

ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DE SOLOS NO SISTEMA DE PLANTIO DIRETO, REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS.

SOUZA J.L.M.¹; PIEKARSKI, K.R.²; TSUKAHARA R.Y.³; GURSKI B.C.⁴

¹Professor, DSEA/SCA/UFPR, e-mail: jmoretti@ufpr.br; ²Mestrado em Ciência do Solo, ³Fundação ABC;

⁴Doutorado em Ciência do Solo, UFPR

RESUMO

Teve-se por objetivo no presente trabalho determinar e associar os atributos físico-hídricos de quatro tipos de solos sob sistema plantio direto, localizados nas Estações Experimentais da Fundação ABC, região dos Campos Gerais. Foram coletadas amostras deformadas e indeformadas de solo em três profundidades: 0,0-0,10 m; 0,10-0,25 m e 0,25-0,40 m. As amostras foram provenientes de parcelas das Estações Experimentais da Fundação ABC, localizadas em Arapoti, Castro, Ponta Grossa, Tibagi e distrito de Socavão, Estado do Paraná e Itaberá, Estado de São Paulo. Foram obtidos valores de textura (argila, silte, areia fina e areia grossa); massa específica (solo e partículas do solo); porosidade (total, macro e micro); umidade volumétrica (ponto de murcha permanente e capacidade de campo); capacidade de água disponível e condutividade hidráulica saturada. Os resultados indicaram que a textura predominante dos solos estudados é argilosa a muito argilosa, exceto no município de Arapoti e Ponta Grossa, onde as texturas foram franco argilo-arenosa e argilo-arenosa, respectivamente. A média da massa específica do solo está compreendida entre 980 kg m⁻³ a 1400 kg m⁻³, limites considerados ideais aos solos de textura franca, no município de Arapoti, e textura argilosa nos demais municípios. A média da massa específica das partículas de solo (2650 kg m⁻³) indicou que os solos da região foram formados a partir de minerais com elevado teor de quartzo em sua composição. A média da porosidade total dos solos está compreendida entre 0,47 m³ m⁻³ e 0,63 m³ m⁻³, faixa próxima ao ideal para o desenvolvimento de culturas anuais sob sistema de plantio direto. A proporção entre micro e macroporos é predominantemente próxima a 3:1, sendo os microporos relativamente superior em alguns tipos de solos. Os valores médios da capacidade de água disponível dos solos estudos variaram entre 48 mm (Tibagi) a 62 mm (Arapoti). As médias da condutividade hidráulica saturada dos solos indicaram condição “moderada”, com menores valores ocorridos em Tibagi. Os atributos físico-hídricos dos solos estudados não evidenciaram que o manejo adotado nos cultivos da região esteja prejudicando sua capacidade produtiva.

Palavras-chave: Fundação ABC; textura; massa específica; porosidade; condutividade hidráulica saturada; curva de retenção da água no solo.

INTRODUÇÃO

As consequências das práticas de manejo sobre a qualidade física do solo atuam diretamente no desenvolvimento de culturas em sistemas agrícolas. Por isso, o conhecimento dos impactos causados pelo manejo ao sistema se torna essencial. Alguns dos atributos físico-hídricos do solo, como capacidade de água disponível (*CAD*) na rizosfera, massa específica do solo (ρ_s), porosidade (α) e condutividade hidráulica saturada (K_{sat}), podem ajudar a compreender como o manejo do solo tem influenciado na sua qualidade (DEXTER e YOUNGS, 1992; LAL, 1994; FEZER, 2013).

Os sistemas de preparo do solo podem afetar diretamente seus atributos físico-hídricos. O sistema de plantio direto, caracteriza-se pela ausência de revolvimento do solo, aliado a rotação de culturas, muitas vezes combinado com o acúmulo de material vegetal da cultura anterior. A não-mobilização do solo e o acúmulo de material orgânico provocam modificações significativas nos atributos físico-hídricos do solo e podem afetar sua qualidade (STONE et al., 2006).

Muitos atributos do solo têm grande utilidade no planejamento e manejo das lavouras, e na avaliação da qualidade do solo. A massa específica do solo (ρ_s) é um dos atributos físico-hídricos mais sensível ao sistema de preparo do solo. A alteração da ρ_s afeta a porosidade do solo e, conseqüentemente, a disponibilidade de água para as plantas, capacidade produtiva e qualidade. Considera-se que a distribuição porosa ideal para a produção agrícola deva ser 2/3 para microporos e 1/3 para macroporos, sendo que a porosidade total (α) ideal deve ficar em torno de $0,5 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (HILLEL, 1970; REICHARDT e TIMM, 2004).

A porosidade de aeração (β) consiste no espaço poroso não ocupado por água. A literatura indica que a β deve ser suficiente para que a difusão de oxigênio no solo supra a demanda de oxigênio das culturas agrícolas em pleno desenvolvimento. Estudos indicam que a β deve ser de, no mínimo, $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (ERICKSON, 1982; REICHARDT e TIMM, 2004).

A elaboração da curva de retenção de água do solo permite estimar ou auxiliar estudos envolvendo atributos como a umidade na capacidade de campo (θ_{CC}), ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) e capacidade de água disponível (*CAD*) no solo. São atributos que permitem quantificar a dinâmica da água no sistema solo-planta-atmosfera e a disponibilidade de água para as culturas agrícolas. Podem ser utilizados em diversas estimativas do balanço hídrico do solo, produtividade e, conseqüentemente, auxiliar nas decisões de estratégias de manejo. Sistemas de preparo do solo podem alterar a distribuição de poros por tamanho, alterando também a curva de retenção da água no solo e seus atributos (GRABLE e SIEMER, 1968; CASSEL e NIELSEN, 1986; REICHARDT e TIMM, 2004; COSTA et al., 2008).

A condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) também é um atributo físico-hídrico considerado muito variável e sensível ao manejo do solo. A K_{sat} está relacionada com a movimentação da água ao longo do perfil de solo. Valores de K_{sat} podem dobrar em áreas com revolvimento intensivo do solo, quando comparada aos sistemas sem revolvimento, principalmente nas camadas superiores. Há indícios também, de que a adição de matéria orgânica ao solo favorece a infiltração e pode aumentar significativamente os valores de K_{sat} (REICHARDT e TIMM, 2004).

A literatura considera que as relações entre atributos físico-hídricos do solo e produtividade de culturas agrícolas estão em fase de investigação, e ainda podem ser aprofundadas. Um dos principais motivos que dificulta a realização dos estudos está ligado à complexidade para quantificar alguns atributos. Além disso, existe o problema da

variabilidade espacial e temporal, que dificulta descrever ou estimar as medidas, que também podem variar conjuntamente (DEXTER, 1988; TORMENA et al., 1998).

A região dos Campos Gerais é um local de referência na pesquisa e na produção de grãos no Estado do Paraná. Na região se localiza a Fundação ABC, uma importante instituição de pesquisa privada, responsável por inúmeras pesquisas no âmbito agrícola, que tem contribuído significativamente com avanço da tecnologia e aprimoramento da produção na região (FUNDAÇÃO ABC, 2015). Porém, a obtenção de dados, principalmente referente aos distintos tipos de solos da região é bastante restrita e limitada (PIEKARSKI, 2016).

Tendo em vista a importância dos atributos físico-hídricos do solo e a dificuldade em obtê-los em bancos de dados, ou mesmo mensurá-los, teve-se por objetivo no presente estudo determinar e associar os atributos físico-hídricos de quatro tipos de solos sob sistema plantio direto, localizados nas Estações Experimentais da Fundação ABC, região dos Campos Gerais.

MATERIAL E MÉTODOS

Os campos experimentais da Fundação ABC estão localizados em Arapoti, Castro, Ponta Grossa, Tibagi e no distrito de Socavão, Estado do Paraná e, Itaberá, no sul do Estado de São Paulo (FIGURA 1). Foram coletadas amostras de solos nas parcelas experimentais pertencentes ao setor de Agrometeorologia da Fundação ABC. Cada parcela possui dimensão de 50 m x 100 m, tendo o relevo plano a suave ondulado. O preparo do solo é sem revolvimento, no sistema plantio direto com restos vegetais da safra anterior. O sistema de rotação de culturas adotado cultiva soja e milho no verão e trigo e aveia preta no inverno.

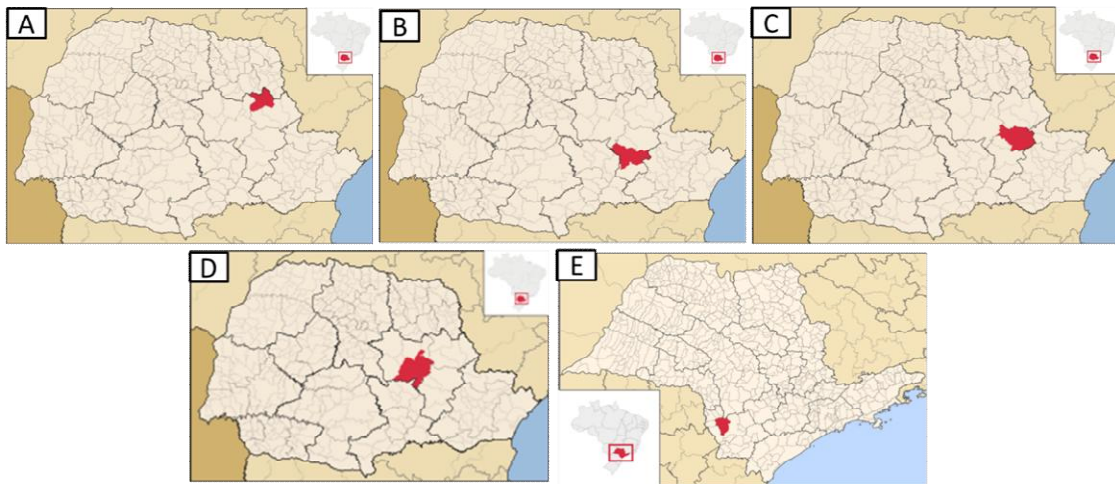


FIGURA 1 – Municípios das Estações Experimentais da Fundação ABC, região dos Campos Gerais: (A) Arapoti-PR; (B) Ponta Grossa-PR; (C) Castro-PR; (D) Tibagi-PR; (E) Itaberá-SP.

A classificação dos solos das parcelas experimentais amostradas foi obtida nos mapas de solos, com escala 1:10.000, provenientes de levantamento realizado pela própria Fundação ABC (FIGURA 1 e TABELA 1). Os tipos climáticos foram identificados em Álvares et al. (2013), que utilizou a classificação climática de Köppen para essa finalidade. A localização, coordenadas geográficas e altitude foram mensurados com aparelho de GPS.

TABELA 1. Caracterização quanto à localização, solo, clima, coordenadas geográficas e altitudes das Estações Experimentais da Fundação ABC.

Município	Estado	Solo	Clima	Latitude ----- (graus)	Longitude -----	Altitude (m)
Arapoti	Paraná	LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico	Cfa/Cfb ⁽¹⁾	24,18° S	49,85° W	902
Castro	Paraná	CAMBISSOLO HÁPLICO Distrófico típico	Cfb	24,85° S	49,93° W	1001
Itaberá	São Paulo	PLANOSSOLO HÁPLICO Distrófico típico	Cfa	24,07° S	49,15° W	735
Ponta Grossa	Paraná	LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico	Cfb	25,01° S	50,15° W	1000
Socavão	Paraná	ORGANOSSOLO MÉSICO Sáprico típico	Cfb	24,68° S	49,75° W	1026

⁽¹⁾ Local de transição climática.

