

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 2010**

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	3
2	RESUMO DO PROJETO	3
3	ATIVIDADES REALIZADAS NO PERÍODO	4
3.1	LOCAL DO ESTUDO, INSTALAÇÃO E CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO	4
3.2	DETERMINAÇÕES ANALÍTICAS	11
3.2.1	ANÁLISE VISUAL DA QUALIDADE DA ESTRUTURA DO SOLO.....	11
3.2.1.1	Material e métodos	11
3.2.1.2	Resultados	12
3.2.2	CURVAS DE RETENÇÃO HÍDRICA, CURVAS DE RESISTÊNCIA DO SOLO E INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO	14
3.2.2.1	Material e métodos	14
3.2.2.2	Resultados	14
3.2.3	CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA	20
3.2.3.1	Material e métodos	20
3.2.3.2	Resultados	21
3.2.4	PERMEABILIDADE AO AR	21
3.2.4.1	Material e métodos	21
3.2.4.2	Resultados	22
3.2.5	PRODUTIVIDADE DE GRÃOS	26
3.2.5.1	Material e métodos	26
3.2.5.2	Resultados	26
3.2.6	ANÁLISE FOLIAR	26
3.2.6.1	Material e métodos	26
3.2.6.2	Resultados	27
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	29
5	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	29

1 INTRODUÇÃO

O presente relatório é referente às atividades de pesquisa realizadas durante o primeiro ano de execução (09/2009 a 09/2010) do projeto intitulado (DES) COMPACTAÇÃO DO SOLO EM ÁREAS SOB PLANTIO DIRETO VERSUS QUALIDADE FÍSICA, DINÂMICA DE NPK E RENDIMENTO DE CULTURAS e financiado pelo International Plant Nutrition Institute. 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 colaboração da equipe abaixo relacionada (Tabela 1).

Tabela 1. Equipe de trabalho, procedência e função dos participantes no projeto.

Nome	Instituição	Local	Função
Prof. Dr. Alvaro Pires da Silva	ESALQ/USP	Piracicaba, SP	Coordenador
Profa. Dra. Neyde F. B. Giarola	UEPG	Ponta Grossa, PR	Colaborador
Prof. Dr. Cassio Tormena	UEM	Maringá, PR	Colaborador
Dr. Bruce Ball	SAC	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

O sistema plantio direto (SPD) ocupa cerca de 95 milhões de hectares das áreas agrícolas do planeta, em função do controle eficiente das perdas de solo devido à erosão. No Brasil, o SPD foi difundido a partir de estudos realizados no estado do Paraná desde o começo dos anos 70 e ocupa, atualmente, cerca de 25 milhões de hectares. Vários fatores contribuem para a qualidade do SPD, destacando-se o domínio da tecnologia pelos agricultores, o grau de degradação antes da sua implantação, a produção de cobertura de

resíduos vegetais, o sistema de manejo cultural, dentre outros. O aumento da compactação do solo em sistemas de plantio direto tem sido verificado. O não-revolvimento do solo, aliado ao tráfego de máquinas, acarreta alterações na sua estrutura que, associadas à reduzida rugosidade superficial, podem ser desfavoráveis à qualidade física do solo, à dinâmica de NPK e à produtividade de culturas. A compactação do solo reduz o fluxo de massa através dos macroporos, o que pode reduzir o fluxo de nitrato para as raízes das plantas. Além disso, a compactação do solo aumenta o potencial para a denitrificação 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. A descompactação do solo utilizando implementos de hastes, como escarificadores e subsoladores, que produzem superfícies mais rugosas, que os implementos de discos, como grades pesadas, têm por objetivo romper as camadas superficiais encrostadas e camadas subsuperficiais compactadas. Há carência de estudos em áreas de plantio direto no sul do Brasil com o objetivo de avaliar o efeito da descompactação do solo na qualidade física do solo, dinâmica de NPK e desenvolvimento e produtividade de culturas, especificamente na região pioneira do sistema plantio direto. O diferencial desse projeto de pesquisa é a integração de avaliação da fertilidade química e física do solo em relação à descompactação do solo. Os resultados permitirão orientar os produtores em relação à necessidade de descompactar as áreas sob plantio direto.

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 e a 1100 metros de altitude (Figura 1).

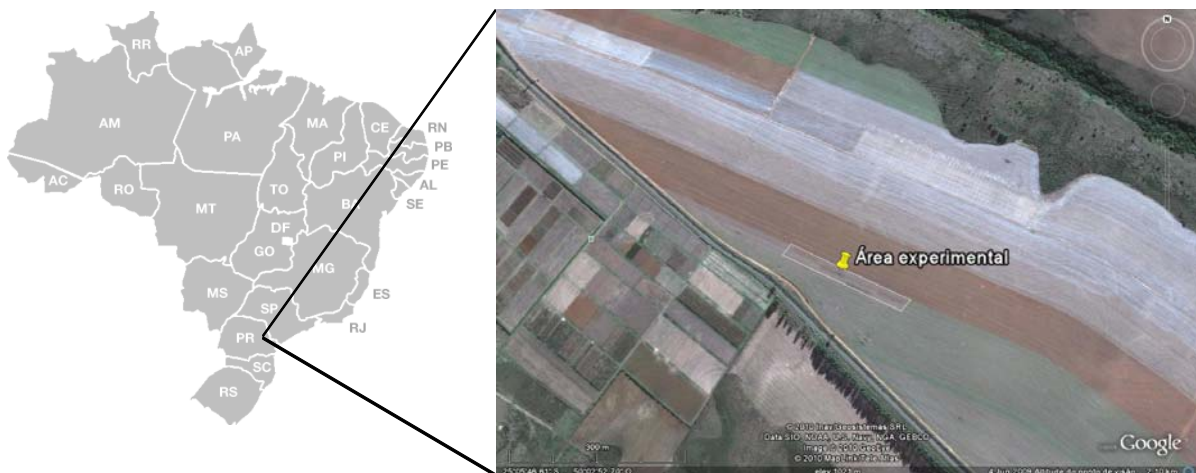


Figura 1. Localização da área experimental.

