, O.M.; DIAS, H.S. Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em Latossolo Roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 703-709, 1999.

DEXTER, A.R. Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, Poland, v.120, p.201-214, 2004a.

DEXTER, A.R. Amelioration of soil by natural processes. **Soil Till. Res.**, 20:87-100, 1991.

DIAS JUNIOR, M.S.; ESTANISLAU, W.T. Grau de compactação e retenção de água de Latossolos submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 45-51, 1999.

DICK, W. Organic carbon, nitrogen, and phosphorus concentrations and pH in soil profiles as affected by tillage intensity. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v.47, p.102-107, 1983.

DIECKOW, J. et al. Sistemas conservacionistas de preparo do solo e implicações no ciclo do carbono. São Carlos, SP: **Embrapa Instrumentação Agropecuária**, 2004. 17 p. (Embrapa Instrumentação Agropecuária. Documentos, 12).

ELLERT, B.H.; BETTANY, J.R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 75, p. 529-538, 1995.

ELTZ, F.L.P.; PEIXOTO, R.T.G.; JASTER, F. Efeitos de sistemas de preparo do solo nas propriedades físicas e químicas de um Latossolo Bruno álico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 13, p. 259 - 267, 1989.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2. ed. Rio de Janeiro, 2006. 306 p.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Serviço Nacional de Levantamento e Classificação dos Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2. ed. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

ERNANI, P.R. Química do solo e disponibilidade de nutrientes. Lages: Autor, 2008. 230p.

ERNANI, P.R. et al. Influência da combinação de fósforo e calcário no rendimento de milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 537-544, 2000.

FIGUEIREDO, L.H.A.; DIAS JUNIOR, M.S.; FERREIRA, M.M. Umidade crítica de compactação e densidade do solo máxima em resposta a sistemas de manejo num Latossolo Roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 487-493, 2000.

FEBRAPDP- Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha. [Online]: http://www.febrapdp.org.br/download/ev_plantio_brasil.pdf. Acesso em 09 jan 2011.

FERRERAS, L.A. et al. Parámetros físicos del suelo en condiciones no perturbadas y bajo laboreo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, p. 161-170, 2001.

FIGUEIREDO, L.H.A.; DIAS JUNIOR, M.S.; FERREIRA, M.M. Umidade crítica de compactação e densidade do solo máxima em resposta a sistemas de manejo num Latossolo Roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 487-493, 2000.

FIORIN, J. E. Plantas recuperadoras da fertilidade do solo. In: Curso sobre aspectos básicos de fertilidade e microbiologia dosolo em plantio direto. Resumos... Passo Fundo: Aldeia Norte, 1999. p.39-55.

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

FONTOURA, S.M.V.; BAYER, C. Trinta anos do experimento de manejo de solo. ed. Comemorativa. Guarapuava, PR. **Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária**, 2008, 56p.

FRANCHINI, J.C. et al. Alterações químicas em solos ácidos após a aplicação de resíduos vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 533-542, 1999.

GEE, G. W.; BAUDER, J. W. Particle-size Analysis. In: BLACK, C.A. eds. **Methods of soil analysis**. Madison, American Society of Agronomy. n9. part1. 1986.

GIBB, J. A preparação do solo para a cana-de-açúcar. Brasil Açucareiro, Rio de Janeiro, v. 6, p.69-75, 1939.

GONÇALVES, D. et al. Mineralogia de um Latossolo Vermelho distrófico submetido a diferentes manejos por 24 anos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 2647-2652, 2008.

GONÇALVES, F.C.; MORAES, M. H. Porosidade e infiltração de água do solo sob diferentes sistemas de manejo. **Irriga**, v.17, p. 337 - 345, 2012.

GONZÁLEZ, A.P.; ALVES, M.C. Armazenamento de água e densidade do solo sob três condições de superfície, em um Cambissol gleico de Lugo, Espanha. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, v. 9, p. 45-50, 2005.

GROHMANN, F.; MEDINA, H.P. Características de umidade dos principais solos do estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 21, p. 285-295, 1962.

GUBIANI, P.I. Regularidade de resposta da cultura do milho à compactação do solo. Santa Maria, RS, Universidade Federal de Santa Maria, 2012. 135p. (Tese de Doutorado).

GUBIANI, P.I., et al. Permeâmetro de carga decrescente associado a programa computacional para a determinação da condutividade hidráulica do solo saturado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 993-997, 2008.

HÅKANSSON, I. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.16, p.105-120, 1990.

HAKANSSON, I.; VOORHEES, W. R.; RILEY, H. Vehicel and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.11, p.239-282, 1988.

HAYNES, R.J. Lime and phosphate in the soil-plant system. **Adv. Agron.**, 37:249-315, 1984.

