

RELATÓRIO PARCIAL DE PROJETO DE PESQUISA

**(DES)COMPACTAÇÃO DO SOLO EM ÁREAS SOB PLANTIO DIRETO VERSUS
QUALIDADE FÍSICA, DINÂMICA DE NPK E RENDIMENTO DE CULTURAS**

Coordenador: Dr. Alvaro Pires da Silva – ESALQ/USP

**Piracicaba – São Paulo
Dezembro de 2011**

1 INTRODUÇÃO

O presente relatório é referente às atividades de pesquisa realizadas durante o período de execução (09/2009 a 09/2011) do projeto intitulado “(DES)COMPACTAÇÃO DO SOLO EM ÁREAS SOB PLANTIO DIRETO VERSUS QUALIDADE FÍSICA, DINÂMICA DE NPK E RENDIMENTO DE CULTURAS”. O referido projeto é coordenado pelo professor Álvaro Pires da Silva do departamento de Ciência do Solo da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo e conta com a seguinte equipe de trabalho (tabela 1):

Tabela 1. Equipe de trabalho.

Nome	Instituição	Local	Função no projeto
Prof. Dr. Alvaro Pires da Silva	ESALQ/USP	Piracicaba, SP	Coordenador
Prof ^a . Dra. Neyde F. B. Giarola	UEPG	Ponta Grossa, PR	Colaborador
Prof. Dr. Cassio A. Tormena	UEM	Maringá, PR	Colaborador
Dr. Bruce Ball	Scottish Agricultural College	Edimburgo, Escócia	Colaborador
Prof. Dr. João Carlos de M. Sá	UEPG	Ponta Grossa, PR	Colaborador
Prof. Dr. Adriel F. da Fonseca	UEPG	Ponta Grossa, PR	Colaborador
Prof. Dr. Marcos Vinícius Milléo	UEPG	Ponta Grossa, PR	Colaborador
Técnico Agrícola Eloir Moresco	UEPG	Ponta Grossa, PR	Colaborador

2 RESUMO DO PROJETO

A qualidade do sistema plantio direto no Brasil tem sido questionada, nos últimos anos, em função do aumento da compactação do solo em áreas destinadas à produção de grãos. A ausência de revolvimento, aliada ao tráfego de máquinas, acarreta alterações na qualidade da estrutura do solo, que podem ser desfavoráveis à qualidade física do solo, à dinâmica de NPK e à produtividade de culturas. O fluxo de massa através dos macroporos pode ser reduzido, o que pode reduzir o fluxo de nitrato para as raízes das plantas e aumentar o potencial para a desnitrificação e subsequente perda de N. A disponibilidade de P e K pode ser afetada pela redução da extensão do sistema radicular causada pela compactação do solo, resultando num volume menor de solo explorado pelas raízes. Escarificadores ou subsoladores tem sido amplamente utilizados no Brasil para descompactar o solo, ou seja, romper camadas superficiais e sub-superficiais

compactadas. Há carência de estudos na região Sul do Brasil - pioneira na adoção do sistema plantio direto para a produção de grãos - com o objetivo de avaliar o efeito da descompactação do solo na qualidade física, dinâmica de NPK e desenvolvimento e produtividade de culturas. O objetivo e diferencial deste projeto de pesquisa foi integrar a avaliação da fertilidade química e física do solo em relação à descompactação do solo e produtividade das culturas de verão. A pesquisa foi desenvolvida na fazenda experimental da Universidade Estadual de Ponta Grossa, região dos Campos Gerais do Paraná. O delineamento experimental adotado foi blocos casualizados com dois tratamentos quadruplicados: plantio direto de longa duração (PD) e plantio direto de longa duração submetido à subsolagem mecânica (PD-M). A amostragem foi realizada quatro vezes, durante dois anos, a fim de avaliar os seguintes parâmetros físicos do solo: curvas de retenção de água, resistência do solo à penetração, intervalo hídrico ótimo, condutividade hidráulica saturada, permeabilidade ao ar e qualidade visual da estrutura do solo. Além dos parâmetros físicos do solo, a produtividade das culturas de verão também foi determinada. Os resultados preliminares demonstraram que a descompactação mecânica teve efeito de curta duração sobre os parâmetros físicos do solo e não influenciou a produtividade de milho e soja.

3 ATIVIDADES REALIZADAS NO PERÍODO

3.1 LOCAL DO ESTUDO, INSTALAÇÃO E CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO

O estudo foi instalado e conduzido na fazenda experimental da Universidade Estadual de Ponta Grossa, localizada no município de Ponta Grossa (Paraná), região dos Campos Gerais, na coordenada média 25°05'46" S e 50°02'52" O, a cerca de 1100 metros de altitude. A região apresenta clima mesotérmico, subtropical úmido do tipo Cfb, com precipitação e temperatura média anual de 1545 mm e 18,7° C, respectivamente (IAPAR, 2000). A figura 1 mostra a precipitação pluvial média para a região durante o período estudado (05/2009 a 09/2011).

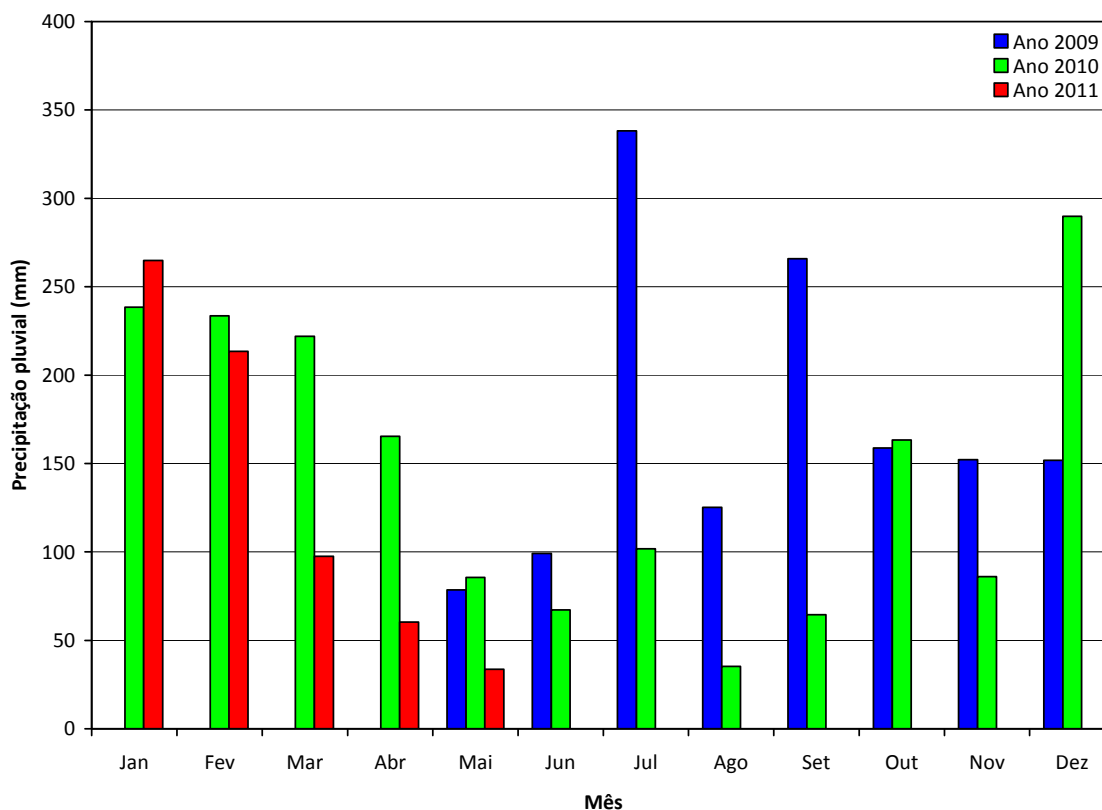


Figura 1. Precipitação pluviométrica média mensal dos anos 2009, 2010 e 2011.

Fonte: Estação climatológica do Pólo Regional de Pesquisa do IAPAR.

Segundo EMBRAPA/IAPAR (2008), a área é dominada pela Associação de Latossolo Vermelho distrófico com Cambissolo Háplico Tb distrófico (LVd6), ambos oriundos da alteração de folhelhos do Período Paleozóico, com contribuição de arenitos da Formação Furnas. Para o experimento foi utilizado um Latossolo Vermelho distrófico argiloso situado em relevo plano ($0,1 \text{ m m}^{-1}$ de declividade), cujos atributos químicos e físicos de rotina determinados antes da instalação do experimento são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Atributos químicos e físicos de rotina da camada 0,0-0,20 m do Latossolo Vermelho utilizado no experimento.

Camada	P resina	M.O	pH	H + Al	Al ³⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Argila	Areia	Silte
m	mg dm ⁻³	g kg ⁻¹	CaCl ₂		-----	cmol _c dm ⁻³	-----			-----	g kg ⁻¹	-----
0,0-0,20	6,2	33,43	4,61	6,44	0,24	0,23	3,92	0,34	1	519	429	52

A área de estudo tem sido manejada sob sistema plantio direto desde 1991 e cultivada com soja, milho ou feijão, no período do verão, e trigo, aveia-preta mais ervilhaca ou tremoço, no inverno. Trigo, aveia-preta e ervilhaca são semeadas com o auxílio de disco duplo a uma profundidade de 0,03 m; milho, feijão e soja, são semeados com haste sulcadora a uma profundidade de 0,04 m, para a colocação da semente, e a 0,10 m, para a deposição do adubo. Uma síntese dos sistemas de manejo adotados pode ser visualizada na tabela 3. A aplicação de corretivos e a adubação das culturas foram realizadas de acordo os resultados de análise de solo e as épocas de semeadura e o controle de plantas daninhas e os tratamentos fitossanitários, definidos de acordo com as recomendações técnicas para cada cultura.

Tabela 3. Síntese dos sistemas de manejo do solo adotados na área experimental.

Tratamento	Preparo 1	Época de preparo	Seqüência de culturas
PD	Sistema plantio direto	outono/inverno e primavera/verão	Plantas de cobertura do solo/Produção de grãos
PD-M	Sistema plantio direto com subsolagem mecânica (Asa Laser)	outono/inverno	Plantas de cobertura do solo/Produção de grãos

O experimento foi instalado no mês de maio de 2009 (período do outono). Os tratamentos: plantio direto de longa duração (PD) e plantio direto de longa duração subsolado mecanicamente (PD-M) foram dispostos em delineamento experimental de blocos ao acaso com quatro repetições, em parcelas com 9,0 m de largura por 50,0 m de comprimento (450 m²). Na figura 2 pode-se ter uma visão geral da área durante a instalação do experimento e execução da subsolagem em parte das parcelas experimentais.



Figura 2. Vista de uma parcela subsolada (à esquerda) e não subsolada (à direita), no momento da instalação do experimento.

A subsolagem mecânica (tratamento PD-M) foi realizada com o auxílio de um subsolador modelo Asa Laser, marca Jumbo Matic (Figura 3a) acoplado ao sistema de acionamento hidráulico do trator, à profundidade média de 0,25 m (Figura 3b), em vinte de maio de 2009. O subsolador era composto por cinco hastes (três na barra dianteira e duas na traseira) de formato parabólico e ponteira em cinzel, com espaçamento entre hastes de 200 mm e ângulo de ataque de 22 graus (Figura 3b).

(a)



(b)



Figura 3. Subsolação mecânica das parcelas experimentais: (a) subsolador modelo Asa Laser; e, (b) profundidade efetiva da subsolação.

Na área sob plantio direto (PD) e plantio direto subsolado (PD-M), a semeadura do outono/inverno de 2009 (aveia + ervilhaca) foi realizada aos vinte e quatro dias do mês de

maio, com disco duplo a 0,03 m de profundidade. Na figura 4 pode-se observar o desenvolvimento inicial da aveia, dezenove dias após a semeadura.



Figura 4. Vista das parcelas experimentais dezenove dias depois da semeadura da aveia + ervilhaca.

No momento em que as culturas de inverno atingiram o pleno desenvolvimento de massa vegetal e antes de produzirem sementes (de vinte e quatro a vinte e oito de agosto de 2009) foi realizada a rolagem da aveia + ervilhaca, com o auxílio de um rolo-faca. A dessecação da cobertura morta e o controle de plantas daninhas foram realizados em meados de setembro do mesmo ano por meio da aplicação de paraquat + diuron (Gramocil), na dose de 2 l ha^{-1} e glifosato (Roundup Transorb), na dose de $1,5 \text{ l ha}^{-1}$.