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 2 mostra a precipitação pluvial média histórica para área durante o período estudado (05/2009 a 09/2010).

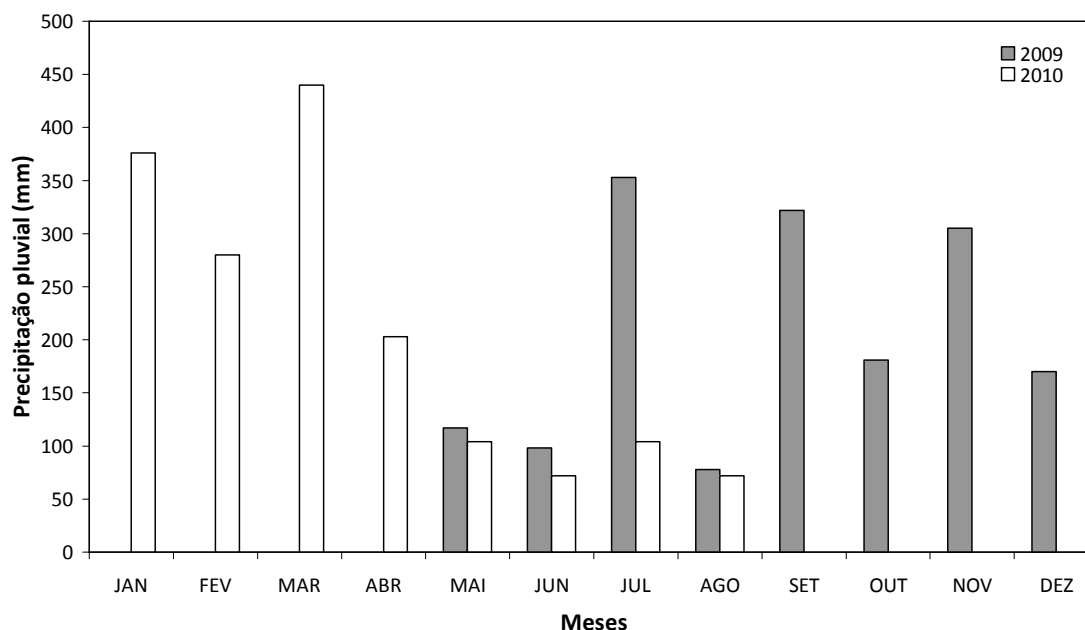


Figura 2. Precipitação pluvial média mensal dos anos 2009 e 2010.

Fonte: Estação climatológica da UEPG.

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 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 de 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. No caso do milho, feijão e soja, a semeadura é realizada com haste sulcadora a uma profundidade de 0,04m, para a colocação da semente, e a 0,10 m, para a deposição do adubo. A aplicação de corretivos e a adubação das culturas têm sido realizadas de acordo os resultados de análise de solo; as épocas de semeadura, o controle de plantas daninhas e os tratamentos fitossanitários, definidos de acordo com as recomendações técnicas para cada cultura.

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, totalizando 450 m². Na figura 3 pode-se ter uma visão geral da área durante a instalação do experimento e execução da subsolagem de parte das parcelas experimentais.



Figura 3. Vista da área subsolada (à esquerda) e não subsolada (à direita) no momento da instalação do experimento.

A subsolagem mecânica referente ao tratamento PD-M foi realizada com o auxílio de um subsolador modelo Asa Laser, marca Jumbo Matic (Figura 4a) acoplado ao sistema de acionamento hidráulico do trator, à profundidade média de 0,25 m (Figura 4b) 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 4a).

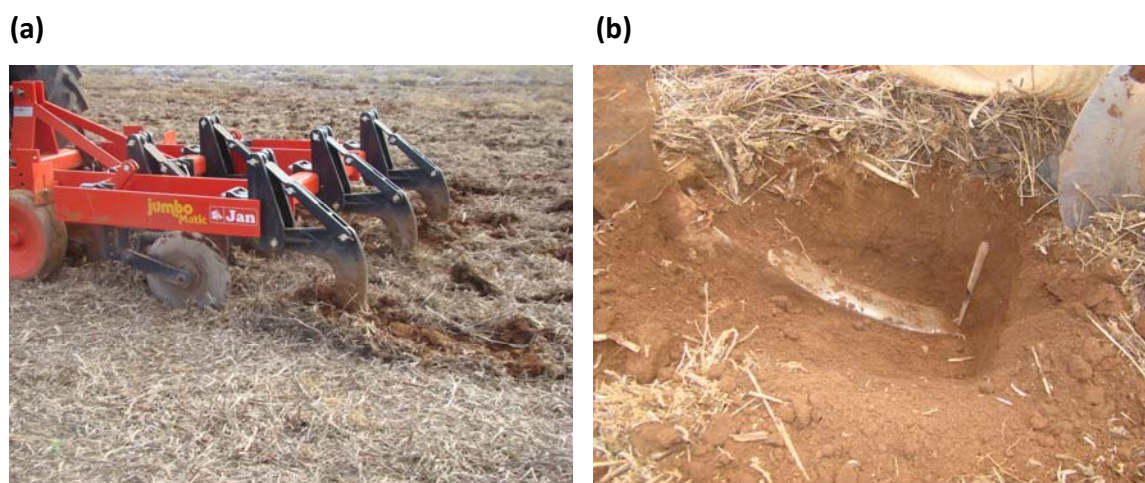


Figura 4. Subsolagem mecânica das parcelas experimentais: a) subsolador modelo Asa Laser; e, b) profundidade efetiva da subsolagem.

Na área sob plantio direto (PD), a semeadura do outono/inverno de 2009 (aveia + ervilhaca e nabo forrageiro) foi realizada aos vinte e quatro dias do mês de maio, com disco duplo a 0,03 m de profundidade. Na figura 5 pode-se observar o desenvolvimento inicial da aveia, dezenove dias após a semeadura e, na figura 6, o desenvolvimento pleno da aveia+ervilhaca cento e um dias depois da semeadura.