Foram coletadas três amostras deformadas e três indeformadas de solo, em cinco pontos representativos em cada parcela experimental, nas camadas de 0,0-0,10 m; 0,10-0,25 m e 0,25-0,40 m de profundidade. Logo, totalizaram-se 15 amostras deformadas e 15 indeformadas por Estação Experimental, ou 90 amostras deformadas e 90 indeformadas de solo nas seis Estações Experimentais.

As amostras deformadas foram coletadas com trado calador e armazenadas em sacos plásticos. As amostras indeformadas foram coletadas com o auxílio de anéis volumétricos de 5 cm de diâmetro e 3 cm de altura. Após a coleta foram envoltas com papel alumínio. Todas as amostras foram devidamente identificadas e levadas para os Laboratórios da Universidade Federal do Paraná, para serem analisadas. Os atributos físico-hídricos dos solos analisados foram: teores de argila ($g\ kg^{-1}$), silte ($g\ kg^{-1}$), areia fina ($g\ kg^{-1}$) e areia grossa ($g\ kg^{-1}$); massa específica do solo (ρ_s , $kg\ m^{-3}$); massa específica das partículas do solo (ρ_{ps} , $kg\ m^{-3}$); porosidade total (α , $m^3\ m^{-3}$); macro e microporosidade ($m^3\ m^{-3}$); umidade volumétrica no ponto de murcha permanente (θ_{pmp} , $m^3\ m^{-3}$); umidade volumétrica na capacidade de campo (θ_{CC} , $m^3\ m^{-3}$); capacidade de água disponível (CAD , mm) e condutividade hidráulica saturada (K_{sat} , $mm\ dia^{-1}$). A seguir serão apresentados alguns detalhes das análises realizadas:

a) Análises com amostras deformadas de solo:

Os teores de argila ($g\ kg^{-1}$), silte ($g\ kg^{-1}$), areia fina ($g\ kg^{-1}$) e areia grossa ($g\ kg^{-1}$) do solo foram determinados com o método do densímetro, conforme Embrapa (1997), no Laboratório de Física do Solo da UFPR.

A massa específica das partículas do solo ($kg\ m^{-3}$) foi determinada com o método do balão volumétrico modificado, conforme Gubiani et al. (2006), no Laboratório de Física do Solo da UFPR.

b) Análises com amostras indeformadas de solo:

A massa específica do solo (kg m^{-3}) foi determinada com o método do anel volumétrico, conforme Embrapa (1997), no Laboratório de Física do Solo da UFPR.

A umidade na capacidade de campo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), porosidade total ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), macro e microporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) foram determinadas conforme Embrapa (1997), no Laboratório de Manejo de Bacias Hidrográficas da UFPR. A porosidade total foi considerada igual à umidade volumétrica do solo na saturação (θ_{sat}). A umidade na capacidade de campo (θ_{CC}) foi determinada com anéis volumétricos dispostos em mesa de tensão à 0,01 MPa. Os valores de microporosidade do solo foram considerados iguais aos valores de θ_{CC} . Os valores de macroporos das amostras foram obtidos fazendo a diferença entre a θ_{sat} e a θ_{CC} (FABIAN e OTTONI FILHO, 2000).

Os parâmetros θ_r , θ_{sat} , α , m e n da equação de Van Genuchten (1980) foram estimados com o programa de pedotransferência SPLINTEX, versão 1.0 (PREVEDELLO, 1999). Para cada camada dos pontos amostrais das localidades estudadas foram necessários os seguintes dados de entrada para o programa: teor acumulado de argila (%), silte (%), areia fina (%) e areia grossa (%), massa específica das partículas de solo (kg m^{-3}), massa específica do solo (kg m^{-3}), umidade volumétrica do solo saturado (%) quando submetido à tensão de 0,01 MPa. Com os parâmetros obtidos, considerou-se como ponto de murcha permanentes (θ_{PMP}) a umidade obtida na tensão de 1,5 MPa, estimada com a equação de Van Genuchten (1980).

A capacidade de água disponível no solo (CAD) foi determinada a partir da expressão:

$$CAD = \sum_{i=1}^n (\theta_{CCi} - \theta_{PMPi}) \cdot z_i$$

Sendo: CAD – capacidade de água disponível no solo (mm); θ_{CCi} – umidade volumétrica do solo na capacidade de campo da i -ésima camada ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); θ_{PMPi} – umidade volumétrica do solo no ponto de murcha permanente da i -ésima camada ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); z_i – profundidade da i -ésima camada enraizada do solo (mm); n – número de camadas consideradas.

A condutividade hidráulica saturada (mm dia^{-1}) foi determinada conforme Embrapa (1997), em permeâmetro de carga constante, com o auxílio de frasco de Mariotti, no Núcleo de Atividades de Engenharia em Biosistemas (NAEB) da UFPR.

Após a coleta e análise das amostras em laboratório, os dados gerados foram tabulados e analisados em planilha eletrônica. As comparações e discussões foram realizadas baseando-se em medidas de tendência e dispersão, bem como comparação com dados considerados padrões pela literatura.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das análises das amostras deformadas e indeformadas de solo, realizadas para as seis Estações Experimentais da Fundação ABC, evidenciaram homogeneidade para a maioria dos atributos físico-hídricos, nas diferentes camadas de solo (PIEKARSKI, 2016). A camada de 0-10 centímetros foi a que apresentou maior variabilidade em relação às demais, principalmente para valores dos teores de materiais que compõe a textura do solo e K_{sat} .