No período da primavera/verão (safra 2009/2010), a cultura semeada foi o milho Pioneer 30-R-50, variedade de ciclo médio. A semeadura e a adubação nitrogenada inicial foram realizadas aos cinco dias do mês de outubro de 2009, com o auxílio de haste sulcadora a 0,04 m de profundidade (para a colocação da semente) e a 0,10m (para a deposição do adubo) (Figura 5). A primeira amostragem de solo foi realizada quarenta e cinco dias depois da semeadura do milho ou seis meses depois da subsolagem. A colheita do milho ocorreu em meados de março de 2010 e, quinze dias depois (doze meses depois da subsolagem), foi efetuada a segunda amostragem de solo.



Figura 5. Vista de uma parcela experimental logo após a semeadura direta do milho. Safra primavera/verão (2009/2010).

No período do outono/inverno de 2010, nos dias dez e onze de junho de 2010, a cultura semeada foi o trigo Supera, variedade de ciclo médio. A semeadura e a adubação foram realizadas por meio de semeadora com discos duplos. Foram utilizados 150 kg de sementes por hectare em linhas distanciadas de 0,17 m, com o intuito de atingir um estande de 250 a 300 mil plantas por hectare. Na figura 6 pode-se observar a cultura do trigo cem dias depois da semeadura.



Figura 6. Vista de uma parcela experimental com a cultura do trigo cem dias depois da semeadura. Safra outono/inverno de 2010.

No período da primavera/verão (safra 2010/2011), a cultura semeada foi a soja. Utilizou-se a variedade BMX Potência RR, de ciclo semi-precoce, cuja semeadura e

adubação inicial foram realizadas aos oito dias do mês de novembro de 2010, a um espaçamento de 0,45 m entre as linhas (Figuras 7a e b). Para a adubação utilizou-se a formulação 02-20-20 (N-P-K), sendo aplicados 300 kg de adubo por hectare. A colheita foi realizada no início de março de 2011. A última amostragem de solo foi realizada em meados de abril de 2011, depois da colheita da soja.

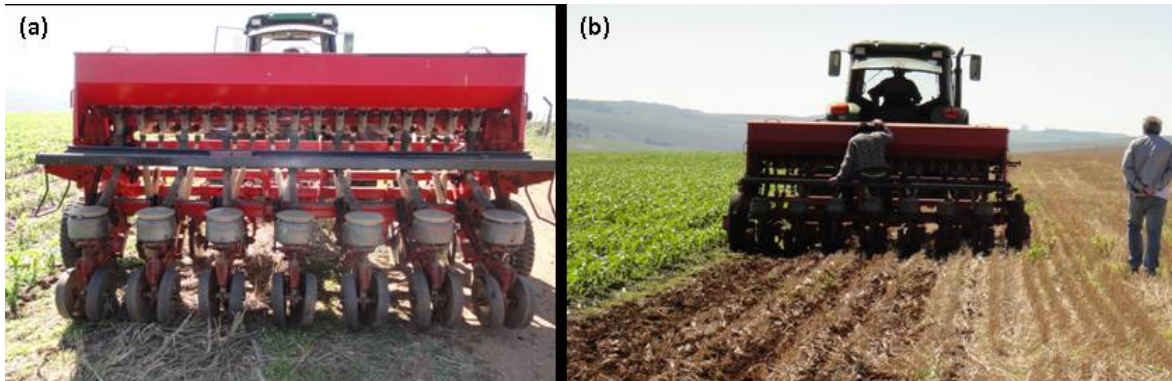


Figura 7. Semeadura da soja - safra 2010/2011: (a) semeadora-adubadora; e, (b) processo de semeadura e adubação das parcelas experimentais.

Em janeiro de 2010, por ocasião do aparecimento da inflorescência feminina na cultura do milho, foi retirado o terço médio da folha imediatamente abaixo e oposta à espiga para fins de diagnose foliar e amostragem de solo para a determinação de atributos químicos. Procedimento similar foi realizado em janeiro de 2011 para a cultura da soja.

3.2 DETERMINAÇÕES ANALÍTICAS

3.2.1 Curvas de retenção hídrica, resistência do solo e intervalo hídrico ótimo

3.2.1.1 Material e métodos

- **Amostragem de solo**

Aos seis (novembro de 2009), doze (maio de 2010), dezoito (novembro de 2010) e vinte e três (abril de 2011) meses depois da subsolagem foram realizadas as coletas das amostras com estrutura indeformada em anéis cilíndricos de aço inox. Para cada tratamento foram selecionados, aleatoriamente, doze (12) pontos de amostragem. Em cada ponto, nas profundidades 0,0-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,30, 0,30-0,40 e 0,40-0,50 m foram retiradas amostras com 50 mm de diâmetro x 50 mm de altura, perfazendo um total de cento e vinte amostras ($n = 120$) por período amostral. Depois da coleta, as amostras foram embrulhadas com filme plástico e mantidas sob temperatura de $\pm 5^\circ\text{C}$ até serem processadas.

- **Determinação das curvas de retenção hídrica**

As amostras com estrutura indeformada foram utilizadas para a obtenção das curvas de retenção hídrica e de resistência do solo à penetração. Inicialmente as amostras foram saturadas por elevação gradual de uma lâmina de água colocada em bandeja plástica e submetidas a um processo de evaporação. As medidas de potencial mátrico foram realizadas diretamente nas amostras a partir de mini tensiômetros (T5 da UMS).

- **Determinação das curvas de resistência do solo à penetração**

A resistência do solo à penetração foi determinada nas amostras com estrutura indeformada, depois de atingido o equilíbrio hidráulico nos diferentes potenciais mátricos aplicados. Para esta medida foi utilizado um penetrômetro eletrônico com velocidade constante de penetração de 1 cm min^{-1} e agulha contendo cone com diâmetro de base de

2 mm e semi-ângulo de 30 graus. Esse penetrômetro é equipado com um atuador linear e célula de carga de 20 kg acoplada a um microcomputador para a aquisição dos dados (Tormena et al., 1998). No centro geométrico de cada amostra e na profundidade de 5 a 45 mm, foi obtida uma leitura de resistência a cada 0,1 mm, perfazendo um total de 400 leituras, as quais foram utilizadas para calcular a média da resistência do solo à penetração de cada amostra. Após a determinação da resistência, as amostras foram secadas em estufa a 105°C por 24 horas e determinada a densidade do solo de acordo com Blake & Hartge (1986).

- **Determinação do intervalo hídrico ótimo**

O intervalo hídrico ótimo foi quantificado conforme a metodologia descrita por Leão et al. (2004).

3.2.1.2 Resultados

- **Resistência do solo à penetração**

Nas duas primeiras coletas a faixa de resistência à penetração foi relativamente pequena (entre 1 e 5 MPa) associado a uma faixa de umidade também relativamente pequena (entre 30 e 60% de umidade). Nessas duas primeiras amostragens, a RP foi pouco dependente (explicar melhor) da umidade. Nas duas últimas coletas, a faixa de resistência a penetração (entre 0,18 e 23 MPa) foi bem maior devido ao método usado para criar o gradiente de umidade que permitiu uma secagem maior das amostras (até 13% de umidade).

Foi usado o logaritmo das diferentes variáveis, o que permitiu um melhor ajuste dos modelos ($R^2 = 70\%$ usando log, $R^2 = 56\%$ usando variáveis “brutas”). Três tipos de modelos foram gerados. O primeiro não levou em conta as covariáveis U_v (umidade volumétrica) e D_s (densidade do solo). O segundo incluía estas covariáveis, sem considerar interações. Já o terceiro contava com interações significativas ($p \leq 0,05$). Dados dos três

modelos, no caso, análise de covariância de log(RP) usando log(Uv) e log(Ds) como covariáveis estão apresentados como exemplos na tabela 4.

Tabela 4. Dados dos três modelos no caso análise de covariância de log(RP) usando log(Uv) e log(Ds) como covariáveis.

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
ta	3	63.61251534	21.20417178	42.24	<.0001
trat	2	2.99907197	1.49953598	2.99	0.0512
prof	3	6.16648538	2.05549513	4.09	0.0068
Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
ta	3	17.4105245	5.8035082	38.68	<.0001
trat	2	1.6274226	0.8137113	5.42	0.0046
prof	3	3.1880133	1.0626711	7.08	0.0001
luv	1	106.3768694	106.3768694	708.97	<.0001
lds	1	56.1222417	56.1222417	374.04	<.0001
Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
ta	3	4.88655947	1.62885316	12.06	<.0001
trat	2	1.30612155	0.65306078	4.83	0.0083
prof	3	3.79485041	1.26495014	9.36	<.0001
luv	1	33.38249921	33.38249921	247.11	<.0001
lds	1	45.53214976	45.53214976	337.04	<.0001
luv*ta	3	5.76113342	1.92037781	14.22	<.0001
luv*prof	3	2.22408938	0.74136313	5.49	0.0010
lds*prof	3	1.21413689	0.40471230	3.00	0.0303

Os modelos precedentes foram usados para estimar médias “corrigidas” do logaritmo da resistência do solo à penetração (variável usada como variável explicada na análise de covariância) para os diferentes parâmetros (coleta, tratamentos e profundidade). Estes resultados são apresentados na tabela 5.

Tabela 5. Médias corrigidas do logaritmo da resistência à penetração, usando $\log(Uv)$ e $\log(Ds)$ como covariáveis, com os diferentes modelos usados.

Sem covariáveis			Com covariáveis sem interações			Com covariáveis com interações		
ta	l _{rp} LSMEAN		ta	l _{rp} LSMEAN		ta	l _{rp} LSMEAN	
009	0.54070479	a	009	0.69871772	a	009	0.45123469	a
M10	0.30349482	b	M10	0.46357298	b	M10	0.44433089	a
010	1.13960611	c	010	0.96291901	c	010	0.95417155	b
M11	0.96766503	d	M11	0.82626104	d	M11	0.77758457	c
M	0.7331830	ab	M	0.75015891	ab	M	0.67591896	a
N	0.65192851	b	N	0.66745890	b	N	0.59088397	b
PD	0.82849151	a	PD	0.79598525	a	PD	0.70368835	a
A	0.58491083	a	A	0.81868325	a	A	0.70057004	a
B	0.87125532	b	B	0.67096768	b	B	0.59532350	b
C	0.77451563	bc	C	0.64782104	b	C	0.57224820	b
D	0.72078897	ac	D	0.81399878	a	D	0.75917996	a
R-Square: 0.203625			R-Square: 0.762811			R-Square: 0.789846		

Os resultados obtidos a partir dos diferentes modelos apresentaram padrões diferentes em termos de médias estimadas e de diferenças encontradas entre tratamentos, período de coleta e profundidade. Os modelos considerando a umidade e densidade como covariáveis tiveram um R^2 bem mais elevado do que o modelo sem covariáveis. Globalmente, o modelo com interações conseguiu detectar diferenças mais nitidamente (*p value* menor). Este modelo também considera as médias das duas primeiras coletas iguais. Usando a umidade gravimétrica ($=Uv/Ds$) as diferenças entre tratamentos encontradas foram diferentes daquelas encontradas usando a umidade gravimétrica e a densidade do solo. Os R^2 dos modelos usados foram levemente inferiores a aqueles usando Uv e Ds como covariáveis (tabela 6).

Tabela 6. Médias corrigidas do logaritmo da resistência a penetração usando $\log(Ug)$ como covariável, com os diferentes modelos usados.

Sem covariáveis			Com covariáveis sem interações			Com covariáveis com interações		
ta	lrp LSMEAN		ta	lrp LSMEAN		ta	lrp LSMEAN	
M10	0.30349482	a	M10	0.47104236	a	M10	0.46146290	a
M11	0.96766503	b	M11	0.79449640	b	M11	0.78918488	bc
O09	0.54070479	c	O09	0.79884113	b	O09	0.64053247	b
O10	1.13960611	d	O10	0.88709085	b	O10	0.87429669	c
M	0.7331830	ab	M	0.74011058	ab	M	0.69248809	ab
N	0.65192851	b	N	0.66495389	b	N	0.62275526	a
PD	0.82849151	a	PD	0.80853859	a	PD	0.75886435	b
A	0.58491083	a	A	0.73672851	a	A	0.67242502	a
B	0.87125532	b	B	0.75676822	a	B	0.72986094	a
C	0.77451563	bc	C	0.68159063	a	C	0.64046384	a
D	0.72078897	ac	D	0.77638340	a	D	0.72272713	a
R-Square: 0.203625			R-Square: 0.705587			R-Square: 0.716846		

Voltando aos valores encontrados para resistência a penetração, obtêm-se médias “corrigidas”. Pode-se notar que, em muitos casos, o efeito da correção foi reduzir a RP média. Isso é particularmente verdade para O10 e M11 onde os valores de RP eram elevadas devido ao gradiente de umidade incluindo partes mais secas (ver $rp=f(uv)$). Neste caso, o papel das variáveis uv e ds (principalmente uv) foi mais importante (tabela 7).