Figura 5. Vista geral das parcelas experimentais dezenove dias depois da semeadura da aveia + ervilhaca.



Figura 6. Vista geral das parcelas experimentais cento e um 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 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 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 7). 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 7. 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 8 pode-se observar a cultura do trigo cem dias depois da semeadura.



Figura 8. Cultura do trigo cem dias depois da sementeira. Safra outono/inverno de 2010.

3.2 DETERMINAÇÕES ANALÍTICAS

3.2.1 AVALIAÇÃO VISUAL DA QUALIDADE DA ESTRUTURA DO SOLO

3.2.1.1 Material e métodos

As avaliações visuais da qualidade da estrutura do solo foram realizadas em meados de outubro de 2009 e 2010, sendo que, no primeiro ano de avaliação (2009), houve a participação do Dr. Bruce Ball, pesquisador colaborador vinculado ao Scottish Agricultural College (SAC).

Com o auxílio de uma pá reta, foram abertas minitrincheiras com 0,30m de largura x 0,40m de comprimento x 0,30m de profundidade, para a extração de amostras indeformadas (blocos) com 0,15m de largura x 0,30m de profundidade x 0,10m de espessura da camada superficial do solo (Figuras 9a e 9b). De cada parcela experimental foram retirados três blocos de solo, ou seja, doze blocos (ou repetições) por tratamento, totalizando vinte e quatro amostras avaliadas. A avaliação visual da estrutura do solo apoiou-se na aparência, resistência e características das unidades estruturais de blocos de solo, sendo definida por cinco escores visuais (Ev) para a classificação da qualidade: de Ev=1 (melhor qualidade estrutural) a Ev=5 (pior qualidade estrutural). A atribuição de

escores e o cálculo do escore final foram realizados conforme a chave de classificação de Ball et al. (2007).



Figura 9. Coleta de blocos indeformados para determinação visual da qualidade da estrutura do solo.

3.2.1.2 Resultados

Na primeira avaliação, no mínimo duas camadas de solo com diferenças estruturais foram facilmente identificadas (Figura 10). Independente do sistema de manejo (PD ou PD-M), a maior parte das amostras apresentou uma camada superficial composta por agregados de menor tamanho e com elevada friabilidade. Essa camada superficial composta por agregados de tamanho pequeno a médio e ocupados por muitas raízes se desenvolveu, provavelmente, pelo efeito do sistema radicular da aveia consorciada com ervilhaca, pelos ciclos de umedecimento e secamento mais intensos e frequentes e pelo maior aporte de carbono orgânico na superfície dos solos cultivados sob plantio direto. Em profundidade, apareceram agregados de maior tamanho, mais densos, os quais sugerem a presença de uma camada compactada decorrente, provavelmente, do

preparo convencional utilizado antes da adoção do sistema plantio direto, ou, então, da consolidação do solo em função do tráfego na superfície.



Figura 10. Aspectos estruturais do solo nas amostras utilizadas para a determinação visual da qualidade da estrutura do solo.

Os escores visuais finais obtidos na primeira avaliação visual são apresentados na Figura 11. Verificou-se alteração da estrutura do solo e a presença de camadas com diferentes formas e tamanhos dos agregados, que resultaram num E_v menor ($E_v=3,30$) para o solo sob sistema plantio direto submetido à subsolagem mecânica (PD-M). Os resultados da análise visual indicaram uma deterioração maior da qualidade da estrutura do solo no plantio direto de longa duração (PD) ($E_v=3,82$), composta por agregados de maior tamanho e de maior resistência à ruptura.

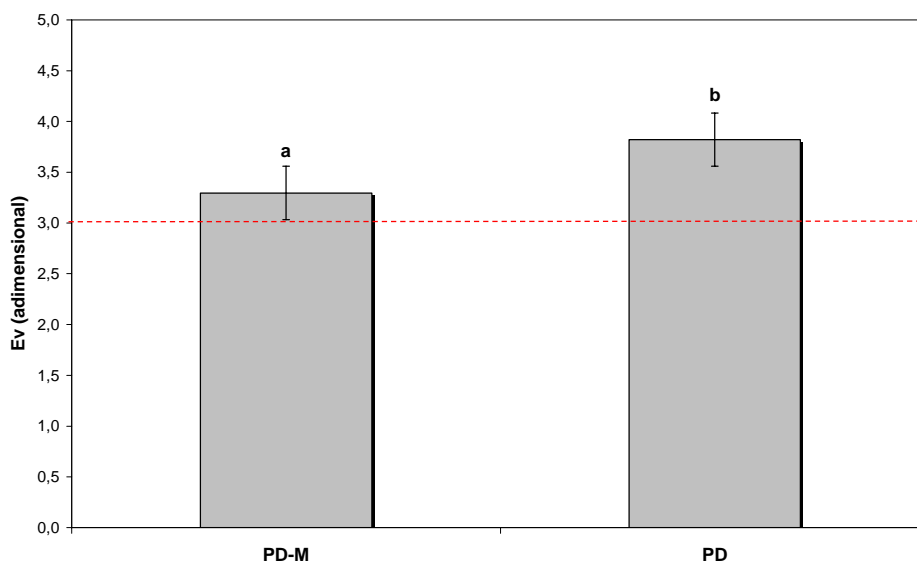


Figura 11. Escores visuais finais resultantes da avaliação visual da qualidade da estrutura do solo para o solo sob plantio direto de longa duração (PD) e plantio direto subsolado mecanicamente (PD-M).

Os resultados obtidos na segunda avaliação visual da qualidade da estrutura do solo estão em fase de processamento.