HERNANI, L. C.; KURIHARA, C. H.; SILVA, W. M. Sistemas de manejo de solo e perdas de nutrientes e matéria orgânica por erosão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 145-154, 1999.

HILLEL, D. Environmental soil physics. London: Academic Press, 1998. 771p.

HILLEL, D. Fundamentals of soil physics. New York, Academic Press, 1980. 413p.

HOLTZ, R.D.; KOVACS, W.D. An introduction to Geotechnical Engineering. Prentice-Hall Inc. 1981. 733p.

JASTER, F. et al. Rendimento de grãos em diferentes sistemas de preparo e manejo de solos. Londrina, Embrapa-CNPSO, 1993. 37p. (Documentos, 61).

KAISER, D.R. Propriedades físico-hídricas e dinâmica da água no solo. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2010. 146p. (Tese de Doutorado).

KAMINSKI, J. et al. Eficiência da calagem superficial e incorporada precedendo o sistema plantio direto em um Argissolo sob pastagem natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 573-580, 2005.

KÄTTERER, T. et al. Roots contribute more to refractory soil organic matter than above-ground crop residues, as revealed by a long-term field experiment. **Agriculture, Ecosystems and Environment** v.141, p. 184-192, 2011.

KEMPER, W.D.; CHEPIL, W.S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C.A.; EVANS, D.D.; WHITE, J.L.; ENSMINGER, L.E. & CLARCK, F.E., eds. Methods of soil analysis. Madison, **American Society of Agronomy**, p.499-510, 1965.

KEMPER, W.D.; ROSENAU, R.C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis**. 2.ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. pt 1: Physical and mineralogical methods, p.425-443.

KLEIN, V. A. Física do solo. Passo Fundo: Ed. da UPF, 2008. 212p.

KLEIN, V.A.; LIBARDI, P.L. Condutividade hidráulica de um Latossolo Roxo, não saturado, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 32, p. 945-953, 2002.

LAL, R.; GREENLAND, B.J. Soil physical properties and crop production in tropics. Chichester, John Wiley, 1979. p.7-85.

LAWES, W. D.; EVANS, D. D. The effects of long time cultivation on some physical and chemical properties of two Rendzina soils. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 14, p. 15-19, 1949.

LEITE, L.F.C. et al. Atributos químicos e estoques de carbono em Latossolosob plantio direto no cerrado do Piauí. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, v. 14, p. 1273-1280, 2010.

LETEY, J. Relationship between soil physical propertie sand crop productions. **Adv. Soil Sci.**, 1: 277-294,1985.

LIPIEC, J. et al. Soil physical properties and growth of spring barley related to the degree of compactness of two soils. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 19, p. 307-317, 1991.

LIMA, C.L.R. et al. Heterogeneidade da compactação de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob pomar de laranja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 409-414, 2004.

LIMA, H.V. et al. Tráfego de máquinas agrícolas e alterações de bioporos em área sob pomar de laranja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 677-684, 2005.

LINDSTRON, M.J.; VOORHEES, W.B. Response of soil to traffic and crop compaction. In: SOANE, B.D. & van OUWERKERK, C. Soil compaction in crop production. London, Elsevier, 1994. p.265-286. (Developments in Agricultural Engineering, 2).

LOPES, E. S. et al. Avaliação da umidade na compactação do solo submetido ao tráfego de máquinas de colheita florestal. **Revista Árvore**, v.35, n.3, Edição Especial, p.659-667, 2011.

LÓPEZ, M. V.; ARRHE, J. L. Growth, yield and water use efficiency of winter barley in response to conservation tillage in a semi-arid region of Spain. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 44, n. 1-2, p. 35-54, 1997.

LOURENTE, E.R.P. et al. Rotação de culturas e relações com atributos químicos e microbiológicos do solo e produtividade do milho. **Ciências Agrárias**, Londrina, v. 31, p. 829-842, 2010.

MACHADO, J.A.; BRUM, A.C.R. Efeito de sistemas de cultivo em algumas propriedades físicas do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Campinas, v.2, p.81-84. 1978.

MARCOLIN, C. D.; KLEIN, V. A.; Determinação de densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência da densidade do solo máxima. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 33, p. 349-354, 2011.

MARCOLIN, C.D.; KLEIN, V.A. Determinação da densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima. **Engenharia Agrícola**, Maringá, v. 29, p. 558-568, 2009.

MARCOLIN, C.D. Propriedades físicas de Nitossolo Latossolos e Argilosos sob plantio direto. Passo Fundo, Universidade de Passo Fundo, 2006.110p. (Tese de Mestrado).

MARIA I.C.; CASTRO, O.M. Fósforo, potássio e matéria orgânica em um Latossolo Roxo sob sistemas de manejo com milho e soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Campinas, v. 17, p. 471-477, 1993.