Os coeficientes de variação obtidos evidenciaram que a ρ_{ps} foi o atributo que apresentou menor variação, dentre os solos estudados. O valor obtido está dentro do esperado, pois a ρ_{ps} independe da porosidade, não sendo influenciada pelo manejo. É um atributo que varia pouco de solo para solo e depende de sua constituição mineralógica. Geralmente, seu valor se aproxima do valor da massa específica do material de origem (LIBARDI, 2005; REINERT e REICHERT, 2006). Por outro lado, a K_{sat} foi o atributo que se mostrou mais variável. A literatura afirma que a K_{sat} é naturalmente muito variável (espacial e temporalmente), e dificilmente encontram-se maneiras de estimá-la com precisão. Scherpinski et al. (2010) afirmam que a K_{sat} é um atributo que não apresenta estrutura de correlação espacial em grade de 50 x 50 metros (TABELA 2).

A textura do solo se mostrou bastante variável na região. Porém, a classe textural não apresentou grande variação. Os atributos θ_{CC} e θ_{PMP} também apresentaram coeficientes de variação altos, embora as áreas estudadas estejam submetidas ao mesmo manejo a muitos anos, e apresentarem similaridade nas condições de porosidade (CV = 10,8%).

A classificação textural dos solos estudados variaram de franco argilo-arenoso a muito argiloso (TABELA 3). Embora os valores da textura do solo mostrem-se bastante variáveis na região, aparentemente a classe textural foi pouco variável entre camadas e municípios. Dentre os municípios, o solo com maiores teores de areia e argila estão localizados em Arapoti (700,0 g kg⁻¹) e Tibagi (687,5 g kg⁻¹), respectivamente. Os teores de silte nestes solos não se mostrou muito expressivo, variando de 25,0 g kg⁻¹ a 287,5 g kg⁻¹.

A ρ_s variou entre 870 kg m⁻³ (Castro) e 1660 kg m⁻³ (Arapoti). Segundo Reichardt e Timm (2004), solos argilosos geralmente apresentam ρ_s inferior aos arenosos, fato observado no presente estudo, em que a ρ_s dos solos de Arapoti e Ponta Grossa foram superiores às demais localidades (TABELA 2). Marcolin (2006) considera que a ρ_s de solos de textura fina, em plantio direto e sem indícios de compactação, devem variar entre 900 a 1600 kg m⁻³. Logo, os valores médios de ρ_s obtidos no presente estudo indicam que a qualidade dos solos estudados não estão sendo prejudicadas com o manejo adotado.

A massa específica das partículas do solo (ρ_{ps}) é um atributo que não depende do manejo, mas sim da constituição do material de origem. Os valores da ρ_{ps} encontrados nos solos estudados foram similares ao indicado na literatura, para os tipos de solo (TABELA 2). Os valores variaram de 2210 kg m⁻³ (Socavão) e 2710 kg m⁻³ (Itaberá). Os menores valores de ρ_{ps} foram encontrados nos Organossolos do distrito de Socavão (2215 kg m⁻³), devido à quantidade de matéria orgânica no solo da região. Reichardt e Timm (2004) cometam que a ρ_{ps} dos solos que possuem teores significativos de quartzo em sua composição é muito próxima de 2650 kg m⁻³, valor próximo a massa específica do próprio mineral. Libardi (2005) acrescenta que a ρ_{ps} é pouco variável entre os tipos de solo, podendo ficar entre 2300 kg m⁻³ a 2900 kg m⁻³, confirmando os resultados obtidos no presente estudo.

TABELA 2. Valores médios dos teores de areia, silte, areia fina, areia grossa e areia total, massa específica do solo (ρ_s), massa específica das partículas de solo (ρ_{ps}), porosidade total (α), microporosidade, macroporosidade, umidade volumétrica no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), umidade volumétrica na capacidade de campo (θ_{CC}), capacidade de água disponível (CAD) e condutividade hidráulica saturada (K_{sat}), em três camadas de solos das Estações Experimentais da Fundação ABC, região dos Campos Gerais.

Local	Camada (m)	----- Textura (g kg ⁻¹) -----					ρ_s (kg m ⁻³)	ρ_{ps} (kg m ⁻³)	α (m ³ m ⁻³)	Microporos (m ³ m ⁻³)	Macroporos (m ³ m ⁻³)	θ_{PMP} (m ³ m ⁻³)	θ_{CC} (m ³ m ⁻³)	CAD (mm)	K_{sat} (mm dia ⁻¹)
		Argila	Silte	Areia fina	Areia grossa	Areia total									
Arapoti	0,0-0,10	290,00	75,00	200,17	434,83	635,00	1403,50	2571,20	0,49	0,35	0,15	0,15	0,34		1394,86
Arapoti	0,10-0,25	305,00	70,00	197,56	427,44	625,00	1393,94	2597,49	0,47	0,31	0,16	0,15	0,30	62,49	1268,41
Arapoti	0,25-0,40	325,00	62,50	194,42	418,08	612,50	1277,39	2607,25	0,49	0,30	0,18	0,16	0,30		1124,48
Castro	0,0-0,10	532,50	135,00	80,12	252,38	332,50	1058,91	2490,18	0,63	0,51	0,12	0,36	0,50		418,32
Castro	0,10-0,25	585,00	122,50	64,41	228,09	292,50	1046,86	2531,43	0,60	0,47	0,13	0,33	0,47	54,15	368,23
Castro	0,25-0,40	642,50	100,00	56,82	200,68	257,50	976,93	2578,58	0,62	0,45	0,17	0,32	0,45		325,74
Itaberá	0,0-0,10	517,50	92,50	167,45	222,55	390,00	1226,58	2631,83	0,55	0,40	0,15	0,28	0,40		516,46
Itaberá	0,10-0,25	557,50	82,50	167,51	192,49	360,00	1215,76	2631,44	0,54	0,38	0,16	0,24	0,37	54,79	462,25
Itaberá	0,25-0,40	570,00	97,50	159,73	172,77	332,50	1173,44	2616,53	0,54	0,37	0,17	0,22	0,37		420,37
Ponta Grossa	0,0-0,10	375,00	117,50	228,26	279,24	507,50	1316,62	2545,34	0,51	0,40	0,11	0,20	0,39		743,27
Ponta Grossa	0,10-0,25	392,50	105,00	229,95	272,55	502,50	1270,11	2564,71	0,50	0,35	0,15	0,20	0,35	57,94	732,57
Ponta Grossa	0,25-0,40	447,50	92,50	205,05	254,95	460,00	1059,32	2583,08	0,54	0,37	0,17	0,25	0,36		636,30
Socavão	0,0-0,10	565,00	170,00	75,98	189,02	265,00	1121,37	2330,82	0,57	0,43	0,14	0,28	0,43		335,96
Socavão	0,10-0,25	617,50	102,50	82,17	197,83	280,00	1037,67	2383,74	0,59	0,42	0,18	0,27	0,41	60,35	351,07
Socavão	0,25-0,40	627,50	90,00	84,02	198,48	282,50	1022,32	2352,74	0,59	0,41	0,18	0,24	0,40		355,54
Tibagi	0,0-0,10	610,00	215,00	102,52	72,48	175,00	996,87	2572,07	0,61	0,41	0,20	0,31	0,41		247,88
Tibagi	0,10-0,25	657,50	185,00	91,89	65,61	157,50	1020,02	2599,82	0,59	0,41	0,18	0,27	0,40	48,45	234,02
Tibagi	0,25-0,40	665,00	185,00	88,54	61,46	150,00	989,39	2627,68	0,60	0,42	0,18	0,30	0,42		228,25
Média ⁽¹⁾		515,97	116,92	137,58	230,06	367,80	1144,80	2545,27	0,56	0,40	0,16	0,25	0,39	56,36	564,59
Desvio Padrão ⁽¹⁾		129,64	50,29	63,37	113,94	156,85	162,11	108,27	0,06	0,06	0,04	0,08	0,06	10,15	378,14
CV (%) ⁽¹⁾		25,12	43,01	46,06	49,53	42,65	14,16	4,25	10,77	15,51	24,63	32,40	15,69	18,02	66,98