3.2.2 CURVAS DE RETENÇÃO HÍDRICA, CURVAS DE RESISTÊNCIA DO SOLO E INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO

3.2.2.1 Material e métodos

- **Amostragem**

Aos seis (novembro de 2009) e doze meses (maio de 2010) 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 0,0-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,15, 0,15-0,20 e 0,20-0,30m foram retiradas amostras com 50 mm de diâmetro x 50 mm de altura, perfazendo um total de cento e oitenta amostras ($n = 180$) 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, na sequência, submetidas a diferentes potenciais mátricos (ψ): 0, -1, -2, -3, -4, -5, -6, -7, -8, -9, -10, -20, -30, -40, -50, -60, -70, -80, -90, e -100 kPa, utilizando mesa de tensão e câmaras de pressão, segundo Klute (1986). Depois de atingido o equilíbrio hidráulico, as amostras foram pesadas e utilizadas para a determinação da resistência do solo. Uma vez finalizado o teste de resistência, as amostras foram secas em estufa a 105°C por 24 h e, mais uma vez, pesadas para determinar a umidade corresponde a cada potencial mátrico aplicado.

Os dados de retenção de água no solo serão ajustados à equação proposta por Van Genuchten (1980), descrita na equação (1), adotando a restrição para $m=1-1/n$:

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) / [(1 + \alpha |\psi|^n)^{1-1/n}] \quad (1)$$

Onde: θ é o teor de água ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), ψ é o módulo do potencial mátrico (hPa), θ_r é o teor de água residual ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e α (hPa^{-1}) e n são parâmetros obtidos no ajuste do modelo aos dados. O valor de θ_s (teor de água do solo saturado) será obtido como $\theta_s = (1 - D_s/2,65)$, a partir da D_s e assumindo a densidade de partículas igual a $2,65 \text{ Mg m}^{-3}$. Os parâmetros α , n e θ_r serão determinados a partir do ajuste do modelo. O ajuste dos dados ao modelo ainda não foram efetuados.

- **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).

Os dados de resistência à penetração (RP) serão ajustados em relação à umidade gravimétrica (θ) e à densidade do solo (D_s), utilizando o modelo não linear proposto por Busscher (1990):

$$RP = a * D_s^b * \theta^c \quad (2)$$

Na equação (2) RP é a resistência do solo à penetração (MPa), D_s é a densidade do solo ($g\ cm^{-3}$) e θ é a umidade gravimétrica ($g\ g^{-1}$). Os coeficientes a , b e c são os parâmetros do ajuste do modelo. O ajuste dos dados ao modelo ainda não foram efetuados.

- **Determinação do intervalo hídrico ótimo**

O intervalo hídrico ótimo (IHO) encontra-se em fase de elaboração.

3.2.2.2 Resultados

- **Determinação das curvas de retenção hídrica e de resistência do solo à penetração**

Os resultados de resistência do solo, conteúdo volumétrico de água e densidade global obtidos para as amostras submetidas aos diferentes potenciais mátricos e para os diferentes sistemas de cultivo, épocas de amostragem e profundidades de coleta são apresentados na Tabela 3. Os dados estão em fase de tabulação e análise para futuro

ajuste dos modelos e determinação das curvas de retenção hídrica e de resistência do solo.

Tabela 3. Resultados obtidos para resistência do solo (RP), conteúdo de água (θ) e densidade do solo (Ds) em diferentes potenciais mátricos (Ψ) para os sistemas de cultivo, épocas de amostragem e profundidades de coleta.

Ψ , MPa	RP, Mpa		θ , cm ³ cm ⁻³		Ds, g cm ⁻³	
	Nov/2009	Mai/2010	Nov/2009	Mai/2010	Nov/2009	Mai/2010
PLANTIO DIRETO (PD)						
0,00-0,10 m						
0,001	0,033	--	0,4707	--	1,35	--
0,002	0,033	--	0,4949	--	1,28	--
0,003	0,033	--	0,4990	--	1,10	--
0,004	0,775	1,184	0,4830	0,4972	1,16	1,20
0,006	2,425	1,538	0,3988	0,4904	1,15	1,26
0,008	3,626	1,201	0,4317	0,4747	1,08	1,12
0,01	0,033	1,136	0,4689	0,4725	1,29	1,12
0,03	2,317	0,929	0,4723	0,5206	1,27	1,20
0,04	--	1,321	--	0,5179	--	1,26
0,05	--	2,237	--	0,4499	--	1,26
0,07	13,006	2,403	0,4162	0,4124	1,21	1,29
0,1	13,463	--	0,4426	--	1,23	--
0,2	15,717	--	0,4308	--	1,26	--
1,5	19,013	1,013	0,4387	0,5079	1,34	1,25
0,10-0,20 m						
0,001	0,059	1,314	0,5005	0,4928	1,29	1,27
0,002	0,033	1,989	0,4890	0,4667	1,28	1,28
0,003	0,033	0,971	0,4856	0,4652	1,29	1,23
0,004	0,050	2,693	0,4621	0,4388	1,32	1,37
0,006	0,871	1,270	0,4441	0,4417	1,40	1,26
0,008	2,644	1,933	0,3893	0,4078	1,39	1,30
0,01	0,609	1,526	0,4128	0,3658	1,39	1,21
0,03	23,367	3,084	0,4013	0,3580	1,28	1,33
0,04	--	2,752	--	0,3529	--	1,27
0,05	--	2,453	--	0,3563	--	1,24
0,07	1,889	2,154	0,3537	0,3473	1,31	1,20
0,1	3,893	--	0,3558	--	1,33	--
0,2	1,281	--	0,3976	--	1,28	--
0,6	--	--	--	0,2701	--	1,28
1,5	6,380	3,829	0,5449	0,3348	1,28	1,28
0,20-0,30 m						
0,001	0,033	1,326	0,5256	0,4920	1,26	1,24
0,002	0,033	0,803	0,5152	0,4954	1,28	1,15
0,003	0,033	0,956	0,5077	0,4488	1,20	1,18
0,004	0,571	1,195	0,4911	0,4354	1,29	1,26
0,006	7,294	1,330	0,4570	0,4090	1,27	1,27