Tabela 7. Dados corrigidos de resistência a penetração (MPa) para os diferentes modelos usados.

	Médias de RP	Sem covariáveis	Com covariáveis (uv e ds) sem interações	Com covariáveis (uv e ds) com interações	Com covariáveis (ug) sem interações	Com covariáveis (ug) com interações
O09	1,8481	1,7172	2,0112	1,5702	2,2230	1,8975
M10	1,5520	1,3546	1,5897	1,5594	1,6017	1,5864
O10	4,4576	3,1255	2,6193	2,5965	2,4281	2,3972
M11	4,1029	2,6318	2,2848	2,1762	2,2133	2,2016
M	2,9707	2,0817	2,1173	1,9658	2,0962	1,9987
N	2,7889	1,9192	1,9493	1,8056	1,9444	1,8641
PD	3,2108	2,2899	2,2166	2,0212	2,2446	2,1358
A	2,5843	1,7948	2,2675	2,0149	2,0891	1,9590
B	3,3837	2,3899	1,9561	1,8136	2,1314	2,0748
C	3,1759	2,1695	1,9114	1,7722	1,9770	1,8974
D	2,8166	2,0561	2,2569	2,1365	2,1736	2,0600

Independente do modelo, o tratamento PD gerou os valores de RP mais elevados, ou seja, superior a 2 MPa para todos os modelos.

- **Intervalo hídrico ótimo**

O ajuste dos modelos de retenção de água e resistência à penetração para cada tratamento mostrou não haver diferenças significativas entre eles, quando comparados os seus coeficientes por meio do teste t (Glantz & Slinker, 1990). Deste modo, foi possível realizar o ajuste das curvas de retenção da água e resistência do solo à penetração, utilizando a totalidade dos dados obtidos (N=360).

$$\theta_v = \exp(-0.1769 - 0.2227 Ds) \psi^{0.1022}, R^2 = 0.95 \quad \text{Eq. (1)}$$

$$RP = 0.1263 \theta^{-2.0532} Ds^{4.8378}, R^2 = 0.95 \quad \text{Eq. (2)}$$

nas quais: θ_v = Conteúdo volumétrico de água no solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); ψ = Tensão de água no solo (hPa); RP = Resistência do solo à penetração (MPa); Ds = Densidade do solo (g cm^{-3}).

O IHO é representado pela área colorida na figura 8, tendo sido definido em seu limite superior pela θ_{cc} e em seu limite inferior pela $\theta_{\rho mp}$ ou θ_{rp} . A amplitude do IHO foi de 0 até $0,1704 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$. A θ_{pa} não representou limitação no solo estudado. A densidade crítica (Dsc) corresponde ao valor de Ds no qual o IHO é igual a zero, sendo definida pela interseção das equações que determinam os limites, superior e inferior, do IHO. Neste estudo, a Dsc correspondeu à interseção da θ_{cc} com a θ_{rp} , sendo igual a $1,20 \text{ g cm}^{-3}$ (Figura 8).

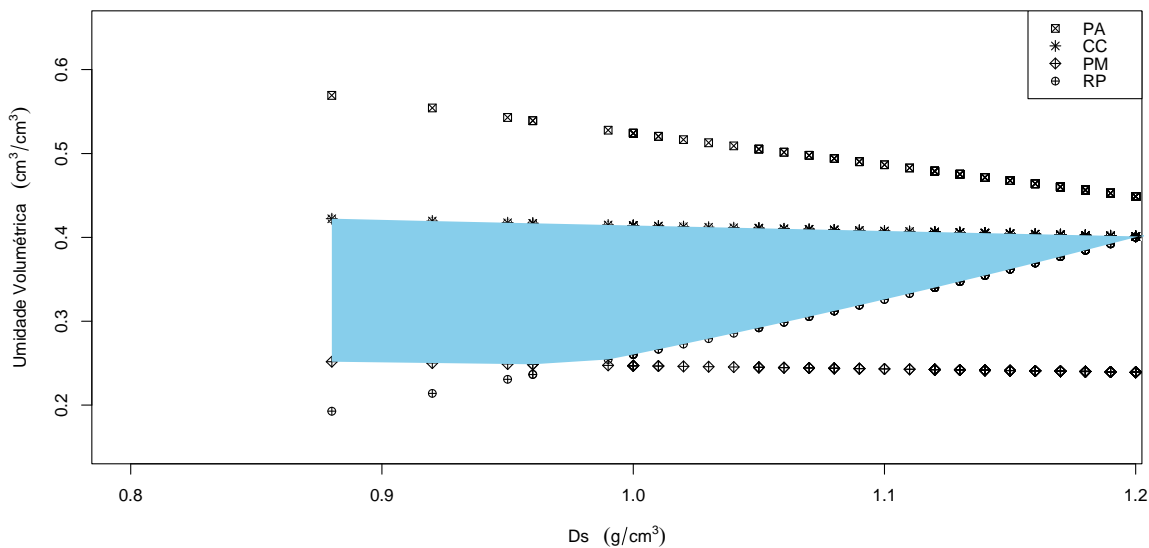


Figura 8. Variação do conteúdo de água com a densidade do solo nos níveis críticos da capacidade de campo ($\psi = 0,01$ MPa), ponto de murcha permanente ($\psi = 1,5$ MPa), porosidade de aeração de 10 % e resistência à penetração de 2,0 MPa no Latossolo Vermelho distrófico estudado. A área hachurada representa o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO).

A qualidade física do solo para o crescimento de plantas em cada um dos tratamentos foi analisada de acordo com a distribuição dos valores de D_s em relação da D_s crítica (IHO=0). A qualidade física do solo pode ser considerada adequada apenas na camada de 0-10 cm onde a maioria dos valores de D_s encontram-se abaixo do valor da D_s crítica. Particularmente a camada de 10-20 cm tem valores de D_s muito elevados. Esse resultado está de acordo com as observações de campo, em que se observou, visualmente, uma quantidade muito pequena de raízes nas camadas inferiores a 0-10 cm. Outro ponto a ser ressaltado é que a subsolagem não teve efeito significativo na melhoria da qualidade física desse solo, uma vez que não foi eficiente no sentido de reduzir os valores de densidade do solo a valores inferiores a densidade do solo crítica.

3.2.2 Condutividade hidráulica saturada

3.2.2.1 Material e métodos

A condutividade hidráulica saturada (K_0) foi obtida de acordo com método da carga decrescente (Reynolds e Elrick, 2002). As amostras indeformadas foram saturadas e

submetidas a uma carga hidráulica variável. Um cilindro sem solo foi fixado sobre o cilindro com solo e ambos colocados dentro do recipiente, que foi preenchido com água até o transbordamento do cilindro sem solo. Em seguida, o orifício na parte inferior do recipiente foi aberto para o escoamento da água, estabelecendo um fluxo de água através da amostra colocada dentro do recipiente. O deslocamento de água pela amostra de solo, de altura L , no tempo t , corresponde a um deslocamento entre duas alturas (h_0 e h_1), e a K_0 foi calculada por meio da equação 3:

$$K_0 = [(L/T) \ln(h_0/h_1)] \quad \text{Eq. (3)}$$

Em que L , h_0 e h_1 são alturas dadas em metros (m), t é o tempo em segundos (s) e K_0 é a condutividade hidráulica saturada (mm h^{-1}).

Depois de medida a condutividade hidráulica saturada, as amostras foram drenadas no potencial de -10 kPa em mesa de tensão, equivalente à capacidade de campo. Em seguida foram colocadas em equipamento específico para quantificar o fluxo de ar.

3.2.2.2 Resultados

Os resultados da condutividade hidráulica saturada (K_0) para as profundidades de 0,0-0,05 e 0,05-0,10 m são demonstrados na Tabela 8. O sistema plantio direto de longa duração (PD) foi utilizado como padrão para comparações, com o objetivo de avaliar o impacto do outro sistema (PD-M) sobre a condutividade hidráulica do solo. O tratamento que apresentou maior condutividade hidráulica, nas duas profundidades avaliadas, foi o sistema plantio direto submetido à subsolagem mecânica (PD-M), sobretudo da profundidade de 0,0-0,05 mm, onde as alterações na porosidade e na estrutura foram mais visíveis. Na profundidade 0,05-0,10 m, o efeito dos sistemas de cultivo sobre o solo seguiu a mesma tendência que na primeira camada, mas as taxas de condutividade foram drasticamente reduzidas nos dois tratamentos.

Tabela 8. Valores médios de condutividade hidráulica saturada (K_0) para os sistemas de cultivo em duas profundidades de coleta.

Profundidade (m)	$K_0, \text{cm h}^{-1}$	
	PD ¹	PD-M ²
0,00-0,05	13,3	15,2
0,05-0,10	0,9	1,7

¹ PD = sistema plantio direto de longa duração;

² PD-M = sistema plantio direto com subsolagem mecânica;

3.2.3 Permeabilidade ao ar, porosidade de aeração e índice de continuidade de poros

3.2.3.1 Material e métodos

- **Permeabilidade ao ar**

Depois de medida a condutividade hidráulica saturada, as amostras indeformadas foram saturadas e após, submetidas à pressão, em mesa de tensão, aos seguintes potenciais mátricos: -0.5, -1.0, -2.0, -3.0, -5.0, -7.0, -10.0, -50.0 e -100.0 kPa. Para cada potencial aplicado foi quantificado o fluxo de ar. A partir da Lei de Darcy, a densidade de fluxo de ar (q) pode ser descrita pela equação (4):

$$q = -\frac{k_a}{\eta} \left(\frac{dP}{dz} + \rho g \right), \quad \text{Eq. (4)}$$

sendo, (k_a) a permeabilidade ao ar, (P) a pressão de ar, (z) a distância na direção do movimento de ar no sistema poroso, (η) a viscosidade do ar, (ρ) a densidade do ar e (g) a aceleração da gravidade.

A densidade de fluxo corresponde à vazão de ar (Q) por área perpendicular ao movimento do fluido (A_s) e, considerando como desprezível a influência da densidade do ar (SPRINGER et al., 1995), a equação (5) foi utilizada para as estimativas da k_a :

$$k_a = \frac{Q\eta}{A_s} \left(\frac{dz}{dP} \right), \quad \text{Eq. (5)}$$

- **Porosidade de aeração**

Depois de concluída a determinação do fluxo de ar, as amostras foram colocadas em estufa a 105°C durante período de 24 horas, para obtenção da massa seca e posterior cálculo da densidade do solo (D_s) a partir da equação 6:

$$D_s = \frac{MS}{V}, \quad \text{Eq. (6)}$$

Onde, MS, é a massa seca de solo e V o volume do anel.

A porosidade total e a porosidade de aeração foram obtidas pelas equações (7) e (8), respectivamente:

$$PT = 1 - \frac{D_s}{D_p}, \quad \text{Eq. (7)}$$

$$\varepsilon_a = PT - \theta, \quad \text{Eq. (8)}$$

sendo, (PT) a porosidade total do solo, (D_p) a densidade de partículas do solo, e (ε_a) a porosidade de aeração do solo, estimada considerando a densidade da água igual a 1,0 Mg m⁻³.

A densidade de partículas do solo foi determinada utilizando-se um picnômetro a gás (Hélio), modelo ACCUPYC 1330 (Micromeritics Instrument Corporation®). Para tanto, foram processados, aproximadamente, 8 g de terra fina seca em estufa de uma amostra composta obtida da quantidade total de solo coletado, em triplicatas.

- **Índice de continuidade de poros**

A continuidade de poros do solo foi avaliada pela relação entre as propriedades físicas (k_a) e (ε_a), sendo utilizada a equação de Kozeny-Carman, conforme Ball, Sullivan e Hunter (1988):

$$k_a = M(\varepsilon_a)^N, \quad \text{Eq. (9)}$$

sendo, M e N os coeficientes de ajuste do modelo.