MARTORANO, L.G. et al. Indicadores da condição hídrica do solo com soja em plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, v. 13, p. 397–405, 2009.

MEEK, B.D. et al. Infiltration rate of a sandy loam soil: effects of traffic, tillage and plant roots. **Soil Science Society of American Journal**, v. 56, p.908-913, 1992.

MESQUITA, M.G.B.F.; MORAES, S.O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n.3, p.963-969, 2004.

MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; VEZZANI, F.M.; LOVATO, T.; FERNANDES, F.F.; DEBARBA, L. Manejo de solo e culturas e sua relação com os estoques de carbono e nitrogênio do solo. In: CURI, N.; MARQUES, J.J.; GUILHERME, L.R.G.; LIMA, J.M.; LOPES, A.S. e ALVAREZ V., V.H. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.3, p.209-248, 2003.

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M.A.; CALEGARI, A. Efeito de material vegetal na acidez do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 7, p. 411-416, 1993.

MOTA, J.C.A. et al. Atributos mineralógicos de três solos explorados com a cultura do melão na chapada do apodi – RN. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 445-454, 2007.

MORAES, M.H.; BENEZ, S.H.; LIBARDI, P.L. Efeitos da compactação em algumas propriedades físicas do solo e seu reflexo no desenvolvimento das raízes de plantas de soja. **Revista Bragantia**, Campinas, v. 52, p. 393-403, 1995.

MÜLLER, M.M.L.; CECCON, G.; ROsolem, C.A. Influência da compactação do solo em subsuperfície sobre o crescimento aéreo e radicular de plantas de adubação verde de inverno. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p.531-538, 2001.

OLIVEIRA, J.O.A.P. et al. Influência de sistemas de preparo do solo na produtividade da mandioca (*Manihot esculenta*, crantz). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 443-450, 2001.

OLIVEIRA, G.C. et al. 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, p. 327-336 2004.

OLIVEIRA V.S. et al. Distribuição de agregados e carbono orgânico em um Argissolo Amarelo distrocoeso em diferentes manejos. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, v.14, p. 907–913, 2010.

PASSOS, J.F.M. Atributos do solo e produtividade da soja em um Latossolo Bruno afetados por sistemas de manejo e calagem. Lages, Universidade do Estado de Santa Catarina. 2004, 67p. (Dissertação de Mestrado).

PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. Agrometeorologia: Fundamentos e aplicações práticas. Guáiba. Livraria e editora Agropecuária Ltda, 2002.

PEREIRA, R.G. et al. Atributos químicos do solo influenciados por sistemas de manejo. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 22, n.1, p.78-84, 2009.

PÉRTILE, P. et al. Application of alkaline wate from pulp industry to acid soil with pine. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, p. 939-950, 2012.

PIKUL J.L; RAMIG, R.E.; WILKINS, D.E. Soil properties and crop yield among tillage systems in a wheat pea rotation. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 26, p.151-162, 1993.

PRADO, R.M. A calagem e as propriedades físicas de solos tropicais: revisão de literatura. **Revista biociênciac**, Taubaté, v.9, p.7-16, 2003.

PROST, R. et al. State and location of water adsorbed on clay minerals: Consequences of the hydration and swelling-shrinkage phenomena. **Clays Clay Miner.**, v.46, p.117-131, 1998.

QUEIROZ-VOLTAN, R.B.; NOGUEIRA, S.S.S.; MIRANDA, M.A.C. Aspectos da estrutura da raiz e do desenvolvimento de plantas de soja em solos compactados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, p. 929-938, 2000.

RAGHAVAN, G.S.V.; ALVO, P. ; MCKYES, E. Soil compaction in agriculture: A review toward managing the problem. **Advances in Soil Science**, London, v. 11, p. 1-36, 1990.

RALISCH, R. et al. Resistência à penetração de um Latossolo Vermelho Amarelo do Cerrado sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.12, p. 381–384, 2008.

REICHARDT, K. Infiltração da água no solo. In: **Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas**. 2 ed. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1996. p. 317-352.

REICHARDT, K. A água em sistemas agrícolas. São Paulo : Manole, 1990. 188p.

REICHARDT, K. Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera. 4.ed. São Paulo, Fundação Cargill, 1985. 445p.

REICHERT, J.M. et al. Hidrologia do solo, disponibilidade de água às plantas e zoneamento agroclimático. **Tópicos Ciência Solo**, v.7 p.1-54, 2011.

REICHERT, J.M. et al. Variação temporal de propriedades físicas do solo e crescimento radicular de feijoeiro em quatro sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.44, n.3, p.310-319, 2009.

REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. **Tópicos Ciência Solo**, v.5 p.49-134, 2007.

REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência Ambiental**, v.27, p.29-48, 2003.

REINERT, D.J. et al. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de

plantas de cobertura de Argissolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 1805-1816, 2008.

REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Propriedades físicas de solos em sistema plantio direto irrigado. In : CARLESSO, R. ; PETRY, M. ; ROSA, G. & CERETTA, C.A. Irrigação por Aspersão no Rio Grande do Sul, Santa Maria, 2001. p. 114-131.

REINERT, D.J. Recuperação de solos em sistemas agropastoris. In: DIAS, L.D. & MELLO, J.W.V., eds. *Recuperação de áreas degradadas*. Viçosa: UFV. Sociedade Brasileira de Recuperação de Áreas Degradadas, 1998. p. 163-176.

REINERT, D.J. et al. Temporal variation in structural stability induced by tillage. In: EASTERN CANADA SOIL STRUCTURE WORKSHOP, 1990, Guelph, Ontario. **Proceedings...** Windsor, Ontario: Canadian Society of Soil Science, 1990. v.1, 236 p. p.63-72.

ROSOLEM, C.A. et al. Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, p. 821-828, 1999.

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

ROTH, C.H.; CASTRO-FILHO, C.; MEDEIROS, G.B. Análise de fatores físicos e químicos relacionados com a agregação de um Latossolo Roxo distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 15, p. 241-248, 1992.

ROVEDDER, A.P.M.; ELTZ, F.L.F. Revegetação com plantas de cobertura em solos arenizados sob erosão eólica no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 315-321, 2008.

SALET, R.L.; ANGHINONI, I.; KOCHHANN, R.A. Atividade do alumínio na solução do solo do sistema plantio direto. **Revista Científica Unicruz**, v.1, p.9-13, 1999.

SALTON, J.C. et al. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p. 11-21, 2008.

SALTON, J.C.; MIELNICZUK, J. Relações entre sistemas de preparo, temperatura e umidade de um Podzólico vermelho-escuro de Eldorado do Sul (RS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 19, p. 313-319, 1995.

SAMPAIO F.M.T. et al. Variabilidade espacial da umidade de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob plantio direto. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.30, p.854-861, 2010.

SANDERMAN, J.; BALDOCK, J.A.; AMUNDSON, R. Dissolved organic carbon chemistry and dynamics in contrasting forest and grassland soils. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 89, p. 181-198, 2008.

SAS INSTITUTE INC. SAS/STAT® 9.22 User's Guide. Cary, NC: SAS Institute Inc, 2010. 8445 p.

SECCO, D. et al. Atributos físicos e rendimento de grãos de trigo, soja e milho em dois Latossolos compactados e escarificados. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, p. 58-64, 2009.

SECCO, D. et al. Atributos físicos e produtividade de culturas em um Latossolo Vermelho argiloso sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 407-414, 2005.

SECCO, D. et al. Produtividade de soja e propriedades físicas de um Latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 5, p. 797-804, 2004.

SETA, A.K.; KARATHANASIS, A.D. Water dispersible colloids and factors influencing their dispersibility from soil aggregates. **Geoderma**, 74:255-266, 1997.

SEXSTONE, A.J. et al. Direct measurement of oxygen profiles and denitrification rates in soil aggregates. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 49, p. 645–651, 1985.

SIDIRAS N.; VIEIRA, M. J. Comportamento de um Latossolo Roxo Distrófico compactado pelas rodas do trator na semeadura. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 19, n. 10, p.1285-1293, 1984.

SIDIRAS, N. Influência de diferentes sistemas de preparo do solo na variação da umidade e rendimento da soja, em Latossolo Roxo distroférrico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas v. 7, p. 103-106, 1983.

SILVA, B.M. et al. Índice S no diagnóstico da qualidade estrutural de Latossolo muito argiloso sob manejo intensivo. **Biosci. J.** Uberlândia, v. 28, p. 338-345, 2012.

SILVA, G.J.; MAIA, J.C.S.; BIANCHINI, A. Crescimento da parte aérea de plantas cultivadas em vaso, submetidas à irrigação subsuperficial e a diferentes graus de compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 31-40, 2006.

SILVA, M.A.S. et al. Atributos físicos do solo relacionados ao armazenamento de água em um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 3, 2005.

SILVA,V.R. Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2003. 171p. (Tese de Doutorado).

SILVA, G.M. et al. Caracterização físico-hídrica de um Latossolo Vermelho perférlico submetido a dois sistemas de manejo do solo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 31, p. 127-131, 2001.

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

SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Management versus inherent soil properties effects on bulk density and relative compaction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 44, n. 1-2, p. 81-93, 1997.

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.

SIX, J.; ELLIOTT, E.T.; PAUSTIAN, K. Aggregation and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 63:1350-1358, 1999.

SOANE, B.D.; OUWERKERK, C. van. Soil compaction problems in world agriculture. I n: SOANE, B.D.; OUWERKERK, C. van, eds. Soil compaction in crop production. Netherlands, Elsevier, 1994. p.01-21.