⁽¹⁾ Medidas de tendência e dispersão calculados com valores de todas as amostras retiradas nas seis Estações Experimentais (90 amostras).

TABELA 3. Classificação textural em três camadas dos solos das Estações Experimentais da Fundação ABC, região dos Campos Gerais.

Local	Camada (m)	Classe textural
Arapoti	0,0-0,10	Franco Argilo-arenoso
Arapoti	0,10-0,25	Franco Argilo-arenoso
Arapoti	0,25-0,40	Franco Argilo-arenoso
Castro	0,0-0,10	Argiloso
Castro	0,10-0,25	Argiloso
Castro	0,25-0,40	Muito argiloso
Itaberá	0,0-0,10	Argiloso
Itaberá	0,10-0,25	Argiloso
Itaberá	0,25-0,40	Argiloso
Ponta Grossa	0,0-0,10	Argilo-arenoso
Ponta Grossa	0,10-0,25	Argilo-arenoso
Ponta Grossa	0,25-0,40	Argilo-arenoso
Socavão	0,0-0,10	Argiloso
Socavão	0,10-0,25	Muito argiloso
Socavão	0,25-0,40	Muito argiloso
Tibagi	0,0-0,10	Muito argiloso
Tibagi	0,10-0,25	Muito argiloso
Tibagi	0,25-0,40	Muito argiloso

A porosidade total (α) encontrada nos solos estudados variaram entre $0,41 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Arapoti) e $0,72 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Tibagi), sendo solos mais arenosos e argilosos, respectivamente (TABELA 2). Libardi (2005) considera que os solos argilosos normalmente possuem α entre $0,52 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $0,61 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Os solos do município de Arapoti apresentaram valores médios inferior a $0,52 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, provavelmente por se tratar do solo com teor de areia mais acentuado dentre os estudados. Reichardt e Timm (2004) afirmam que os solos de textura franca devam possuir α entre $0,47 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $0,51 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

A literatura considera ideal a proporção volumétrica de um terço de macroporos para dois terços de microporos (HILLEL, 1970; REICHARDT e TIMM, 2004). Logo, os valores médios encontrados nos solos estudados indicam condições adequadas para realização de cultivos agrícolas (TABELA 4). Na maioria dos casos, a proporção de macroporos é inferior à considerada ideal, o que pode estar associado a dois fatores atuando em conjunto: (i) Alto teor de argila dos solos estudados, exceto no município de Arapoti, em que a proporção de macroporos é mais próxima da ideal. O maior conteúdo de argila do solo provoca a formação de grande volume de microporos e, assim, a proporção dos macroporos é diminuída (HILLEL, 1970); e, (ii) A compactação que ocorre comumente nas camadas superiores dos solos submetidos ao plantio direto (SCANLON et al, 2002). A compactação pode acarretar na diminuição do volume de macroporos nas camadas, o que explica os valores das proporções de macroporos bastante atenuadas na camada mais superficial dos solos estudados no presente trabalho, exceto no município de Tibagi.

TABELA 4. Valores médios de porosidade total (α) e volume total e relativo de macro e microporos dos solos, das Estações Experimentais da Fundação ABC.