Os valores do parâmetro N, utilizado como um índice de continuidade de poros (BALL; SULLIVAN; HUNTER, 1988; ROSEBERG; McCOY, 1990), foram estimados mediante a linearização da equação de Kozeny-Carman:

$$\log(k_a) = \log(M) + N \log(\varepsilon_a), \quad \text{Eq. (10)}$$

A relação linear da Eq. 10 pode ser caracterizada pelos parâmetros indicados na Figura 11: o slope (N), o intercepto com o eixo $\log K_a$ no qual $\log \varepsilon_a = 0$ (M), e o intercepto com o eixo $\log \varepsilon_a$ em que $\log K_a = 0$ (ε_b). O intercepto com o eixo $\log \varepsilon_a$ (onde $K_a = 1 \mu\text{m}^2$) é denominado de conteúdo de ar limitante e foi proposto por Ball et al. (1988) e Schjønning et al. (2002) como a quantidade de poros de aeração bloqueados no solo que não faz parte do transporte convectivo do ar. Deste modo, ε_b é o valor de ε_a abaixo do qual o fluxo de ar através do solo cessa devido à descontinuidade na rede de poros de aeração, e pode ser obtido a partir da Eq. 9 pela Eq. 11.

$$\varepsilon_b = 10^{\frac{-\log M}{N}} \quad \text{Eq. (11)}$$

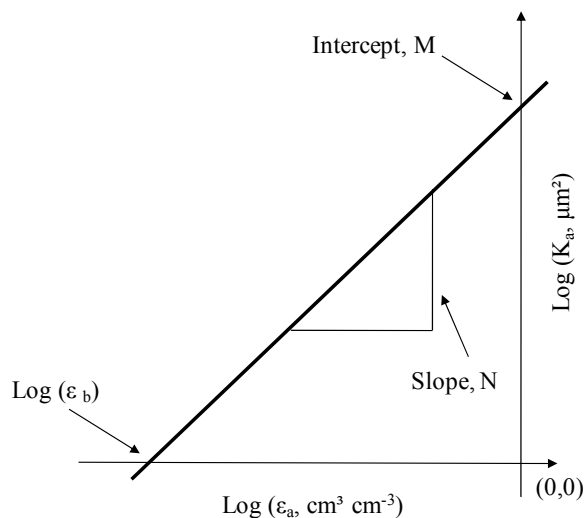


Figura 10. Principais características da relação \log (conteúdo volumétrico de ar, ε_a) – \log (permeabilidade ao ar K_a); slope N , intercepto com o eixo $\log (K_a)$, M e o limite do conteúdo de ar, ε_b .

Outro índice de continuidade de poros K_1 proposto por Groenevelt et al. (1984) também foi calculado com base na relação entre K_a e ε_a :

$$K_1 = \frac{K_a}{\varepsilon_a} \quad \text{Eq. (12)}$$

Groenevelt et al. (1984) relataram que solos que apresentam distribuição de tamanho e continuidade de poros semelhantes têm valores equivalentes de K_1 .

- **Análise dos dados**

O intervalo de confiança da média será adotado como critério estatístico para discriminação e comparação do efeito da subsolagem mecânica e o plantio direto não mobilizado na permeabilidade ao ar e nos índices de continuidade de poros. Quando não ocorrer sobreposição dos limites superior e inferior dos intervalos de confiança, não haverá diferenças significativas entre tratamentos e/ou profundidades.

A normalidade dos dados de permeabilidade ao ar (K_a) será testada usando o teste de normalidade de Shapiro e Wilk (1965). Caso não seja detectada normalidade nos dados, os logaritmos de K_a serão utilizados para tornar as distribuições mais próximas da normalidade (BALL et al., 1988; BLACKWELL et al., 1990).

3.2.3.2 Resultados

Os resultados obtidos ainda estão sendo analisados.

3.2.4. Análise visual da qualidade da estrutura do solo

3.2.4.1. Material e métodos

Em outubro de 2009 e 2010 realizou-se a análise avaliação visual da qualidade da estrutura do solo com a participação do Dr. Bruce Ball (Figuras 4a e b).



Figura 4. Procedimento de coleta e análise visual da qualidade da estrutura do solo.

De cada parcela experimental foram retiradas, com o auxílio de uma pá reta e em mini-trincheiras, amostras indeformadas de solo em forma de blocos. Foram coletadas três amostras da camada superficial do solo (0.15m largura x 0.30m profundidade x 0.10m espessura), totalizando 12 repetições por tratamento. A avaliação visual da estrutura do solo apoiou-se na aparência, resistência e características das unidades estruturais do blocos de solo, sendo definida por cinco escores visuais (S_q) para classificação da qualidade: de $S_q=1$ (melhor qualidade estrutural) a $S_q=5$ (pior qualidade estrutural). A atribuição de escores e o cálculo do escore final foram realizados conforme a chave de classificação proposta por Ball et al. (2007) (método VESS).

3.2.4.2 Resultados

Os resultados obtidos até o momento permitiram identificar até quatro camadas distintas em termos de qualidade da estrutura do solo, embora fossem mais comuns apenas duas camadas. Os escores de qualidade da estrutura do solo (S_q) geralmente aumentaram com a profundidade, demonstrando perda de qualidade entre 10 e 25 cm de profundidade, atingindo níveis considerados críticos para o desenvolvimento das plantas

(Sq 3 a 4). No entanto, muitas raízes estavam presentes e não foram observadas diferenças significativas de rendimento entre os tratamentos. A camada superficial, comumente com Sq 1 ou 2, apresentava apenas uns poucos centímetros de espessura (de 3 a 7 cm) e os escores atribuídos às áreas sob rodados dos tratores apresentavam Sq próximo de 4. Em 2009, o tratamento PD-M apresentou escores significativamente menores do que o sistema plantio direto e o efeito desse mesmo tratamento para 2010 não produziu diferenças significativas entre o PD ($F(2,66) = 0,13, p > 0,05$).

3.2.5 Diagnose foliar e análises químicas do solo

Em janeiro 2010, por ocasião do aparecimento da inflorescência feminina na cultura do milho, foi retirado o terço médio da folha imediatamente abaixo e oposta à espiga para fins de diagnose foliar e amostragem de solo para a determinação de atributos químicos. Procedimento similar foi realizado em janeiro de 2011 para a cultura da soja.

Em função de problemas de saúde enfrentados pelo pesquisador responsável pelas análises químicas do solo e diagnose foliar das culturas, os resultados serão apresentados no relatório subsequente.

3.2.6 Produtividade de grãos

3.2.6.1 Material e métodos

A produtividade de grãos (milho) e de soja referentes às safras de primavera/verão (2009/2010 e 2010/2011) foi determinada em três pontos aleatoriamente distribuídos dentro de cada unidade experimental. Para o milho, cada ponto de coleta correspondeu a duas linhas de milho com quatro metros de comprimento cada uma (área amostral colhida de $6,4 \text{ m}^2$). No caso da soja, cada ponto de coleta correspondeu a quatro linhas de soja com quatro metros de comprimento cada uma (área colhida de $7,2 \text{ m}^2$).

3.2.6.2 Resultados

Os resultados obtidos na safra de primavera/verão (2009/2010) demonstraram que a subsolagem mecânica (PD-M) efetuada no solo sob plantio direto de longa duração não afetou a produtividade de milho (grãos) e apresentou resultados similares ao tratamento não subsolado (PD). Cabe destacar que as taxas de precipitação pluvial ocorridas no período (Figura 1) superaram as médias históricas, o que pode ter minimizado o efeito dos tratamentos de solo sobre a produtividade dessa cultura.

Os resultados obtidos na safra de primavera/verão (2010/2011) demonstraram que a subsolagem mecânica (PD-M) também não afetou a produtividade de soja (grãos) e apresentou resultados similares ao tratamento não subsolado (PD).

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O projeto coletou uma série muito grande de amostras no período, o que demanda uma avaliação cuidadosa dos dados e análise complexa dos resultados obtidos. Esse relatório procurou ressaltar os resultados e uma discussão mais detalhada deverá ser implementada nos próximos meses com o objetivo de gerar trabalhos científicos que serão submetidos aos periódicos mais relevantes na Ciência do Solo.

4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BALL, B.C.; P. SCHJØNNING. 2002. Air permeability. p. 1141–1158. *In* J.H. Dane and G.C. Topp (ed.) Methods of soil analysis. Part 4. SSSA Book Ser. 5. SSSA, Madison, WI.
- BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. *In*: Klute, A. (Ed.) Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods. 2. Ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. Cap.13, p. 363-375.
- BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. *Agricultural Society of Agricultural Engineers*, v.33, p.519-524, 1990.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ - IAPAR. Mapa de Solos do Estado do Paraná: legenda atualizada. BHERING, S.B.; SANTOS, H.G. dos (Eds.). Rio de Janeiro: Embrapa Solos: Embrapa Florestas: Instituto Agrônômico do Paraná, 2008. 74p.
- INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ – IAPAR. Cartas climáticas do Paraná: edição ano 2000, versão 1.0. Londrina, 2000. CD-ROM.
- KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. *In*: Klute, A. (Ed.) Methods of soil analysis. 2.ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. 1:635-662.
- LEÃO, T.P.; SILVA, A.P.; MACEDO, M.C.M.; IMHOFF, S. & EUCLIDES, V.P.B. Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. *R. Bras. Ci. Solo*, 28:415-423, 2004.
- REYNOLDS, W.D.; ELRICK, D.E. Pressure infiltrometer. *In*: DANE, J.H.; TOPP, G.C., Editors, Methods of Soil Analysis, Part 4: Physical Methods, Number 5 in the Soil Science Society of America Book Series, Madison, Wisconsin, 2002. p.826–836.
- TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. & LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 22:573-581, 1998.
- VAN GENUCHTEN, M.TH. A Closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:892-898, 1980.

5 ANEXO

Com dados do projeto foi escrita, pela aluna Sâmala Glícia Carneiro Silva, uma dissertação de mestrado defendida no PPG Solos e Nutrição de Plantas da ESALQ/USP, cujos principais resultados foram submetidos para publicação na Revista Brasileira de Ciência do Solo, conforme o texto abaixo.

EFEITO TEMPORAL DA ESCARIFICAÇÃO SOBRE A DENSIDADE DO SOLO E O GRAU DE COMPACTAÇÃO EM LATOSSOLO SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO¹

Sâmala Glícia Carneiro Silva²; Álvaro Pires da Silva^{3*}; Neyde Fabíola Balarezo Giarola⁴; Cássio Antônio Tormena⁵ & João Carlos de Moraes Sá⁶

RESUMO

A escarificação mecânica tem sido empregada para amenizar os efeitos da compactação em solos manejados sob sistema plantio direto (SPD). No entanto, não está clara a duração dos seus efeitos sobre as propriedades físicas do solo. O objetivo deste trabalho foi avaliar, durante um ano, o comportamento da densidade do solo (Ds) e do grau de compactação (GC) em profundidade após a escarificação de um solo sob SPD. A Ds e o GC foram avaliados em área sob SPD por 16 anos (PD), imediatamente após a escarificação (ESC), seis meses (ESC6M) e um ano após a escarificação (ESC12M). Nas camadas 0,0-0,10m, 0,10-0,20m e 0,20-0,30m verificou-se uma redução significativa da Ds em ESC e um aumento expressivo em ESC6M. Em ESC12M, constataram-se valores de Ds similares àqueles medidos antes da mobilização do solo. A escarificação provocou redução do GC nas camadas 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m, com o GC retornando aos valores originais um ano após a escarificação. Nos períodos ESC, ESC6M e ESC12M foram observados aumentos da Ds na camada 0,30-0,40 m em comparação com o PD. Os maiores valores de GC foram observados seis meses após a escarificação; porém o solo apresentou grande recuperação estrutural, possivelmente devido ao elevado grau de resiliência do solo e à influência dos ciclos de umedecimento e

¹Trabalho extraído da dissertação de mestrado do primeiro autor apresentada à Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ), da Universidade de São Paulo (USP). Recebido para publicação em março de 2011 e aprovado em de 201..

² Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, ESALQ/USP. E-mail: samalaglicia@gmail.com

³ Professor Titular, Departamento de Solos e Nutrição de Plantas, ESALQ/USP. Caixa Postal 09, Av. Pádua Dias 11, E-mail: apsilva@esalq.usp.br

⁴ Professor Associado, Departamento de Ciência do Solo e Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Ponta Grossa, UEPG, Av. General Carlos Cavalcanti, 4748, 84030-900, E-mail: neydef@uepg.br

⁵ Professor Associado, Departamento de Agronomia da Universidade Estadual de Maringá – UEM. Av. Colombo 5790, CEP 87020-900. Bolsista do CNPq. E-mail: catormena@uem.br

* Autor correspondente.

secagem constatados durante o período do estudo. Os efeitos da escarificação, avaliados pela Ds e GC apresentaram duração inferior a um ano, sugerindo que neste solo e condições experimentais pode-se suprimir o uso da escarificação para controle da compactação em SPD.

Termos de indexação: compactação do solo, semeadura direta, qualidade física do solo, propriedades físicas do solo, resiliência.