SOARES,J.L.N.; ESPÍNDOLA, C.R.; CASTRO, S.S. Alteração física e morfológica em solos cultivados sob sistema tradicional de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 1005-1014, 2005.

SÖHNE, W. Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractor tires. **Agricultural Engineering**, v.39, n.1, p.276-290, 1958.

SOUZA, Z.M.; ALVES, M.C. Movimento da água e resistência à penetração de um Latossolo Vermelho distrófico do cerrado, sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n.1, p. 18-23, 2003.

STONE, L.F.; SILVEIRA, P.M. Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 395-401, 2001.

STONE, L.F.; MOREIRA, J.A.A. Efeitos de sistemas de preparo do solo no uso da água e na produtividade do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, p. 835-841, 2000.

SUZUKI, L.E.A.S. et al. Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n.8, p. 1.159-1.167, 2007.

TAVARES FILHO, J. et al. Resistência do solo a penetração e desenvolvimento do sistema radicular do milho (*Zea mays*) sob diferentes sistemas de manejo em um Latossolo Roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 725-730, 2001.

TAYLOR, H.M.; BRAR, G.S. Effect of soil compaction on root development. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 19, p. 111-119, 1991.

TAYLOR, H.M. Root behavior as affected by soil structure and strength. In: CARSON, E.W. (Ed.) **The plant root and its environment**. Virginia: Virginia Polytechnic and State University, 1971. cap.11, p.271-291.

TAYLOR, H. M., ROBERSON, G. M., AND PARKER, J. J. Soil strength-root penetration relations for medium-to-coarse-textured soil materials. **Soil science**, 102, 18-22. 1966.

TEDESCO, M.J. et al. Análises de solo, plantas e outros materiais. 2. ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p.

TISDALL, J.M.; OADES, L.M. Organic matter and water-stable aggregates in soil. **J. Soil Sci.**, 33:141-163, 1982.

TONI, L.R.M.; SANTANA, H.E.; ZAIA, D.A.M. Adsorção de glifosato sobre solos e minerais. **Química Nova**, v.29, p.829-833, 2006.

TORMENA, C.A. et al. Propriedades físicas e taxa de estratificação de carbono orgânico num latossolo vermelho após dez anos sob dois sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 1023-1031, 2004.

TORMENA, C.A. et al. Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Scientia Agricola**, v.59, n.4, p.795-801, 2002.

TORMENA, C.A.; ROLOFF, 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**, Visoça, v. 22, p. 301-309, 1998.

TORRES, E.; SARAIVA, O. F. Camadas de impedimento do solo em sistema agrícola com a soja. Londrina: Embrapa Soja, 1999. 58p. (Embrapa Soja. Circular Técnico, 23).

VANDEN BERG, G.E.; GILL, W.R. Pressure distribution between a smooth tire and the soil. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.5, n.2, p.105-107, 1962.

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

VAN RAIJ, B. A Capacidade de troca de catíons das frações orgânica e mineral em solos. **Revista Bragantia**, Campinas, v. 8, n.8, 1969.

VARGAS, M. Introdução à mecânica dos solos. São Paulo. Mcgraw-Hill do Brasil, 1977. 509p.

VEIGA, M. Propriedades de um Nitossolo Vermelho após nove anos de uso de sistemas de manejo e efeito sobre culturas. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2005.126p. (Tese de Doutorado).

VEZZANI, F.M.; MIELNICZUK, J. Agregação e estoque de carbono em Argissolo submetido a diferentes práticas de manejo agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 213-223, 2011.

VEZZANI, F.M.; MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 330-337, 2009.

VIEIRA, M.J.; MUZILLI, O. Características físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 19, n.7, p. 873-882, 1984.

VIEIRA, M. L.; KLEIN, V. A. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 1271-1280, 2007.

WEBBER, C.L.; GEBHARDT, M.R.; KERR, H.D. Effect of tillage on soybean growth and seed production. **Agronomy Journal**, v.79, p. 962-956, 1987.