Local	Camada (cm)	α ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	Volume de microporos ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)		Volume de macroporos ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	
			Total	Relativo	Total	Relativo
Arapoti	0,0-0,10	0,49	0,35	0,70	0,15	0,30
Arapoti	0,10-0,25	0,47	0,31	0,65	0,16	0,35
Arapoti	0,25-0,40	0,49	0,30	0,62	0,18	0,38
Castro	0,0-0,10	0,63	0,51	0,81	0,12	0,19
Castro	0,10-0,25	0,60	0,47	0,78	0,13	0,22
Castro	0,25-0,40	0,62	0,45	0,73	0,17	0,27
Itaberá	0,0-0,10	0,55	0,40	0,73	0,15	0,27
Itaberá	0,10-0,25	0,54	0,38	0,70	0,16	0,30
Itaberá	0,25-0,40	0,54	0,37	0,69	0,17	0,31
Ponta Grossa	0,0-0,10	0,51	0,40	0,78	0,11	0,22
Ponta Grossa	0,10-0,25	0,50	0,35	0,70	0,15	0,30
Ponta Grossa	0,25-0,40	0,54	0,37	0,68	0,17	0,32
Socavão	0,0-0,10	0,57	0,43	0,76	0,14	0,24
Socavão	0,10-0,25	0,59	0,42	0,70	0,18	0,30
Socavão	0,25-0,40	0,59	0,41	0,69	0,18	0,31
Tibagi	0,0-0,10	0,61	0,41	0,68	0,20	0,32
Tibagi	0,10-0,25	0,59	0,41	0,70	0,18	0,30
Tibagi	0,25-0,40	0,60	0,42	0,71	0,18	0,29

Em valores absolutos a quantidade média de macroporos dos solos indicaram porosidade de aeração até superior à considerada ideal ($0,1 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$) (ERICKSON,1982; REICHARDT e TIMM, 2004). Baver et al. (1972) e Kiehl (1979) consideram que o volume ideal de macroporos no solo deve estar entre $0,10 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ e $0,16 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$, indicando que provavelmente a condição porosa dos solos estudados não tem prejudicado sua qualidade (TABELA 2).

A proporção do volume de microporos foi predominantemente superior ao que é considerado ideal na literatura. A causa provável deveu-se ao teor acentuado de argila encontrados nos solos estudados. As argilas se agregam estruturalmente tendendo a formar poros pequenos (LIBARDI, 2005). Segundo Bognola et al. (2010), solos com maior volume de microporos tendem a possuir mais poros saturados, o que favorece o fluxo de massa e nutrientes para o suprimento das plantas.

Os valores absolutos de umidade na capacidade de campo (θ_{CC}) observados nos solos estudados estão entre $0,24 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ e $0,53 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ (TABELA 2). Os valores médios da umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) ficaram entre $0,10 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ e $0,42 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$. Logo, em média, a capacidade de água disponível (CAD) dos solos estudados variou entre 48 mm (Tibagi) a 62 mm (Arapoti).

Os valores mais baixos de CAD (48,5 mm, em média) ocorreram no município de Tibagi, em decorrência dos altos valores da umidade no ponto de murcha permanente (TABELA 2). Verificou-se a necessidade de alta tensão para movimentar a água retida nos microporos, o que geralmente está relacionado com o alto volume de microporos e,

principalmente, com o diâmetro pequeno dos microporos (LIBARDI, 2005; Reinert e Reichert, 2006). Os baixos valores de K_{sat} (236,7 mm dia⁻¹, em média) observada para os mesmos solos também podem ser explicados pelo mesmo motivo.

A amplitude entre as umidades volumétricas na capacidade de campo (θ_{CC}) e ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), bem como valores altos da massa específica do solo (ρ_s), favoreceram a ocorrência dos altos valores de CAD nos solos estudados, principalmente em Arapoti. Os resultados obtidos para os solos estudados são interessantes quanto à água disponível para cultivos, ao longo do ano (TABELA 2). Scheraiber (2012) considerando $CAD = 60$ mm em Ponta Grossa, obteve probabilidade de deficiência (mm decêndio⁻¹) próximo de zero, quando simulou balanços hídricos ao longo do ano para culturas com coeficiente de cultivo (kc) entre 0,75 a 1,1 e fração de água disponível (p) entre 0,3 e 0,7.

O valor da condutividade hidráulica saturada observada nos solos estudados ficaram entre 218,96 mm dia⁻¹ (Tibagi) e 2143,59 mm dia⁻¹ (Arapoti). No município de Arapoti o valor encontrado foi cerca de duas a três vezes superior aos outros municípios, para todas as camadas de solo analisadas (TABELA 2). Os resultados devem-se à textura do solo de Arapoti, com teores maiores de areia e alta proporção relativa de macroporos. Mesmo apresentado volume relativamente grande de macroporos, o que se observou no solo de Tibagi foi o oposto, apresentando os menores valores de condutividade hidráulica saturada e teor de areia. Logo, para os solos da região, acredita-se que a condutividade hidráulica saturada tenha maior relação com a formação textural do solo, comparado à porosidade (TABELA 5).

Bouma (1982) menciona que, em uma seção de solo, poros maiores podem não contribuir para o fluxo hídrico quando apresentam descontinuidade e, por isso, a macroporosidade, muitas vezes, pode não correlacionar com o fluxo de água do perfil de solo. Apesar disso, segundo a classificação de Soil Survey (1993), os menores valores médios de condutividade hidráulica saturada encontrados nas amostras analisadas pertenceram à classe “moderadamente baixa” e os maiores valores à classe “alta”. Além disso, a maior parte das amostras se enquadram nas classes “moderadas”. Na classificação de Lapsch et al. (1991), quando considerado o grau de permeabilidade, todos os valores de K_{sat} encontrados nos solos estudados pertencem ao grupo “moderada”. Os valores discrepantes do que é considerado extremamente alto ou baixo indicaram que o manejo do solo adotado não está afetado negativamente a K_{sat} e o fluxo hídrico dos solos estudados.

A maior correlação observada no presente estudo ocorreu entre a θ_{CC} e o volume de microporos do solo (TABELA 5), concordando com resultados obtidos por Andrade e Stone (2010), que também encontraram alta correlação entre os dois atributos em estudo com mais de duas mil amostras de solo. Fabian e Ottoni filho (2000) aproveitando a relação, validaram uma equação para estimar a θ_{CC} *in situ* a partir do volume de microporos de um Podzólico vermelho-amarelo.