SUMMARY: *TEMPORAL EFFECTS OF CHISELING ON THE SOIL BULK DENSITY AND DEGREE OF COMPACTNESS IN A TYPIC HAPLUDOX UNDER NO-TILLAGE*

Mechanical chiseling has been used to alleviate the effects of soil compaction in soils managed under no-tillage (NT). However, it is not clear the duration of its effects on soil physical properties. The aim of this study was to evaluate, for a year, the behavior of soil bulk density (BD) and the degree-of-compactness (DC) in depth after chiseling of soil under NT. BD and GC were evaluated in area under NT for 16 years (PD), immediately after chiseling (CHI), six months (CHI6M) and one year after chiseling (CHI12M). In the layers 0.0-0.10 m, 0.10-0.20 m and 0.20-0.30 m there was a significant reduction in BD CHI and a marked increase in CHI6M. In CHI12M values were observed similar to those measured BD before tillage. In CHI12M were observed BD values similar to those measured before tillage. Chiseling caused reduction of DC in the layers 0.0-0.10 m and 0.10-0.20 m, with DC returning to the original values one year after chiseling. In periods CHI, CHI6M and CHI12M increases were observed in the BD layer 0.30-0.40 m compared with NT. The higher values of DC were observed six months after chiseling; nevertheless the soil showed great structural recovery, possibly due to the high degree of soil resilience and the influence of wet-dry cycles detected during the study period. The chiseling effects, evaluated by BD and DC showed duration less than one year, suggesting that in this soil and experimental conditions can suppress the chiseling for compaction control in NT.

Terms of indexation: soil compaction, no-tillage, soil physical quality, soil physical properties.

INTRODUÇÃO

O sistema plantio direto (SPD) tem sido adotado de maneira crescente devido às inúmeras vantagens econômicas e agrônômicas como a conservação do solo e da água e incremento da produtividade das culturas. O acúmulo de resíduos na superfície do solo gera maior quantidade de matéria orgânica, favorecendo a menor evaporação de água e melhorando a agregação do solo (Blanco-Canqui et al., 2010). Em SPD, pode ocorrer o aparecimento de camadas compactadas, principalmente nos primeiros 20 cm do solo, devido a ausência de revolvimento do solo e o tráfego sistemático de maquinários ao longo do tempo, favorecendo a reconsolidação natural das partículas (Reichert et al., 2003; Håkansson, 2005). Quando a pressão aplicada é maior do que a sua resistência interna, ocorre a compactação e a degradação na estrutura do solo, de modo que quanto maior for a capacidade de recuperação do solo menor será a persistência da compactação.

Operações de mobilização do solo como a escarificação têm sido cada vez mais frequentes para remover camadas compactadas que podem ocorrer nos solos sob SPD. A eficiência da descompactação mecânica está relacionada a diversos fatores, como o estado de compactação inicial, a umidade do solo no momento da operação, textura do solo, conteúdo de matéria orgânica e à aspectos ligados com as interações

entre o solo e o implemento utilizado. Apesar das melhorias que a escarificação pode promover nas propriedades físicas do solo (Camara & Klein, 2005), há evidências de que estes efeitos são de curta duração, variando de dois meses (Xu & Mermoud, 2001), um ano (Reichert et al., 2009) e até três anos (Busscher et al., 2002).

Entre os processos que influenciam a permanência dos efeitos da escarificação estão a resiliência do solo e a intensidade dos ciclos de umedecimento e secagem que ocorrem nos solos. A resiliência é definida como a habilidade do solo em recuperar sua integridade estrutural e funcional após uma perturbação externa (Seybold et al., 1999). A resiliência física do solo é composta por uma série de processos regenerativos que incluem os ciclos de umedecimento e secagem e a atividade biológica como o crescimento de raízes e atividade da fauna do solo (Gregory et al., 2007). A ação dos ciclos de umedecimento e secagem é mais intensa nas camadas mais superficiais do solo (até 20 cm), devido à maior concentração da atividade do sistema radicular das plantas, evaporação e quantidade de matéria orgânica (Horn & Dexter, 1989), o que confere maior resiliência ao solo. Em SPD, o incremento de matéria orgânica e nas camadas superficiais confere um elevado grau de resiliência do solo (Blanco-Canqui et al., 2009), especialmente quando associado com os resíduos culturais em virtude da elevada elasticidade e baixa densidade destes materiais (Thomas et al., 1996).

Para avaliar a influência da escarificação, a densidade do solo (D_s) é uma propriedade física utilizada para caracterizar o estado de compactação de um solo, por ser capaz de detectar modificações de volume, fornecendo uma visão geral do estado do espaço poroso do solo (Silva et al., 1997). Entretanto, isoladamente a D_s é insuficiente para determinar o estado da qualidade física do solo em relação à ocorrência de compactação, o que torna necessária a utilização de parâmetros que eliminem as diferenças entre os solos (Lipiec & Håkansson, 2000). Desta forma, foi proposto um indicador do estado de compactação do solo identificado como grau de compactação (GC). O GC consiste na relação entre a densidade atual do solo e a densidade num estado padrão ou de referência, que corresponde à densidade de referência ou máxima do solo (D_{sref}). O GC é expresso em porcentagem, e permite comparar o estado de compactação de vários tipos de solos eliminando a interferência da textura. A D_{sref} pode ser obtida pelo teste de Proctor (Ferrerias et al., 2001; Beutler et al., 2005; Klein et al., 2009; Blanco-Canqui et al., 2009) ou pelo ensaio de compressão uniaxial utilizando como referência a pressão de 200 kPa (Håkansson, 1990; Lipiec et al., 1991; Silva et al., 1997). O teste de Proctor apresenta valores de D_{sref} superiores quando comparado ao ensaio de compressão uniaxial, o que pode superestimar o GC (Håkansson, 1990; Håkansson e Lipiec, 2000), pois a energia aplicada ao solo pelo teste de Proctor corresponde a 560 kPa, ou seja, quase três vezes maior do que a aplicada pelo teste de compressão uniaxial.

Em solos sob SPD, há evidências de que valores elevados de GC são menos prejudiciais ao desenvolvimento das plantas (Reichert et al., 2009), porém são poucas as pesquisas no Brasil que relacionam o grau de compactação com o comportamento de propriedades físicas em SPD (Suzuki et al., 2007; Reichert et al., 2009), sendo necessários mais estudos para melhor compreensão da dinâmica do GC em função do manejo do solo ao longo do tempo. O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da escarificação mecânica

sobre a densidade do solo (Ds) e o grau de compactação (GC) em um Latossolo Vermelho manejado sob SPD, em diferentes períodos de tempo depois da mobilização e em diferentes camadas do solo.

MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada na fazenda escola da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), estado do Paraná, localizada a 25°05'52'' de latitude sul e 50°02'43'' de longitude oeste e altitude média de 1.080 metros. O regime climático predominante da região segundo a classificação de Köppen é mesotérmico subtropical úmido (Cfb), com temperatura média anual de 18,7°C e precipitação média anual de 1.600 mm (IAPAR, 2000). O solo da área de estudo foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico (EMBRAPA, 2008), pertencente à classe textural argilosa (Quadro 1). A textura foi determinada segundo o método do densímetro (Gee & Bauder, 1986) e a densidade de partículas foi obtida através do picnômetro de gás hélio.

O estudo foi realizado utilizando quatro parcelas experimentais com dimensões de 9 x 50 m² conduzidas sob SPD por dezesseis anos consecutivos. A rotação de culturas comumente utilizada na área é a seguinte: milho (*Zea mays* L.) e soja (*Glycine max* L.) no período primavera/verão e trigo (*Triticum aestivum* L.) e consórcio aveia preta (*Avena strigosa* Schreb.) + ervilhaca (*Vicia sativa* L.) no outono/inverno, em rotação. A mobilização do solo foi feita com o auxílio de um subsolador com cinco hastes (três na barra dianteira e duas na traseira) de formato parabólico e ponteira em cinzel, com espaçamento de 0,25 m entre hastes. A profundidade atingida pela operação foi de 0,25 m e a umidade média das parcelas no momento da mobilização foi 0,29 kg kg⁻¹ correspondendo a uma umidade abaixo da capacidade de campo, que era de 0,38 kg kg⁻¹.

As seguintes épocas foram avaliadas como tratamentos: plantio direto (PD), imediatamente após a escarificação (ESC), seis meses (ESC6M) e um ano após a escarificação (ESC12M), em quatro profundidades: 0,0-0,10 m; 0,10-0,20 m; 0,20-0,30 m e 0,30-0,40 m. Em cada época foram coletadas amostras em três pontos, casualizados na parcela, totalizando 48 amostras. Em cada ponto foram coletadas amostras indeformadas em anéis metálicos de aproximadamente 100 cm³ no centro de cada camada com o auxílio de um amostrador eletro-mecânico que permite a coleta de amostras de solos sem aplicação de golpes, com velocidade constante de introdução do anel no solo de 2 mm s⁻¹ (Figueiredo, 2010).

As amostras foram devidamente preparadas no laboratório, posteriormente foram pesadas para obter a massa úmida e em seguida foram colocadas em estufa à 105°C por 24 horas. Após a obtenção da massa de solo seco foi determinada a densidade do solo (Blake e Hartge, 1986). O grau de compactação do solo (GC) foi calculado através da equação: $GC = 100 * Ds / Dsref$, em que Ds é a densidade do solo e Dsref é a densidade de referência obtida pela aplicação de determinada carga ou pressão.

A metodologia de obtenção da Dsref foi adaptada da proposta por Håkansson (1990). Para a determinação da Dsref anéis de 7 cm de diâmetro por 2,5 cm de altura foram preenchidos com terra fina seca ao ar (TFSA) passada em peneira de 2 mm, com três repetições por camada. As amostras foram saturadas com água por 24 horas e posteriormente submetidas ao ensaio de compressão uniaxial à pressão de 200 kPa. O tempo de compressão adotado foi de 10 minutos, tempo suficiente para que mais de 99% da compactação máxima seja alcançada (Silva et al., 2000). Na Figura 1 se encontram os valores obtidos de Dsref para cada

camada avaliada. Foi utilizado um consolidômetro descrito em Figueiredo et al. (2010), cuja aplicação da pressão é feito através de carga pneumática. Ao final do ensaio, as amostras foram levadas para a estufa a 105°C para obtenção da massa de solo seco.

Para a discriminação e comparação dos efeitos da escarificação sobre a Ds e o Gc, nas diferentes épocas avaliadas, utilizou-se como critério estatístico o intervalo de confiança da média (Payton et al., 2000), o qual considera duas épocas significativamente diferentes quando não ocorre sobreposição dos limites superior e inferior.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores de densidade do solo (Ds) sob SPD (Figura 2) se encontram dentro do intervalo normal para solos argilosos, o qual varia entre 0,9 a 1,2 Mg m⁻³ (Reynolds et al., 2007). Não houve diferenças significativas da Ds nas camadas 0,0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, as quais diferem da camada de 0,30-0,40 m, na qual se verificou menor densidade do solo. A camada 0,10-0,20 m apresentou o maior valor de densidade do solo, em virtude do não revolvimento do solo e o conseqüente acúmulo das pressões exercidas pelo tráfego de máquinas e implementos agrícolas sobre a superfície do solo ao longo do tempo em SPD (Abreu et al., 2004; Suzuki et al., 2007).

Nas camadas avaliadas não foram encontrados valores limitantes de Ds ao desenvolvimento das plantas; Reichert et al. (2003) sugerem que a faixa considerada crítica para o crescimento das raízes em solos argilosos situa-se entre 1,30 e 1,40 Mg m⁻³. Cavalieri et al. (2009) observaram, em solo similar ao deste estudo, um pequeno aumento da densidade do solo em virtude da persistência de camadas adensadas no manejo utilizado anteriormente à implantação do SPD. Longos períodos de utilização de sistemas conservacionistas propiciam melhor funcionamento do sistema poroso do solo e aumentam a sua estabilidade. De acordo com Horn (2004), como os ciclos de umedecimento e secagem são mais intensos e freqüentes, a melhoria do sistema poroso pode ser detectada em poucos anos de utilização do SPD, mesmo em camadas mais profundas do solo.

Na camada 0,0-0,10 m, logo após a escarificação houve uma redução significativa da Ds (Figura 3). Entretanto, seis meses após a escarificação constatou-se um aumento de 20% na Ds, permanecendo praticamente constante após um ano, mostrando tendência de estabilização. A deformação do solo pelos ciclos de umedecimento e secagem e a desintegração de agregados podem promover aumento da densidade do solo logo após uma mobilização mecânica (Xu & Mermoud, 2001). Os ciclos de umedecimento e secagem são mais intensos nas camadas superficiais do solo (até 30 cm), devido à maior concentração da atividade do sistema radicular das plantas e quantidade de matéria orgânica (Horn & Dexter, 1989), o que confere maior resiliência, fazendo com que o solo se recupere mais rapidamente de um distúrbio. Processos biológicos tais como a penetração de raízes e a atividade de microrganismos também têm um importante efeito regenerativo da compactação do solo, especialmente nas camadas superficiais do solo (Gregory et al., 2007).