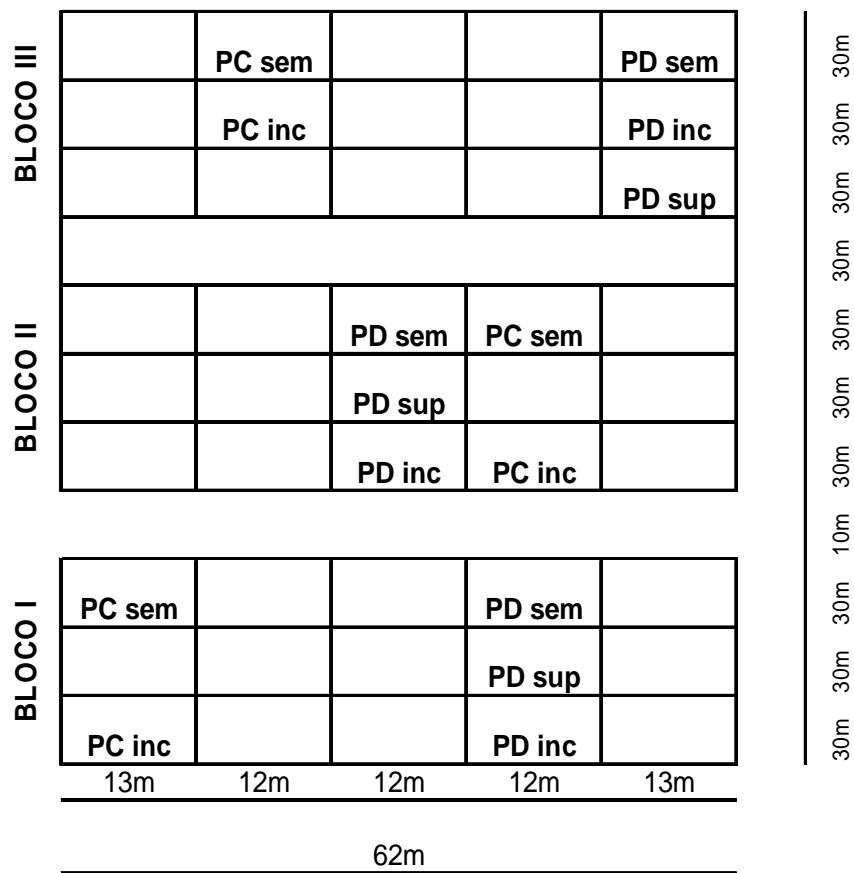
WENDLING, B. et al. Carbono orgânico e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho sob diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v. 40, p. 487-494, 2005.

XU, X. et al. Compaction effect on the gas diffusion coefficient in soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.56,n.5,p.1743-1750,1992.

ZHANG, H.; HARTGE, K. H.; RINGE, H. Effectiveness of organic matter incorporation in reducing soil compactability. **Soil Science Society of America Journal**, v.61, n.1, p.239-245, 1997.

ANEXOS

Anexo A - Croqui de localização dos sistemas de manejo do solo na área experimental.



Anexo B - Foto da mata, usada como solo referencia (a) e detalhe do perfil feito na mata para a coleta das amostras físicas e químicas (b).

(a)



(b)



Anexo C - Densidade, porosidade total, microporosidade e macroporosidade do solo, nas camadas de 0-2,5, 2,5-5, 5-10, 10-20, 20-40 40-60, 80-100 cm, em diferentes sistemas de uso e manejo de um Latossolo Bruno, Guarapuava, PR, 2009.

Profundidade (cm)	Mata ⁽¹⁾	PCinc	PCsem	PDinc	PDsem	PDsup
-----Densidade do Solo (Mg m ⁻³)-----						
0-2,5	0,67	0,94	1,02	0,97	0,87	0,87
2,5-5	0,79	1,00	1,02	0,96	0,99	0,91
5-10	0,78	0,99	1,03	0,96	1,02	0,98
10-20	0,85	1,06	1,13	0,97	1,03	1,03
20-40	0,83	0,93	0,98	0,95	0,97	0,93
40-60	0,83	0,86	0,88	0,78	0,89	0,92
60-80	0,81	0,95	0,88	0,81	0,93	0,82
80-100	0,87	1,00	0,90	0,86	0,91	0,81
-----Porosidade Total (m ³ m ⁻³)-----						
0-2,5	0,69	0,69	0,68	0,69	0,70	0,69
2,5-5	0,68	0,67	0,67	0,66	0,65	0,68
5-10	0,72	0,64	0,63	0,67	0,64	0,65
10-20	0,68	0,64	0,65	0,64	0,62	0,61
20-40	0,69	0,65	0,64	0,67	0,65	0,66
40-60	0,65	0,66	0,62	0,68	0,64	0,63
60-80	0,66	0,58	0,64	0,64	0,65	0,66
80-100	0,65	0,58	0,61	0,61	0,62	0,66
-----Macroporosidade (m ³ m ⁻³)-----						
0-2,5	0,28	0,26	0,23	0,19	0,20	0,17
2,5-5	0,26	0,21	0,20	0,17	0,13	0,18
5-10	0,27	0,20	0,21	0,18	0,14	0,16
10-20	0,24	0,17	0,18	0,16	0,13	0,14
20-40	0,27	0,15	0,14	0,14	0,15	0,15
40-60	0,24	0,24	0,17	0,22	0,18	0,17
60-80	0,25	0,17	0,17	0,19	0,19	0,19
80-100	0,25	0,15	0,20	0,18	0,16	0,20
-----Microporosidade (m ³ m ⁻³)-----						
0-2,5	0,41	0,44	0,45	0,50	0,50	0,52
2,5-5	0,42	0,46	0,48	0,49	0,52	0,5
5-10	0,45	0,44	0,43	0,49	0,49	0,49
10-20	0,44	0,47	0,47	0,48	0,48	0,47
20-40	0,42	0,50	0,51	0,53	0,5	0,51
40-60	0,41	0,42	0,46	0,47	0,46	0,5
60-80	0,40	0,41	0,47	0,45	0,45	0,47
80-100	0,40	0,43	0,40	0,43	0,46	0,46