Correlação estreita também foi verificada entre θ_{PMP} e α . O resultado indica que a maior parte da porosidade total dos solos estudados é constituída de microporos, estando diretamente relacionados com a retenção de água no solo e, conseqüentemente, fluxo hídrico (REICHARDT e TIMM 2004). Observou-se também estreita correlação entre a proporção de microporos e a θ_{PMP} . Carter (1988) verificou sob altas tensões que a retenção de água no solo é controlada pelo seu volume de microporos. Sob tensões menores, a água dos macroporos se move mais rapidamente e, sob as altas tensões, os macroporos ficaram cheios de ar, enquanto a água presente nos microporos ainda está retida.

TABELA 5 – Coeficiente de correlação entre os valores absolutos de atributos físico-hídricos dos solos das Estações Experimentais da Fundação ABC, região dos Campos Gerais.

Especificação	Argila	Silte	Areia fina	Areia grossa	Areia total	ρ_s ⁽¹⁾	ρ_{ps} ⁽²⁾	α ⁽³⁾	Micro-poros	Macro-poros	θ_{PMP} ⁽⁴⁾	θ_{CC} ⁽⁵⁾	K_{sat} ⁽⁶⁾
Argila	1,00*	0,40	-0,79*	-0,88*	-0,96*	-0,75	-0,14	0,69	0,60	0,11	0,63	0,60	-0,90*
Silte		1,00*	-0,42	-0,66	-0,65	-0,45	-0,13	0,46	0,39	0,08	0,30	0,39	-0,52
Areia fina			1,00*	0,53	0,79*	0,65	0,35	-0,71	-0,65	-0,05	-0,61	-0,66	0,65
Areia grossa				1,00*	0,94*	0,69	0,02	-0,59	-0,50	-0,13	-0,51	-0,49	0,89*
Areia total					1,00*	0,77*	0,16	-0,72	-0,62	-0,11	-0,62	-0,62	0,91*
ρ_s						1,00*	0,17	-0,72	-0,45	-0,40	-0,46	-0,44	0,75
ρ_{ps}							1,00*	-0,21	-0,23	0,05	-0,10	-0,24	0,18
α								1,00*	0,79	0,28	1,00	0,78*	-0,65
Microporos									1,00*	-0,36	0,78*	1,00*	-0,62
Macroporos										1,00*	-0,35	-0,37	-0,02
θ_{PMP}											1,00*	0,80*	-0,62
θ_{CC}												1,00*	-0,62
K_{sat}													1,00*

*Correlação significativa ($p > 0,05$); ⁽¹⁾ ρ_s – Massa específica do solo; ⁽²⁾ ρ_{ps} – Massa específica das partículas do solo; ⁽³⁾ α – Porosidade total; ⁽⁴⁾ θ_{PMP} – Umidade volumétrica no ponto de murcha permanente; ⁽⁵⁾ θ_{CC} – Umidade volumétrica na capacidade de campo; ⁽⁶⁾ K_{sat} – Condutividade hidráulica saturada.

Os microporos são capilares que atuam diretamente na retenção de água no solo. Quanto maior a proporção de microporos do solo, maior a dificuldade da água se movimentar. Por isso, solos com predomínio de microporos, quando submetidos à menor tensão, proporciona pouco movimento de água e o valor de θ_{CC} e θ_{PMP} tendem a serem altos. Logo, estes atributos tendem a apresentar estreita correlação positiva (HILLEL, 1970; CAVENAGE et al., 1999).

Observou-se que a K_{sat} dos solos estudados possuem correlação estreita com sua textura. Geralmente, a K_{sat} correlaciona-se bem com o volume de macroporos do solo, pois é o meio em que a água se movimenta mais facilmente ao longo do perfil (MESQUITA e MORAES, 2004). Porém, como os solos estudados apresentaram reduzido volume relativo de macroporos, a K_{sat} apresentou estreita correlação positiva com o teor de areia e negativa com o teor de argila. Provavelmente, a associação está ligada ao fato de solos mais arenosos tenderem a formar grande volume de macroporos e, assim, K_{sat} mais elevada. O que explica também a estreita correlação negativa entre teor de argila e K_{sat} (REINERT e REICHERT, 2006). Outra consideração refere-se a baixa correlação entre a macroporosidade e a K_{sat} devido a possível descontinuidade porosa que pode prejudicar o fluxo hídrico (Bouma, 1982).

A θ_{CC} e θ_{PMP} apresentaram estreita correlação positiva, o que naturalmente é esperado, pois são atributos que dependem das mesmas fontes de variação (LIBARDI, 2005). Os teores de areia e argila também apresentaram estreita correlação, só que negativa, pois são fração da totalidade da textura do solo, ou seja, quando o valor de um cresce o outro tende a diminuir. A correlação negativa indicou que o teor de silte pouco influenciou na composição textural dos solos estudados. A estreita correlação entre areia e areia grossa indicou que a fração areia é composta majoritariamente por areia grossa.

CONCLUSÕES

Os atributos físico-hídricos dos solos estudados não evidenciaram que o manejo adotado nos cultivos da região esteja prejudicando sua qualidade e capacidade produtiva:

A textura predominante dos solos estudados é argilosa a muito argilosa. Exceto no município de Arapoti e Ponta Grossa, onde as texturas são franco argilo-arenosa e argilo-arenosa, respectivamente.

A média da massa específica do solo está compreendida entre 980 kg m^{-3} a 1400 kg m^{-3} , limites considerados ideais aos solos de textura franca, no município de Arapoti, e textura argilosa nos demais municípios.

A média da massa específica das partículas de solo (2650 kg m^{-3}) indica que os solos da região são formados a partir de minerais com elevado teor de quartzo em sua composição.

A média da porosidade total dos solos está compreendida entre $0,47 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $0,63 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, faixa próxima ao ideal para o desenvolvimento de culturas anuais sob sistema de plantio direto. A proporção entre micro e macroporos é predominantemente próxima a 3:1, sendo os microporos relativamente superior em alguns tipos de solos.

As médias da condutividade hidráulica saturada dos solos indicam condição “moderada”, com menores valores ocorridos em Tibagi.