Para a camada seguinte, em 0,10-0,20 m (Figura 3) manteve-se o padrão de redução da Ds verificada em PD logo após a escarificação, com um considerável incremento da Ds seis meses após a escarificação. Contudo, doze meses após a escarificação, os valores de Ds se assemelham com aqueles observados antes da

escarificação, confirmando a pouca eficiência da escarificação em reduzir a densidade do solo. Uma provável causa seria a maior intensidade do processo de resiliência que ocorreu neste solo. A resiliência física do solo tem origem em uma série de processos regenerativos (Gregory et. al., 2007), e nas condições em que este trabalho foi desenvolvido podemos destacar a atividade biológica e ciclos de umedecimento e secagem. De acordo com Dexter (1997), quando um solo possui alta resiliência, após a aplicação de uma força, por exemplo, a porosidade do solo se recupera através de processos de expansão e contração, causados pelos ciclos naturais de umedecimento e secagem.

Na camada 0,20-0,30 m (Figura 3), não foram encontradas diferenças significativas na D_s entre antes e depois da escarificação, indicando que a escarificação realizada não mobilizou de forma eficiente esta camada. Depois de seis meses da escarificação, a densidade teve um aumento significativo, seguido de uma redução aos doze meses. Estes resultados são compatíveis com os de Araújo et al. (2004), os quais verificaram que, após a escarificação, houve perda da qualidade estrutural do solo, aumento da resistência à penetração, culminando com efeitos negativos na estrutura do solo. A maior resiliência de solos sob SPD pode ser atribuída à menor mobilização do solo, o que favorece o acúmulo de resíduos e de matéria orgânica (M.O.) nas camadas superficiais do solo (Blanco-Canqui et al., 2009; 2010), os quais, segundo Thomas et al. (1996), apresentam elevada elasticidade e baixa densidade.

Na camada mais profunda (0,30-0,40 m), a D_s antes da escarificação apresentou valor médio de $1,06 \text{ Mg m}^{-3}$, relativamente baixo para uma camada localizada a esta profundidade (Figura 3), comum no horizonte B de solos da classe dos Latossolos bem como indicando que os estresses aplicados pelas máquinas, provavelmente, ainda não haviam interferido na estrutura do solo desta camada. Imediatamente após a escarificação, ocorreu incremento da densidade, contrariando a expectativa de redução que vinha sendo constatada nas camadas anteriores. Após seis meses da escarificação a densidade atingiu o valor máximo para esta camada ($D_s = 1,25 \text{ Mg m}^{-3}$) com uma pequena redução aos doze meses ($D_s = 1,19 \text{ Mg m}^{-3}$). O aumento da densidade do solo em subsuperfície pode ser atribuído à ausência de camadas compactadas em superfície, causada pela escarificação, aumentando a transmissão da pressão para camadas mais profundas (Veiga et al., 2007). A presença de uma camada com maior D_s próximo à superfície (0,10-0,20 m – Figura 2) pode formar uma barreira protetora (“buffer”) que impede a transmissão das cargas aplicadas em superfície para camadas mais profundas do solo. Assim, estes resultados indicam que os possíveis efeitos benéficos da escarificação em reduzir a D_s em superfície propiciam aumento dos riscos de compactação do solo em subsuperfície, pelo menos em curto prazo. A intensidade e frequência de processos naturais de alívio da compactação, como ciclos de umedecimento e secagem diminuem bruscamente em subsuperfície, aumentando a persistência da compactação em maiores profundidades (Håkansson, 2005).

A influência dos ciclos de umedecimento e secagem na variação da densidade do solo após a escarificação pode ser observada na Figura 4. Foi considerado como um ciclo de umedecimento uma chuva de mais de 20 mm e a secagem após três dias sem precipitação. Verifica-se que, no período entre a escarificação realizada em maio de 2009 até a amostragem realizada em outubro de 2009, ocorreram aproximadamente dez ciclos de umedecimento e secagem. Durante o período de um ano, a última amostragem realizada em maio de 2010, foram verificados vinte e cinco ciclos de secagem e umedecimento. A redução de D_s na camada de

0,10-0,20 m entre EC6M e EC12M pode estar relacionada com a ocorrência dos ciclos de umedecimento e secagem, os quais segundo Hakånsson (2005) podem amenizar os efeitos da compactação, principalmente nas camadas mais superficiais. O incremento de Ds um ano após a escarificação do solo também foi verificada por Reichert et al. (2009) devido à consolidação do solo e à influência dos ciclos de umedecimento e secagem na reorganização da estrutura interna do solo. Um maior volume acumulado de precipitações também intensifica a reconsolidação do solo (Busscher et al., 2002; Vepraskas et al., 1995) reduzindo os efeitos da escarificação, o que também pode justificar os incrementos de Ds até ESC6M..

Na figura 5 observa-se que após a escarificação houve uma redução do GC na camada 0,0-0,10 m de 88% para 76%, valor este considerado baixo por Lindstrom & Voorhees (1994). Segundo Suzuki et al. (2007), baixos níveis de GC indicam que o solo está excessivamente solto, o que compromete a retenção de água. Seis meses após a escarificação o GC aumentou de 76% para 92%, e passados doze meses ocorreu uma pequena redução do GC, sugerindo a estabilização estrutural do solo. A ampla variação do grau de compactação pode ter sido causada pela consolidação do solo em função da precipitação acumulada e tráfego de máquinas, pela maior intensidade dos ciclos de umedecimento e secagem (Figura 4) e atividade biológica na camada superficial do solo, especialmente crescimento radicular das culturas, estabelecendo a rápida reconsolidação do solo após uma intervenção mecânica (Busscher et al., 2002; Araújo et al., 2004) e processos regenerativos da estrutura do solo.

Na camada 0,10-0,20 m verifica-se uma redução menos intensa no GC imediatamente após a escarificação, comparado com a camada de 0,0-0,10 m, reduzindo para 86% (Figura 5). O GC apresentou um aumento de 21% após seis meses da escarificação, alcançando valor de 97%, o que pode prejudicar a curto e médio prazo o rendimento das culturas, já que a faixa ideal de GC que proporciona os maiores níveis de produtividade segundo Håkansson (1990), Suzuki et al. (2007) e Reichert et al., (2009) está entre 80 e 90%. Um ano depois da escarificação o GC reduziu para 92%, retornando ao valor de GC do SPD não mobilizado. Estes resultados confirmam o efeito temporário da escarificação e a grande habilidade de recuperação física ou resiliência física deste solo sob SPD. Na camada de 0,20-0,30 m, o GC não sofreu alteração entre os períodos antes e logo após a escarificação (Figura 5). No entanto, seis meses após a escarificação, o GC apresentou um incremento significativo, que foi reduzido para 93% doze meses depois da mobilização. Em todos os períodos analisados, o GC manteve-se acima de 90%, indicando uma condição de alerta em relação à compactação. Nesta camada, a escarificação não foi efetiva em reduzir o GC e o incremento de GC entre EC e EC6M foi de magnitude similar àquele na camada de 0,10-0,20 m (Figura 4). A perda de carbono orgânico do solo pode ter contribuído para o significativo aumento de GC entre EC e EC6M, especialmente até a camada de 0,30 m..

Na camada de 0,30-0,40 m, o grau de compactação apresentou comportamento crescente, atingindo o máximo de 95% no período após seis meses da descompactação, e diminuindo para 90% após doze meses (Figura 5). Mesmo com a tendência de estabilização, o GC sofreu um incremento de 11% quando se compararam os períodos antes da escarificação e doze meses após a mesma. A camada 0,30-0,40m foi a que sofreu maior compactação, pois ao final de um ano, o valor de GC permaneceu maior do que antes da escarificação. Este incremento no GC pode estar associado a efetiva transmissão de cargas aplicadas no solo

durante o período experimental devido a remoção de camadas com maior resistência à compressão pelo processo de mobilização do solo.

Durante o período de condução do experimento o volume de precipitação foi elevado, o que associado a textura argilosa do solo, proporciona condição de umidade do solo elevada por períodos mais longos de tempo. O aumento do GC em relação ao estado original pode ter sido provocado pela maior susceptibilidade do solo a deformações plásticas com alta umidade no solo (Gregory et al., 2007), motivada pelo tráfego de máquinas e outros processos que promovem a reconsolidação do solo. Em solos sob SPD, a ausência de revolvimento com o contínuo tráfego de máquinas favorece o acúmulo dos efeitos da compactação, porém isso parece ser compensado em parte pela maior estabilidade da rede de macroporos, que após longo tempo de implantação e adequada condução do SPD propicia um equilíbrio dinâmico entre processos repetidos de compactação e processos naturais de descompactação (Håkansson, 2005). Além disso, de acordo com Blanco-Canqui et al. (2009), o contínuo aporte de carbono na superfície dos solos sob SPD reduzem a suscetibilidade à compactação. No entanto, os solos sob SPD têm apresentado compactação superficial, principalmente na camada de 0,10 até aproximadamente 0,30 m (de Maria, et al., 1999), o que se confirma neste trabalho, pois os maiores valores de GC foram encontrados neste intervalo de profundidade. Em relação ao GC, vale ressaltar que o emprego do teste de Proctor para obtenção da D_{smax} gera valores maiores do que o teste de compressão uniaxial, resultando em maiores valores de GC do que com a utilizada originalmente por Håkansson (1990).

Os resultados indicam que valores de GC apresentaram uma elevada variabilidade temporal neste solo e que valores de $GC > 90\%$ ocorreram apenas parcialmente durante o período experimental. Verifica-se também que o GC apresenta um comportamento decrescente após EC6M, indicando uma fase de estabilização em direção aos valores originais de GC especialmente nas camadas até 30 cm de profundidade. Considerando que o teste de compressão uniaxial foi utilizado para estabelecer o GC, pode-se sugerir que não foram encontrados indícios da existência de severa compactação, pois os valores de GC estão situados em torno de 90%, valor que de acordo com Reichert et al. (2009) ainda não atingiu valor crítico de compactação limitante às plantas. Em um Latossolo Vermelho distrófico sob SPD escarificado, Klein et al. (2009), utilizando o teste de Proctor para definir o GC, afirmam que em valores superiores a 85% as condições físicas do solo começam a limitar o pleno desenvolvimento das plantas. O solo estudado parece ter maior tolerância a valores mais elevados de GC, sugerindo que o valor ótimo de GC varia de acordo com o solo e regime hídrico local.

Pesquisas realizadas por Torres e Saraiva (1999) na região norte do estado, também utilizando o teste de Proctor, mostram que o rendimento da soja decresceu a partir de GC de 84%, porém os autores ressaltam que o tipo de solo, de clima e a sensibilidade de cada espécie à compactação do solo, podem fazer com que os valores do grau de compactação prejudiciais ao desempenho das culturas sejam distintos de acordo com a situação do ambiente. Os resultados obtidos mostram que a efetividade da escarificação foi parcial e temporária, visto que dentro do período de um ano, devido à rápida reconsolidação do solo, os valores de GC nas camadas até 0,30 m não se diferenciaram do plantio direto consolidado. A importância da monitoração da passagem de máquinas em condições adequadas de umidade constitui em fator decisivo para evitar o surgimento de camadas compactadas e a eventual perda da qualidade física do solo em SPD.

CONCLUSÕES

1. Em curto prazo, a escarificação do solo manejado sob SPD reduziu a densidade do solo e o grau de compactação, porém verificou-se incremento nestas variáveis seis meses após a escarificação;
2. A partir de seis meses após a escarificação não foram observados efeitos da escarificação na densidade do solo e no grau de compactação;
3. Os resultados sugerem que não haveria necessidade de realizar a escarificação no solo estudado.

LITERATURA CITADA

ABREU, S.L.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 28:519-531, 2004.

ARAUJO, M. A.; TORMENA, C. A.; INOUE, T. T.; COSTA, A. C. S. Efeitos da escarificação na qualidade física de um Latossolo Vermelho distroférico após treze anos de semeadura direta. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 28: 495-504, 2004.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; ROQUE, C.G.; FERRAZ, M.V. Densidade relativa ótima de Latossolos Vermelhos para a produtividade de soja. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 29: 843-849, 2005.

BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis*. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, 1986. p. 363-375.

BLANCO-CANQUI, H. ; STONE, L. R. ; SCHLEGEL, A. J.; BENJAMIN, J. G.; VIGIL, M. F.; STAHLMAN, P. W. Continuous cropping systems reduce near-surface maximum compaction in no-till soils. *Agron. J.*, 102: 1217-1225, 2010.

BLANCO-CANQUI, H.; STONE, L.R.; SCHLEGEL, A.J.; LYON, D.J.; VIGIL, M.F.; MIKHA, M.M.; STAHLMAN, P.W.; RICE, C.W. No-till induced increase in organic carbon reduces maximum bulk density of soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 73:1871-1879, 2009.

BUSSCHER, W.J.; BAUER, P.J.; FREDERICK, J.R. Recomposition of a coastal loamy sand after deep tillage as a function of subsequent cumulative rainfall. *Soil Till. Res.*, 68:49-57, 2002.