⁽¹⁾ Sistemas de uso e manejo do solo: Preparo convencional com calcário incorporado (PCinc); Preparo convencional sem calcário (PCsem); Plantio direto com calcário incorporado (PDinc); Plantio direto sem calcário (PDsem); Plantio direto com calcário superficial (PDsup) e Mata.

Anexo D - Umidade volumétrica do solo nos sistemas de manejo por dia (06, 08, 12, 16, 18, 22 e 25 de janeiro de 2010), nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm.

Camada	Dia						
	6/jan	8/jan	12/jan	16/jan	18/jan	22/jan	25/jan
	Umidade volumétrica ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)						
-PC in-							
0-5	0,40	0,32	0,43	0,39	0,34	0,43	0,38
5-10	0,44	0,37	0,44	0,41	0,38	0,45	0,41
10-20	0,46	0,42	0,46	0,45	0,41	0,48	0,44
20-40	0,43	0,37	0,43	0,42	0,39	0,45	0,41
-PC sem-							
0-5	0,42	0,32	0,42	0,39	0,34	0,47	0,37
5-10	0,44	0,37	0,42	0,42	0,36	0,44	0,41
10-20	0,49	0,41	0,47	0,44	0,42	0,48	0,45
20-40	0,45	0,38	0,42	0,42	0,40	0,42	0,42
-PD in-							
0-5	0,47	0,50	0,50	0,47	0,44	0,50	0,45
5-10	0,46	0,47	0,47	0,45	0,42	0,49	0,45
10-20	0,47	0,47	0,47	0,45	0,43	0,48	0,45
20-40	0,45	0,48	0,48	0,46	0,45	0,48	0,46
-PD sem-							
0-5	0,50	0,42	0,51	0,45	0,35	0,50	0,45
5-10	0,49	0,46	0,49	0,46	0,45	0,50	0,48
10-20	0,49	0,44	0,50	0,45	0,43	0,48	0,47
20-40	0,48	0,47	0,49	0,47	0,43	0,50	0,48
-PD sup-							
0-5	0,48	0,46	0,53	0,49	0,42	0,52	0,43
5-10	0,47	0,46	0,52	0,45	0,44	0,47	0,44
10-20	0,45	0,46	0,49	0,45	0,42	0,50	0,44
20-40	0,39	0,45	0,42	0,45	0,42	0,46	0,42
-Mata-							
0-5	0,49	0,50	0,52	0,52	0,48	0,48	0,48
5-10	0,43	0,45	0,45	0,43	0,41	0,42	0,43
10-20	0,43	0,44	0,44	0,48	0,41	0,43	0,43
20-40	0,42	0,42	0,42	0,45	0,40	0,42	0,42

(¹⁷) Sistemas de manejo: Preparo convencional com calcário incorporado (PCinc); Preparo convencional sem calcário (PCsem); Plantio direto com calcário incorporado (PDinc); Plantio direto sem calcário (PDsem); Plantio direto com calcário superficial (PDsup) e Mata.

Anexo E - Coeficientes de correlação de Pearson entre os atributos do solo e rendimento de culturas no sistema sob plantio direto na camada de 0-0,20 m.

	CO	Macro	Micro	Ds	Soja (2009/2010)	Milho (2010/2011)	Soja (2011/2012)
UV	ns	-0,48 (*)	0,47 (*)	0,50 (*)	0,46(*)	ns	0,46(*)
AD	0,51 (*)	ns	0,45 (*)	ns	ns	ns	ns

CO=carbono orgânico; Macro=macroporosidade; Micro=microporosidade; Ds=densidade do solo; UV=umidade volumétrica; AD=água disponível; ns: não significativo; * significativo a 5% de probabilidade

Anexo F - Temperatura (°C), Umidade relativa do ar (%), chuva em 24 h (mm) no período de 01 a 25 de janeiro de 2010. Dados da Estação Meteorológica Entre Rios (Simepar) – Guarapuava, PR.