0,008	2,503	1,981	0,4088	0,3909	1,32	1,28
0,01	0,524	1,373	0,4265	0,3901	1,23	1,24
0,03	3,978	--	0,4280	--	1,27	1,12
0,04	--	2,108	--	0,3487	--	1,28
0,05	--	2,010	--	0,3819	--	1,27
0,07	0,538	2,220	0,4502	0,3619	1,23	1,30
0,1	4,649	--	0,3620	--	1,26	--
0,2	4,609	--	0,3826	--	1,31	--
0,9	--	--	--	0,2505	--	1,30
1,5	5,007	4,668	0,4780	0,3130	1,26	1,30
0,30-0,40 m						
0,001	0,033	0,979	0,5574	0,4913	1,20	1,14
0,002	0,033	1,264	0,5107	0,4815	1,26	1,21
0,003	1,169	1,687	0,5143	0,4469	1,25	1,22
0,004	1,509	1,668	0,5003	0,4404	1,20	1,22
0,006	0,908	--	0,4946	--	1,17	1,06
0,008	0,799	1,716	0,4472	0,4028	1,25	1,22
0,01	0,056	1,614	0,4520	0,3983	1,33	1,19
0,03	3,936	3,010	0,4371	0,3877	1,31	1,31
0,04	--	2,093	--	0,3577	--	1,24
0,05	--	1,856	--	0,4101	--	1,21
0,07	2,583	2,022	0,3721	0,3447	1,35	1,17
0,1	10,184	--	0,3661	--	1,22	--
0,2	24,725	--	0,3402	--	1,14	--
0,5	--	--	--	0,2722	--	1,20
1,5	11,606	2,820	0,5976	0,3285	1,26	1,20
0,40-0,50 m						
0,001	0,958	0,971	0,5251	0,5219	1,23	1,14
0,002	1,990	1,073	0,5660	0,4874	1,13	1,14
0,003	1,092	1,454	0,5119	0,4630	1,24	1,18
0,004	0,596	1,269	0,5067	0,4553	1,20	1,17
0,006	1,798	1,392	0,5004	0,3908	1,11	1,13
0,008	2,886	--	0,4455	--	1,24	1,08
0,01	0,131	--	0,4405	--	1,28	1,08
0,03	3,871	--	0,4388	--	1,25	1,15
0,04	--	--	--	--	--	1,09
0,05	--	1,435	--	0,4085	--	1,17
0,07	7,853	1,697	0,3590	0,3549	1,12	1,15
0,1	2,799	--	0,3850	--	1,24	--
0,2	2,377	--	0,4246	--	1,29	--
0,66	--	--	--	0,2483	--	1,28
1,5	2,572	--	0,4924	--	1,26	--
PANTIO DIRETO COM SUBSOLAGEM MECÂNICA (PD-M)						
0,00-0,10 m						
0,001	0,033	1,634	0,5239	0,4944	1,30	1,28
0,002	5,606	0,912	0,4610	0,5125	1,10	1,21
0,003	0,034	0,881	0,4790	0,5074	1,29	1,25
0,004	0,033	0,913	0,5158	0,5488	1,20	1,12
0,006	0,340	0,800	0,5136	0,5031	1,28	1,25
0,008	1,617	1,716	0,4548	0,4816	1,15	1,38
0,01	40,228	0,648	0,3591	0,4751	1,03	1,13
0,03	2,607	1,183	0,4364	0,3991	1,28	1,20

0,04	--	0,949	--	0,3991	--	1,09
0,05	--	1,216	--	0,5132	--	1,27
0,07	1,925	1,068	0,3980	0,4664	1,20	1,15
0,1	19,240	--	0,4328	--	1,21	--
0,2	--	--	--	0,3762	--	--
0,32	2,195	--	0,4021	--	1,20	1,07
1,5	19,119	1,379	0,3614	0,4566	1,27	1,07
0,10-0,20 m						
0,001	0,033	1,537	0,4809	0,4611	1,33	1,30
0,002	0,033	0,972	0,4745	0,4873	1,30	1,24
0,003	0,033	0,813	0,4945	0,4905	1,23	1,20
0,004	0,033	1,427	0,5130	0,4250	1,28	1,28
0,006	0,693	0,765	0,4506	0,4211	1,27	1,22
0,008	8,195	1,597	0,3972	0,4118	1,19	1,28
0,01	29,467	2,065	0,3472	0,4089	1,19	1,32
0,03	5,452	2,154	0,3792	0,3762	1,28	1,31
0,04	--	2,045	--	0,3569	--	1,28
0,05	--	1,777	--	0,3611	--	1,28
0,07	1,260	1,449	0,3822	0,3626	1,25	1,22
0,1	15,862	--	0,3443	--	1,23	--
0,2	0,936	--	0,4206	--	1,25	--
0,48	--	--	--	0,2885	--	1,13
1,5	5,791	3,196	0,4243	0,3457	1,30	1,13
0,20-0,30 m						
0,001	0,033	1,487	0,4946	0,4767	1,34	1,33
0,002	0,033	--	0,4998	--	1,27	1,14
0,003	0,033	0,812	0,5104	0,4733	1,23	1,20
0,004	0,208	0,643	0,5076	0,4731	1,33	1,11
0,006	0,381	0,756	0,4969	0,4247	1,22	1,20
0,008	0,922	0,982	0,4328	0,4382	1,17	1,22
0,01	1,949	1,075	0,4123	0,3930	1,23	1,22
0,03	5,059	1,438	0,4120	0,3598	1,33	1,27
0,04	--	2,719	--	0,3522	--	1,32
0,05	--	--	--	--	--	1,27
0,07	1,695	1,861	0,4103	0,3254	1,33	1,22
0,1	0,847	--	0,3929	--	1,29	--
0,2	3,886	--	0,3738	--	1,20	--
0,79	--	--	--	0,2387	--	1,20
1,5	5,579	4,529	0,3826	0,2973	1,32	1,20
0,30-0,40 m						
0,001	0,033	1,041	0,5526	0,5024	1,13	1,263
0,002	0,033	0,690	0,5214	0,4590	1,27	1,20
0,003	0,034	--	0,5057	--	1,31	1,09
0,004	0,172	1,428	0,5127	0,4212	1,24	1,21
0,006	5,212	1,615	0,4508	0,4249	1,13	1,26
0,008	2,095	--	0,4297	--	1,19	1,04
0,01	5,714	1,191	0,4200	0,4161	1,18	1,18
0,03	10,283	--	0,4175	--	1,23	1,11
0,04	--	1,864	--	0,3491	--	1,26
0,05	--	2,005	--	0,3701	--	1,24
0,07	53,177	1,945	0,3747	0,3408	1,17	1,20
0,1	2,336	--	0,4129	--	1,18	--
0,2	10,219	--	0,3684	--	1,20	--