CAMARA, R.K.; KLEIN, V.A. Escarificação em plantio direto como técnica de conservação do solo e da água. *R. Bras. Ci. Solo*, 29:789-796, 2005.

CAVALIERI, K.M.V.; SILVA, A.P. da; TORMENA, C.A.; LEÃO, T.P.; DEXTER, A.R.; HÅKANSSON, I. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a Rhodic Ferrasol in Paraná, Brazil. *Soil Till. Res.*, 103:158-164, 2009.

DE MARIA, I.C.; CASTRO, O.M.; SOUZA DIAS, H. Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em Latossolo Roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 23:703-709, 1999.

DEXTER, A. R. Physical properties of tilled soils. *Soil Till. Res.*, 43:41-63, 1997.

EMBRAPA. INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. Mapa de solos do Estado do Paraná: legenda atualizada. Rio de Janeiro: Embrapa Solos; Embrapa Florestas; Instituto Agronômico do Paraná, 2008. 74 p.

FERRERAS, L. A.; BATTISTA, J. J. de; AUSILIO, A.; PECORARI, C. Parámetros físicos del suelo en condiciones no perturbadas y bajo laboreo. *Pesq. Agropec. Bras.*, 36:161-170, 2001.

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

GREGORY, A.S.; WATTS, C.W.; WHALLEY, W.R.; KUAN, H.L.; GRIFFITHS, B.S.; HALLETT, P.D.; WHITMORE, A.P. Physical resilience of soil to field compaction and the interactions with plant growth and microbial community structure. *Eur. J. Soil Sci.*, 58:1221-1232, 2007.

HÅKANSSON, I. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. *Soil Till. Res.*, 16:105-120, 1990.

HÅKANSSON, I. Machinery-induced compaction of arable soils: incidence - consequences - counter-measures. Uppsala: Division of Soil Management, 2005. 154 p. (Reports from the Division of Soil Management, 109).

HÅKANSSON, I.; LIPIEC, J. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. *Soil Till. Res.*, 53:71-85, 2000.

HORN, R. Time dependence of soil mechanical properties and pore functions for arable soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68:1131-1137, 2004.

HORN, R.; DEXTER, A.R. Dynamics of soil aggregation in an irrigated desert loess. *Soil Till. Res.*, 13:253-266, 1989.

IAPAR – INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. Cartas climáticas do Paraná: Edição ano 2000, versão 1.0. Londrina, CD-ROM.

KLEIN, V.A.; BASEGGIO, M.; MADALOSSO, T. Indicadores da qualidade física de um Latossolo Vermelho distrófico típico sob plantio direto escarificado. *Cienc. Rural*, 39:2475-2481, 2009.

LINDSTROM, M.J.; VOORHEES, W.B. Response of temperate crops in North America to soil compaction. In: SOANE, B.D.; OUWERKERK, C. van (Ed.). *Soil compaction in crop production*. London: Elsevier, 1994. p. 265-286.

LIPIEC, J.; HÅKANSSON, I. Influences of degree of compactness and matric water tension on some important plant growth factors. *Soil Till. Res.*, 53:87-94, 2000.

LIPIEC, J.; HÅKANSSON, I.; TARKIEWICZ, S.; KOSSOWSKI, J. Soil physical properties and growth of spring barley as related to the degree of compactness of two soils. *Soil Till. Res.*, 19: 307-317, 1991.

PAYTON, M.E.; MILLER, A.E.; RAUN, W.R. Testing statistical hypotheses using standard error bars and confidence intervals. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 31:547-551, 2000.

REICHERT, J.M.; KAISER, D.R.; REINERT, D.J.; RIQUELME, U.F.B. Variação temporal de propriedades físicas do solo e crescimento radicular de feijoeiro em quatro sistemas de manejo. *Pesq. Agropec. Bras.*, 44:310-319, 2009.

REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. *Ci. Amb.*, 27:29-48, 2003.

REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; HORN, R.; HÅKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil Till. Res.*, 102:242-254, 2009.

REYNOLDS, W.D.; DRURY, C.F.; YANG, X.M.; FOX, C.A.; TAN, C.S.; ZHANG, T.Q. Land management effects on the near-surface physical quality of a clay loam soil. *Soil Till. Res.*, 96: 316-330, 2007.

SEYBOLD, C. A.; HERRICK, J. E.; BREJDA, J. J. Soil resilience: A fundamental component of soil quality. *Soil Sci.*, 164:224-234, 1999.

SILVA, A.P. da; KAY, B.D.; PERFECT, E. Management versus inherent soil properties effects on bulk density and relative compaction. *Soil Till. Res.*, 44:81-93, 1997.

SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Suscetibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 24:239-249, 2000.

SUZUKI, L. E. A. S.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; LIMA, C. L. R. de. Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. *Pesq. Agropec. Bras.*, 42:1159-1167, 2007.

THOMAS, G.W.; HAZLER, G.R.; BLEVINS, R.L. The effects of organic matter and tillage on maximum compactibility of soils using the Proctor test. *Soil Sci.*, 161:502-508, 1996.

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

VEIGA, M. da; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; KAISER, D.R. Short and long-term effects of tillage systems and nutrient sources on soil physical properties of a southern Brazilian Hapludox. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 32:1437-1446, 2008.

VEPRASKAS, M.J.; BUSSCHER, W.J.; EDWARDS, J.H. Residual effects of deep tillage vs. no-till on corn root-growth and grain-yield. *J. prod. agric.*, 3:401-405, 1995.

XU, D.; MERMOUD, A. Topsoil properties as affected by tillage practices in North China. *Soil Till. Res.*, 60:11-19, 2001.

Quadro 1. Distribuição do tamanho de partículas e densidade de partículas para as diferentes camadas avaliadas do Latossolo Vermelho distrófico.

Camada	Argila	Silte	Areia	Dp
m	-----g kg ⁻¹ -----			g cm ⁻³
0,0-0,10	506,2	52,4	441,4	2,54
0,10-0,20	518,4	53,3	428,3	2,58
0,20-0,30	512,3	54,3	433,4	2,59
0,30-0,40	520,5	54,4	425,1	2,60

Dp: densidade de partículas.

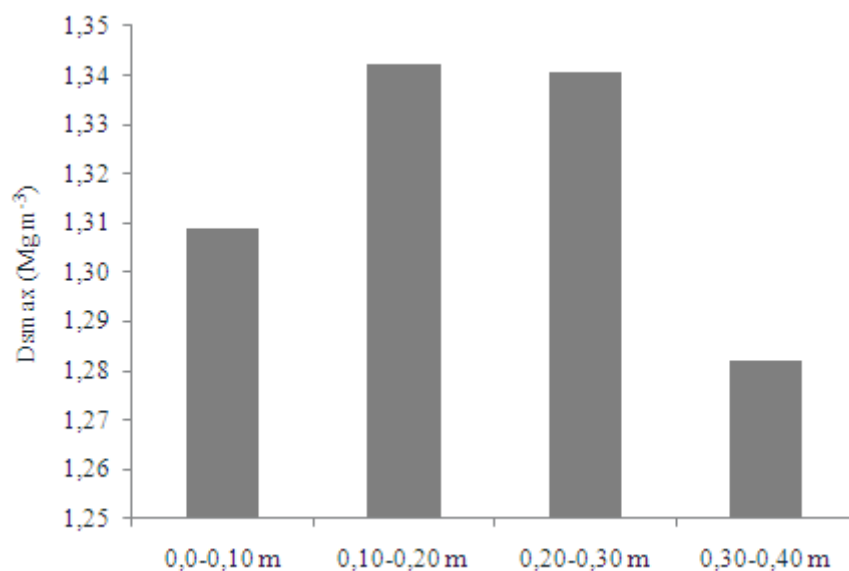


Figura 1. Valores de D_{sm ax} obtidos pelo teste de compressão uniaxial nas camadas avaliadas do Latossolo Vermelho distrófico sob SPD.

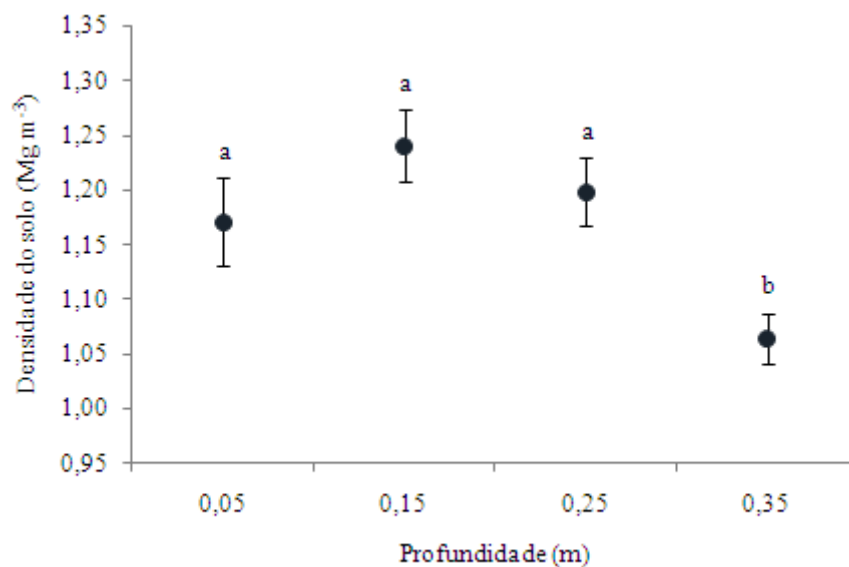


Figura 2. Valores médios de densidade do solo e seus respectivos intervalos de confiança da média antes da escarificação. Letras iguais indicam sobreposição dos intervalos de confiança da média (95%) nas diferentes profundidades avaliadas.