Dia	Temperatura			Umidade relativa			Chuva 24h
	Méd	máx	mín	méd	máx	mín	
1	17.7	22.3	13.7	93.7	100.0	81.1	0.0
2	20.9	28.3	13.6	86.5	100.0	58.6	0.0
3	20.1	26.6	17.5	98.0	100.0	76.5	38.0
4	21.1	27.3	17.5	94.0	100.0	69.9	18.6
5	20.9	26.4	17.9	96.3	100.0	78.1	7.8
6	21.1	26.7	16.8	94.3	100.0	71.3	0.2
7	20.9	27.7	14.0	87.9	100.0	62.3	2.0
8	19.3	22.6	16.8	96.6	100.0	87.8	0.0
9	19.5	24.0	17.0	98.3	100.0	88.3	2.4
10	18.6	21.2	16.8	99.8	100.0	97.5	21.4
11	18.8	23.1	16.0	100.0	100.0	98.5	26.4
12	19.4	24.2	17.5	99.0	100.0	87.1	29.2
13	18.5	22.9	16.1	99.4	100.0	89.3	30.0
14	19.5	25.9	14.9	95.3	100.0	78.1	0.0
15	17.9	21.3	16.0	99.4	100.0	93.5	9.0
16	18.5	22.8	14.3	97.3	100.0	87.3	0.0
17	19.2	22.8	16.4	99.5	100.0	94.7	0.8
18	19.6	25.5	15.6	98.2	100.0	86.4	11.0
19	20.7	25.5	16.8	97.4	100.0	83.3	2.4
20	17.9	20.4	16.5	100.0	100.0	98.3	20.4
21	18.4	23.6	15.9	98.8	100.0	81.7	19.8
22	18.5	24.0	15.1	96.7	100.0	81.9	0.0
23	18.4	24.5	15.9	97.0	100.0	72.9	6.8
24	19.7	26.7	15.3	90.6	100.0	62.0	0.0
25	18.3	25.0	15.6	95.9	100.0	77.2	0.0

Anexo G - Dados de precipitação históricos (1976-2012) em mm, na região de Entre rios - Guarapuava -Paraná.

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Maio	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média anual
1976	189	89	259	109	157	137	94	158	164	139	132	271	1899
1977	153	159	241	89	39	137	79	94	65	117	160	171	1506
1978	134	53	132	0	125	77	264	70	83	92	103	164	1297
1979	103	214	58	104	190	26	128	166	229	318	162	250	1948
1980	217	128	82	42	232	84	189	185	188	164	105	313	1928
1981	207	184	88	177	21	134	10	69	75	206	170	287	1626
1982	82	155	76	13	94	359	279	105	90	335	468	202	2258
1983	215	205	189	218	505	274	655	10	333	242	186	160	3190
1984	190	78	278	120	123	239	73	212	42	40	311	241	1945
1985	99	229	160	214	42	62	107	61	61	91	83	138	1344
1986	186	226	61	162	243	21	28	118	124	146	231	183	1726
1987	105	198	64	211	563	116	98	63	57	198	154	133	1956
1988	138	123	72	204	338	84	18	13	62	138	50	197	1433
1989	307	201	139	178	114	63	233	126	313	257	169	161	2260
1990	361	59	99	229	103	169	186	174	218	291	126	122	2134
1991	130	73	190	180	46	308	28	82	44	280	156	259	1777
1992	164	157	144	125	579	122	151	206	129	207	179	157	2320
1993	273	161	151	129	343	87	184	18	330	276	218	333	2502
1994	108	227	65	131	170	208	186	12	68	177	273	249	1874
1995	485	142	178	88	27	187	195	21	262	206	75	175	2042
1996	257	278	322	44	34	150	129	66	175	321	207	248	2232
1997	206	293	216	53	118	230	75	168	259	364	249	185	2416
1998	216	232	284	549	94	80	195	213	436	341	113	149	2902
1999	136	239	134	166	130	246	158	5	165	113	76	151	1718
2000	271	221	85	128	107	146	129	89	376	316	243	225	2337
2001	302	322	213	133	180	138	139	125	174	235	191	106	2259
2002	266	86	87	114	245	23	75	144	195	196	240	157	1830
2003	102	171	101	81	26	110	145	35	99	120	201	155	1346
2004	83	74	155	102	200	98	143	36	109	322	185	85	1591
2005	147	29	84	146	156	204	80	108	253	361	59	115	1740
2006	152	146	79	35	16	62	54	88	143	119	105	231	1231
2007	210	116	114	254	279	26	144	21	41	99	122	236	1661
2008	188	95	82	189	76	201	84	141	60	281	176	102	1675
2009	182	79	120	46	158	120	321	104	321	287	175	248	2161
2010	311	173	180	243	72	85	140	41	52	228	107	306	1939
2011	256	346	221	68	51	166	302	390	162	240	140	173	2514
2012	197	153	117	324	105	380	176						1450