0,91	--	--	--	0,2404	--	1,16
1,5	3,470	3,775	0,4116	0,3349	1,23	1,16
0,40-0,50 m						
0,001	0,033	--	0,5202	--	1,23	--
0,002	0,054	1,193	0,5376	0,4749	1,15	1,19
0,003	0,138	1,496	0,5213	0,4666	1,18	1,20
0,004	8,185	1,276	0,4913	0,4573	1,13	1,19
0,006	2,674	1,683	0,4707	0,4345	1,11	1,23
0,008	1,536	1,488	0,4456	0,4064	1,19	1,14
0,01	3,525	1,440	0,4307	0,4184	1,22	1,13
0,03	6,284	1,224	0,4023	0,3562	1,17	1,12
0,04	--	2,178	--	0,3818	--	1,23
0,05	--	1,741	--	0,3623	--	1,19
0,07	3,133	1,626	0,4094	0,3505	1,20	1,18
0,1	28,502	--	0,3395	--	1,19	--
0,2	13,273	--	0,3156	--	1,11	--
0,62	--	--	--	0,2558	--	1,04
1,5	6,593	2,635	0,4362	0,3388	1,21	1,04

- **Determinação do intervalo hídrico ótimo**

O Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) encontra-se em fase de determinação.

3.2.3 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA

3.2.3.1 Material e métodos

A condutividade hidráulica saturada (K_0) foi obtida de acordo com método da carga decrescente (Reynolds & 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:

$$K_0 = [(L/T) \ln(h_0/h_1)] \quad (3)$$

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 as amostras foram colocadas em equipamento específico para quantificar o fluxo de ar.

3.2.3.2 Resultados

Os resultados da condutividade hidráulica saturada (K_0) para as profundidades de 0,0-0,05 e 0,05-0,10 m estão demonstrados na Tabela 4. O sistema plantio direto de longa duração (PD) foi utilizado como padrão para comparações, com o objetivo de avaliar o impacto da subsolagem mecânica (PD-M) sobre a condutividade hidráulica do solo. O tratamento que apresentou maior condutividade hidráulica nas duas profundidades 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 para os três tratamentos.

Tabela 4. Valores médios de condutividade hidráulica saturada (K_0) para os sistemas de cultivo em duas profundidades de coleta de amostras.

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 de longa duração com subsolagem mecânica

3.2.4 PERMEABILIDADE AO AR

3.2.4.1 Material e métodos

Depois de medida a condutividade hidráulica saturada, as amostras foram submetidas, em mesa de tensão e câmeras de pressão, aos seguintes potenciais mátricos: -0,1, -0,2, -0,3, -0,4, -0,6, -0,8, -10, -30, -70, -100, -200, -1500 kPa. Para cada potencial aplicado foi quantificado o fluxo de ar conforme Ball & Schjønning (2002). A permeabilidade ao ar (K_a) foi determinada estabilizando-se o fluxo de ar e medindo-se a diferença de potencial necessária para que esse fluxo transpasse a amostra (Equação 4).

$$K_a = \frac{q_v}{\Delta P_a} 0,37386 \quad (4)$$

Sendo: q_v o fluxo de ar em $\text{cm}^3\text{min}^{-1}$, K_a a permeabilidade ao ar dada em μm^2 e ΔP_a a diferença de potencial necessária para o fluxo transpassar a amostra.

3.2.4.2 Resultados

Os resultados de permeabilidade ao ar (K_a) obtidos para as amostras submetidas aos diferentes potenciais mátricos, para os sistemas de cultivo, épocas de amostragem e profundidades de coleta são apresentados na Tabela 5. Os dados estão em fase de tabulação e análise estatística.

Tabela 5. Resultados obtidos para permeabilidade ao ar (K_a) em diferentes potenciais mátricos (Ψ) e para os sistemas de cultivo, épocas de amostragem e profundidades de coleta.

Ψ , MPa	K_a , μm^2	
	Nov/2009	Mai/2010
PLANTIO DIRETO (PD)		
0,00-0,10 m		
0,001	0,033	--
0,002	0,033	--
0,003	0,033	--
0,004	0,775	1,845
0,006	2,425	--
0,008	3,626	0,802
0,01	0,033	0,824
0,03	2,317	--
0,04	--	--
0,05	--	0,439
0,07	13,006	1,372
0,1	13,463	--
0,2	15,717	--

1,5	19,013	--
0,10-0,20 m		
0,001	0,059	--
0,002	0,033	--
0,003	0,033	1,903
0,004	0,050	0,117
0,006	0,871	0,086
0,008	2,644	3,464
0,01	0,609	4,079
0,03	23,367	9,650
0,04	--	6,814
0,05	--	2,973
0,07	1,889	2,668
0,1	3,893	--
0,2	1,281	--
1,5	6,380	18,385
0,20-0,30 m		
0,001	0,033	--
0,002	0,033	0,582
0,003	0,033	4,852
0,004	0,571	6,387
0,006	7,294	12,193
0,008	2,503	6,585
0,01	0,524	5,853
0,03	3,978	28,479
0,04	--	24,309
0,05	--	5,726
0,07	0,538	11,164
0,1	4,649	--
0,2	4,609	--
1,5	5,007	67,794
0,30-0,40 m		
0,001	0,033	--
0,002	0,033	0,551
0,003	1,169	1,476
0,004	1,509	1,484
0,006	0,908	27,502
0,008	0,799	2,724
0,01	0,056	23,310
0,03	3,936	3,202
0,04	--	5,090
0,05	--	3,934
0,07	2,583	16,402
0,1	10,184	--
0,2	24,725	--
1,5	11,606	66,424
0,40-0,50 m		
0,001	0,958	--
0,002	1,990	1,343
0,003	1,092	1,426
0,004	0,596	1,843
0,006	1,798	53,182