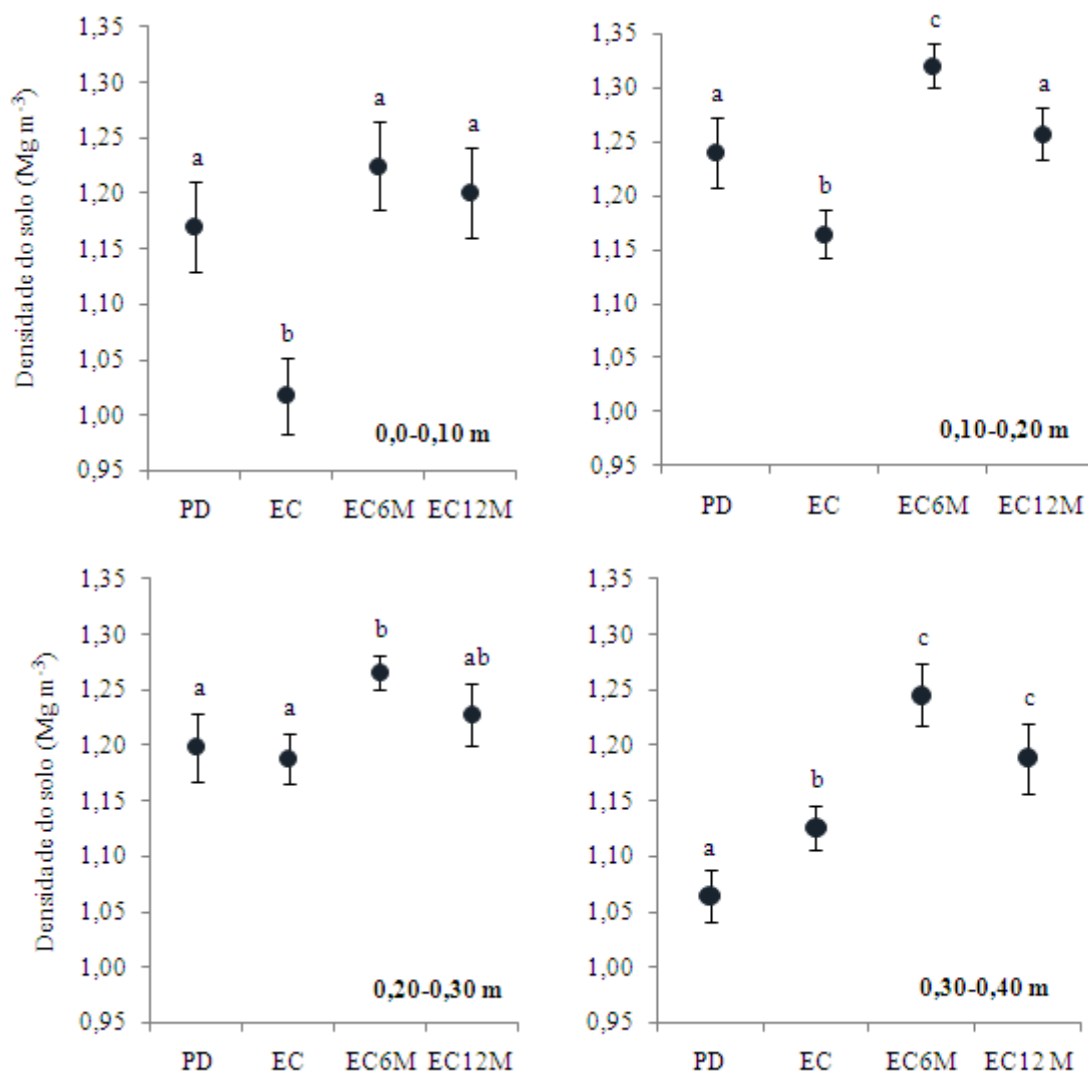
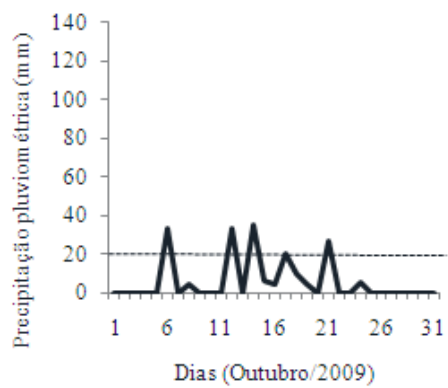
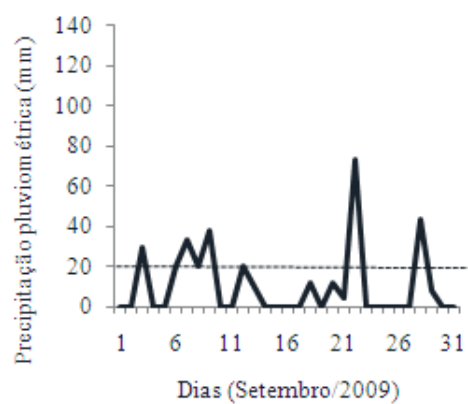
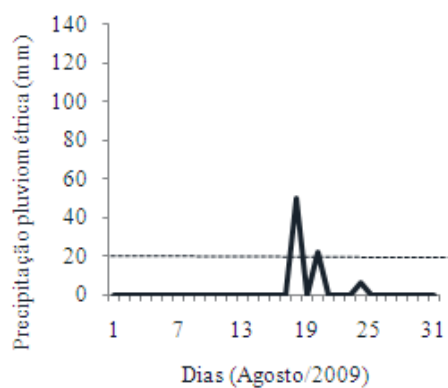
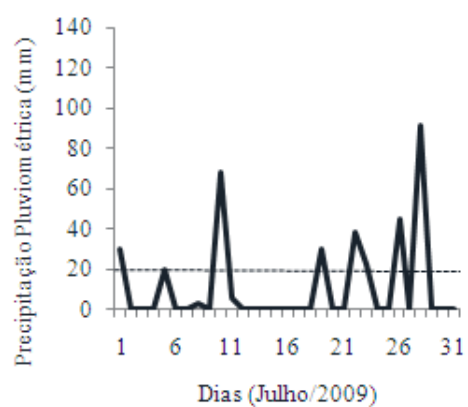
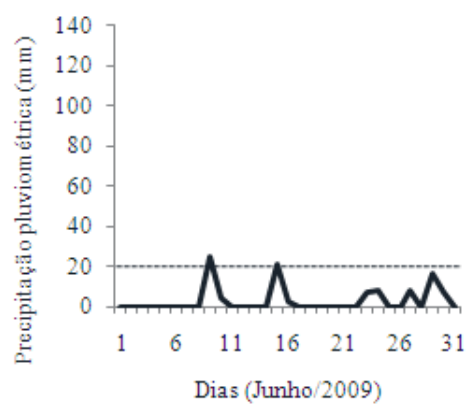
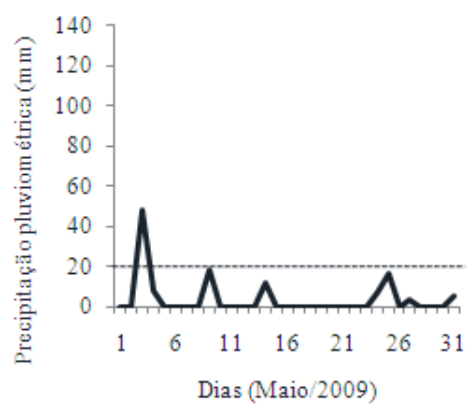


Figura 3. Valores médios e intervalos de confiança da média para a densidade do solo nas diferentes épocas de amostragem. PD: Plantio direto antes da escarificação; EC: Imediatamente após a escarificação; EC6M: seis meses após a escarificação; EC12M: doze meses após a escarificação. Letras iguais indicam sobreposição dos intervalos de confiança da média.



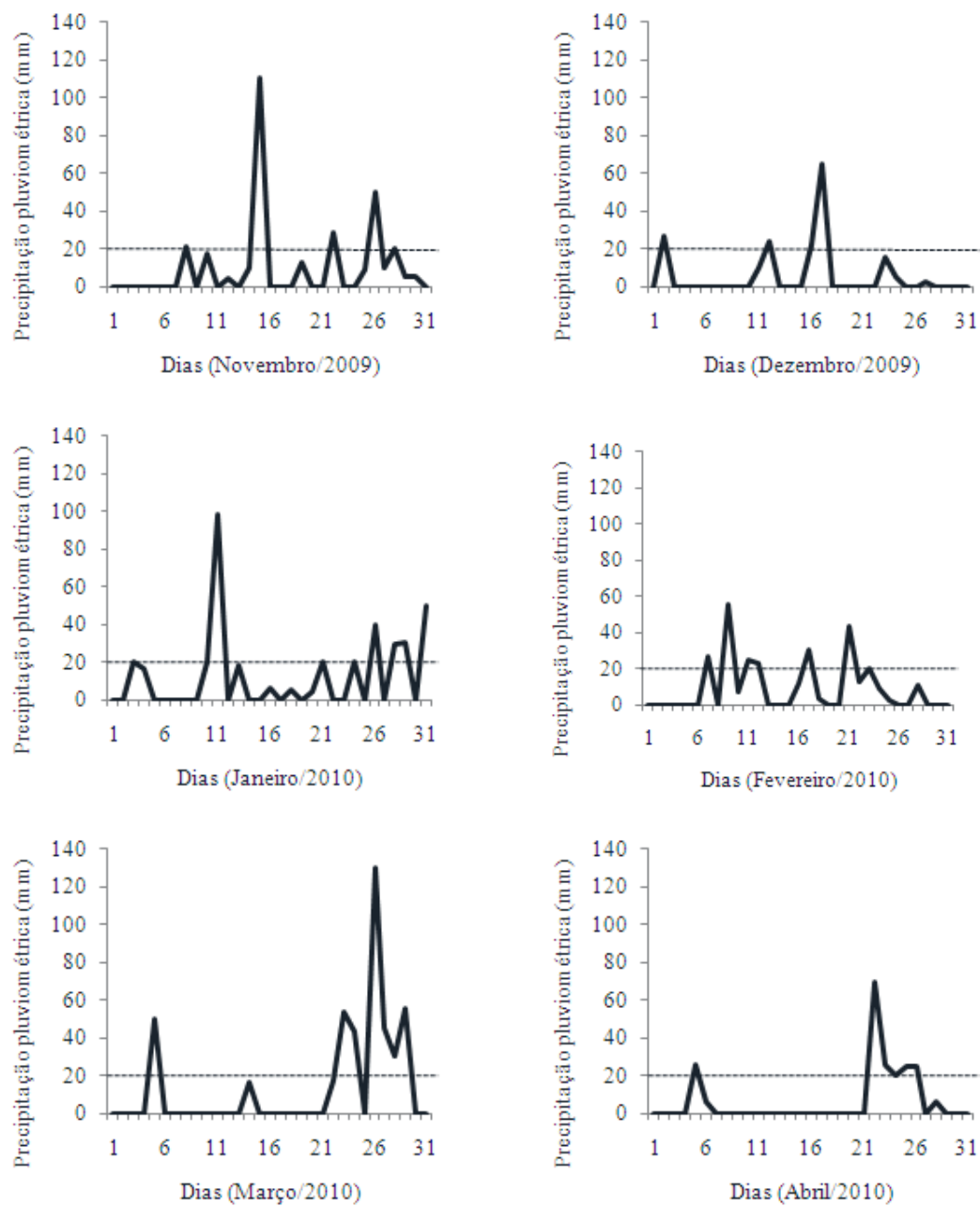


Figura 4. Precipitação pluviométrica diária durante o período do experimento. Picos de precipitação situados acima da linha pontilhada indicam a ocorrência de ciclos de umedecimento e secagem do solo.

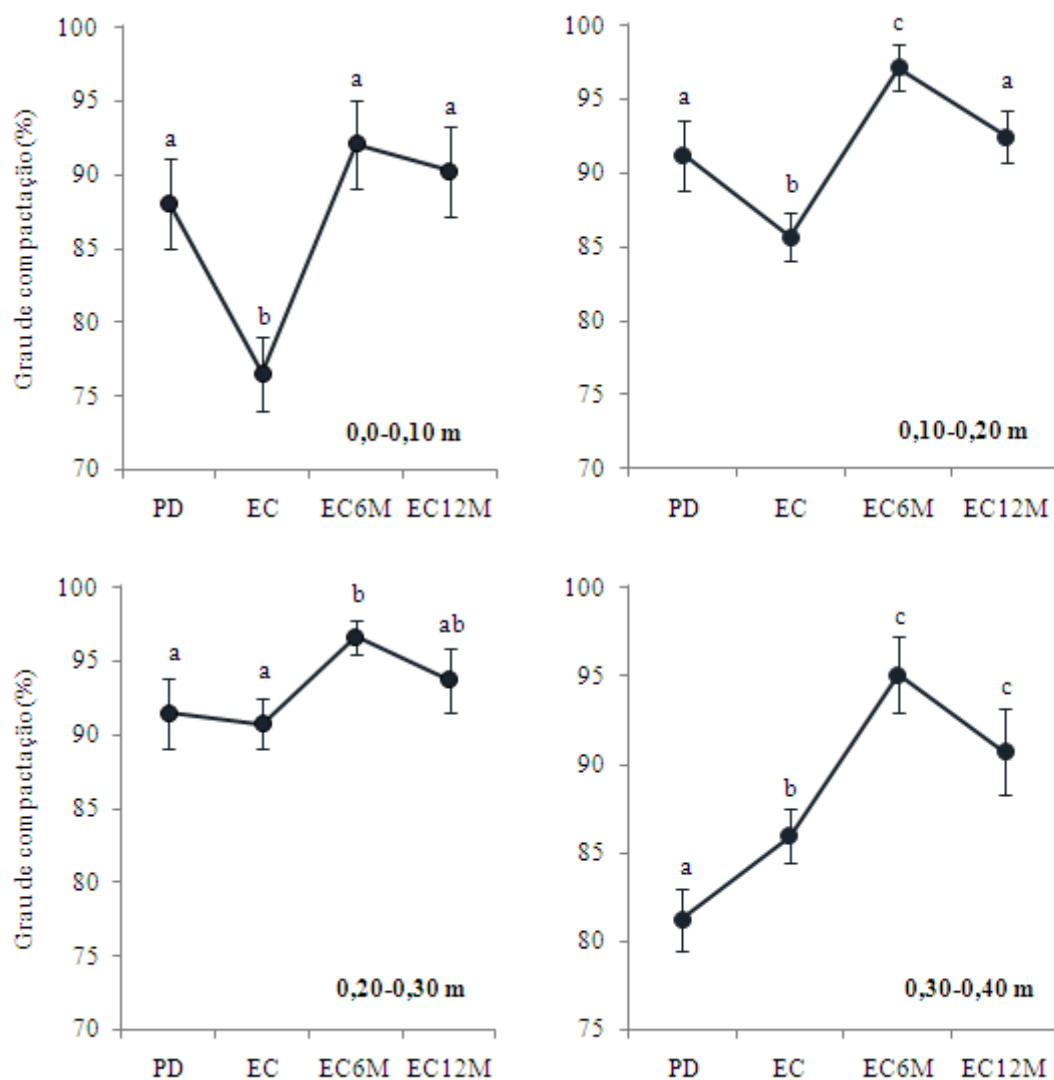


Figura 5. Valores médios e intervalos de confiança da média para o grau de compactação do solo nas diferentes épocas de amostragem. PD: Plantio direto antes da escarificação; EC: Imediatamente após a escarificação; EC6M: seis meses após a escarificação; EC12M: doze meses após a escarificação. Letras iguais indicam sobreposição dos intervalos de confiança da média.