Os valores médios da capacidade de água disponível dos solos estudados variou entre 105,6 mm (Tibagi) a 193 mm (Ponta Grossa), indicando baixa probabilidade de ocorrência de déficit hídrico para as culturas cultivadas na região (soja, milho, trigo e aveia).

LITERATURA CITADA

ÁLVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppens's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, p. 711-728, 2013.

ANDRADE, R. S.; STONE, L. F. Estimativa da umidade em capacidade de campo em solos sob Cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, p. 111-116, 2010.

BAVER, L. D.; GARDNER, W. H.; GARDNER, W. R. **Soil structure: classification and genesis**. In: Baver LD; Gardner WH; Gardner WR. Soil physics. New York, p. 130-177, 1972.

BOGNOLA, I. A.; DEDECEK, R. A.; LAVORANTI, O. J.; HIGA, A. R. Influência de propriedades físico-hídricas do solo no crescimento de Pinus taeda. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 30, p. 37-49, 2010.

BOUMA, J. Measuring the conductivity of soil horizons with continuous macropores. **Soil Science Society of America Journal**, v. 46, p. 438-441, 1982.

CARTER, M. R. Temporal variability of soil macroporosity in a fine sandy loam under mouldboard ploughing and direct drilling. **Soil and Tillage Research**. v. 12, p. 37-51, 1988.

CASSEL, D. K.; NIELSEN, D. R. **Field capacity and available water capacity**. In: Methods of soil analysis, Madison: ASA – SSSA; 1986. p. 901-926.

- CAVENAGE, A.; MORAES, M. L. T.; ALVES, M. C.; CARVALHO, M. A. C.; FREITAS, M. L. M.; BUZETTI, S. Alterações nas propriedades físicas de um Latossolo vermelho-escuro sob diferentes culturas. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 23, p. 997-1003, 1999.
- COSTA, W. A.; OLIVEIRA, C. A. S.; KATO, E. Modelos de ajuste e métodos para a determinação da curva de retenção de água de um Latossolo Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 515-523, 2008.
- DEXTER, A. R. Advances in characterization of soil structure. **Soil and Tillage Research**, v. 11, p. 199-238, 1988.
- DEXTER, A. R.; YOUNGS, I. M. Soil physic toward 2000. **Soil and Tillage Research**, v. 24, p. 101-106, 1992.
- EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análises de solo**. Rio de Janeiro: Rio de Janeiro; 1997.
- ERICKSON, A. E. Tillage effects on soil aeration. **American Society of Agronomy**, v. 1, p. 91-104, 1982.
- FABIAN, A. J.; OTTONI FILHO, T. B. Determinação de capacidade de campo *in situ* ou através de equações de regressão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, p. 1029-1036, 2000.
- FEZER, K. F. Atributos físicos do solo e relações hídricas para cultura do *Pinus taeda* L. e mata nativa sobre Latossolo, em Telêmaco Borba-PR (dissertação). Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2013.
- FUNDAÇÃO ABC. **Relatório anual 2015**. Paraná: Castro, 2015.
- GRABLE, A. R.; SIEMER, E. G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corns roots. **Soil Science Society of America Proceedings**, v. 32, p. 180-186, 1968.
- GUBIANI, P. I.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Método alternativo para a determinação da densidade de partículas do solo – exatidão, precisão e tempo de processamento. **Ciência Rural**. v. 36, p. 664-668, 2006.
- HILLEL, D. **Solo e água: fenômeno e princípios físicos**. Porto alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1970.
- KIEHL, E. J. **Manual de edafologia**. São Paulo, Agronômica Ceres, 1979.
- PIEKARSKI, K. R. Produtividade de soja e milho em plantio direto com o modelo Aquacrop na região dos Campos Gerais. Curitiba (Dissertação). Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2016.
- LAL, R. Water management in various crop production systems related to soil. **Soil and Tillage Research**. v. 30, p. 169-185, 1994.
- LAPSCH, I. F.; BELINAZZI Jr, R.; BERTOLINI, D.; ESPINDOLA, C. R. **Manual para levantamento utilitário do meio físico e classificação de terras no sistema de capacidade de uso**. Campinas, Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, 1991.

- LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo, Universidade de São Paulo, 2005.
- MARCOLIN, C. D. Propriedades físicas de Nitossolo e Latossolo argilosos sob plantio direto (dissertação). Passo Fundo: Universidade de Passo Fundo, 2006.
- MESQUITA, M. G. B. F.; MORAES, S. O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, v. 34, p. 963-969, 2004.
- PREVEDELLO, C. L. Programa Splintex para estimar a curva de retenção de água a partir da granulometria (composição) do solo. Versão 1.0. Curitiba: UFPR, 1999.
- REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri, 2004.
- REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. **Propriedades físicas do solo**. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.
- SCANLON, B. R.; NICOT, J. P.; MASSMANN, J. W. Soil gas movement in unsaturated systems. **Soil Physics Companion**, v. 1, p. 297-341, 2002.
- SCHERAIBER, C. F. Adaptação metodológica para a estimativa e caracterização das relações hídricas como suporte ao planejamento agrícola (dissertação). Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2012.
- SCHERPINSKI, C.; URIBE-OPAZO, M. A.; VILAS BOAS, M. A.; SAMPAIO, S. C.; JOHANN, J. A. Variabilidade espacial da condutividade hidráulica e da infiltração da água no solo da água no solo. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 32, p. 7-13, 2010.
- SOIL SURVEY DIVISION STAFF. **Soil survey manual**. Soil Conservation Service U.S. Departamento of Agriculture Handbook. 1993.
- STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M.; MOREIRA, J. A. A. **Atributos físico-hídricos do solo sob plantio direto**. Santo Antônio de Goiás, Embrapa arroz e feijão, 2006.
- TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 22, p. 573-581, 1998.
- VAN GENUCHTEN, M. T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, p. 892-898, 1980.