0,008	2,886	1,915
0,01	0,131	13,285
0,03	3,871	35,841
0,04	--	54,453
0,05	--	3,098
0,07	7,853	14,035
0,1	2,799	--
0,2	2,377	--
1,5	2,572	--
PANTIO DIRETO COM SUBSOLAGEM MECÂNICA (PD-M)		
0,00-0,10 m		
0,001	0,033	--
0,002	5,606	--
0,003	0,034	--
0,004	0,033	--
0,006	0,340	--
0,008	1,617	--
0,01	40,228	--
0,03	2,607	1,228
0,04	--	7,340
0,05	--	--
0,07	1,925	0,101
0,1	19,240	--
0,2	2,195	--
1,5	19,119	4,356
0,10-0,20 m		
0,001	0,033	--
0,002	0,033	1,622
0,003	0,033	0,156
0,004	0,033	3,157
0,006	0,693	1,548
0,008	8,195	0,755
0,01	29,467	5,380
0,03	5,452	0,587
0,04	--	4,490
0,05	--	3,843
0,07	1,260	8,206
0,1	15,862	--
0,2	0,936	--
1,5	5,791	20,417
0,20-0,30 m		
0,001	0,033	--
0,002	0,033	33,780
0,003	0,033	0,494
0,004	0,208	5,559
0,006	0,381	2,679
0,008	0,922	1,642
0,01	1,949	1,954
0,03	5,059	3,314
0,04	--	3,543
0,05	--	10,801
0,07	1,695	15,279

0,1	0,847	--
0,2	3,886	--
1,5	5,579	13,630
0,30-0,40 m		
0,001	0,033	--
0,002	0,033	6,239
0,003	0,034	2,797
0,004	0,172	3,022
0,006	5,212	2,581
0,008	2,095	15,271
0,01	5,714	1,742
0,03	10,283	25,882
0,04	--	3,955
0,05	--	23,310
0,07	53,177	7,112
0,1	2,336	--
0,2	10,219	--
1,5	3,470	175,043
0,40-0,50 m		
0,001	0,033	--
0,002	0,054	2,199
0,003	0,138	3,722
0,004	8,185	2,360
0,006	2,674	1,967
0,008	1,536	6,151
0,01	3,525	9,229
0,03	6,284	19,731
0,04	--	4,489
0,05	--	8,359
0,07	3,133	12,429
0,1	28,502	--
0,2	13,273	--
1,5	6,593	29,151
0,40-0,50 m		
0,001	0,205	--
0,002	3,042	1,275
0,003	0,129	6,074
0,004	0,123	3,785
0,006	6,771	4,139
0,008	2,011	6,238
0,01	1,223	7,861
0,03	12,598	25,070
0,04	--	29,092
0,05	--	66,424
0,07	0,585	15,271
0,1	7,791	--
0,2	82,883	--
1,5	20,542	75,018

3.2.5 PRODUTIVIDADE DE GRÃOS

3.2.5.1 Material e métodos

A produtividade de grãos (milho) referente à safra de primavera/verão (2009/2010) foi determinada em três pontos aleatoriamente distribuídos dentro de cada unidade experimental. Cada ponto de coleta correspondeu a uma área amostral colhida de 6,4 m², referente a duas linhas de milho com quatro metros de comprimento cada uma.

3.2.5.2 Resultados

Os resultados obtidos na safra de primavera/verão (2009/2010) demonstraram que o processo de subsolagem mecânica (PD-M) não influenciou a produtividade de milho (grãos) e apresentou produtividade similar à área sob plantio direto de longa duração (PD). Cabe destacar que as taxas de precipitação pluvial ocorridas no período (Figura 2) superaram as médias históricas, o que pode ter minimizado o efeito da subsolagem do solo sobre a produtividade da cultura de verão.

3.2.6 ANÁLISE FOLIAR

3.2.6.1 Material e métodos

No início de janeiro de 2010, amostras de folhas da cultura do milho foram coletadas para fins de diagnose foliar. Foram coletadas trinta plantas por parcela e retirado o terço médio da folha imediatamente abaixo e oposta à espiga, por ocasião do aparecimento da inflorescência feminina. As amostras foram acondicionadas em sacos de papel e encaminhadas para o Laboratório de Nutrição de Plantas da UEPG, para procedimentos de lavagem, secagem, moagem e determinações analíticas, empregando-se os métodos sugeridos por Malavolta et al. (1997).

As amostras de plantas foram lavadas em água deionizada, secas em estufa a 65°C com circulação forçada de ar até atingir massa constante, moídas em moinho tipo “Wiley”

equipado com malha de 0,85 mm e armazenadas em recipientes plásticos tampados até a realização das análises químicas. As concentrações de N foram determinadas mediante digestão sulfúrica e leitura pelo método semi-micro-Kjeldahl. As determinações das concentrações de P, K, Ca, Mg e S foram realizadas por meio de digestão nítrico-perclórica e leitura por espectrofotometria de absorção molecular para P; espectrometria de emissão em chama para K; espectrofotometria de absorção atômica com atomização em chama para Ca e Mg; e turbidimetria para S.

3.2.6.2 Resultados

O sistema plantio direto submetido à subsolagem mecânica (PD-M) apresentou maiores concentrações de nutrientes quando comparado ao plantio direto de longa duração (PD) (Figura 12). Os maiores efeitos da subsolagem (PD-M) sobre a nutrição das plantas foram verificados para os nutrientes P e K, ou seja, para os nutrientes cuja forma principal de contato com a raiz da planta se dá por difusão (Barber, 1995). Devido ao fato de a taxa de difusão ser diretamente proporcional ao volume de solo explorado pelas raízes (Barber, 1995), a subsolagem mecânica certamente favoreceu o crescimento radicular do milho, proporcionando maior absorção de P e K e concentração foliar destes nutrientes.

Para os nutrientes N, Ca, Mg e S, cuja principal forma de contato íon com as raízes se dá por fluxo de massa (Barber, 1995), a subsolagem mecânica ocasionou efeitos menos expressivos sobre a nutrição mineral do milho. Isso pode ser explicado pelo fato de as condições de temperatura e precipitação terem sido adequadas durante todo o ciclo da cultura, favorecendo o fluxo de massa, bem como o adequado suprimento de N, Ca, Mg e S. De modo geral, as concentrações foliares dos macronutrientes observados no presente estudo estão dentro da faixa considerada normal para a cultura do milho, conforme Malavolta et al. (1997).

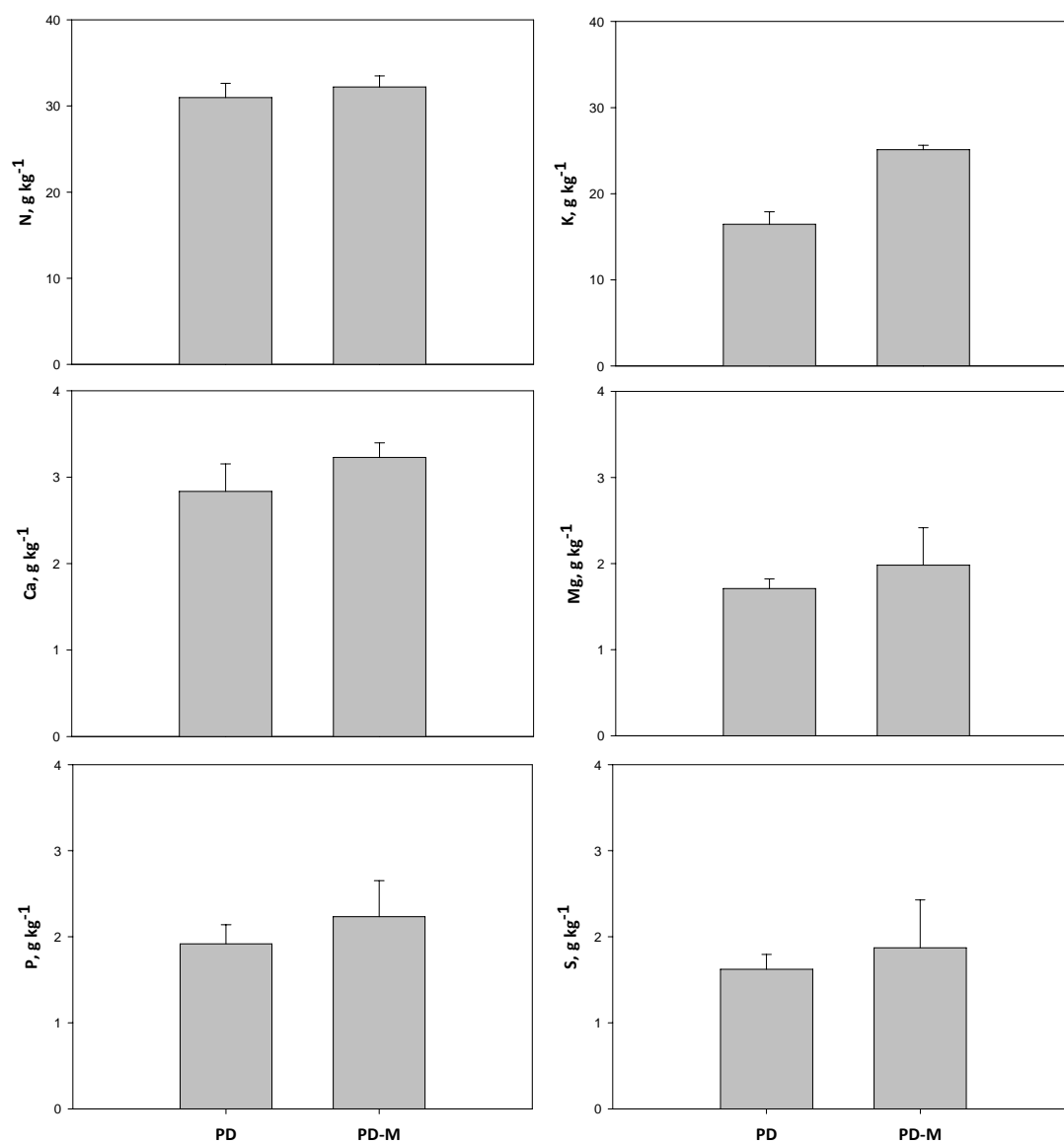


Figura 12. Concentrações foliares dos macronutrientes na cultura de milho cultivado sob sistema plantio direto de longa duração (PD) e sistema plantio direto com subsolagem mecânica (PD-M).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O projeto de pesquisa decorreu de modo satisfatório neste primeiro ano de atividades e prossegue conforme o cronograma. Apenas a determinação dos atributos químicos dos solos aguardam a conclusão da reforma dos laboratórios da UEPG para serem realizadas.

5 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.
- BALL, B.C. et al. Field assessment of soil structural quality - a development of the Peirlkamp test. Soil Use and Management, v.23, p.329-337, 2007. Disponível em: <<http://www.ingentaconnect.com/content/bpl/sum/2007/00000023/00000004/art0001?crawler=true>>. Acesso em: 9 out. 2008. doi: 10.1111/j.1473-2743.2007.00102.x
- BARBER, S.A. Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach. 2.ed. New York: John Wiley & Sons, 1995. 414p.
- 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. v.1, p.635-662.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. 2.ed. Piracicaba: Potafos, 1997. 319p.
- 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, v.22, p.573-581, 1998.
- VAN GENUCHTEN, M.TH. A Closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., v.44, p.892-898, 1980.