

**UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

**PROPRIEDADES FÍSICAS DE NITOSSOLO E
LATOSSOLOS ARGILOSOS SOB PLANTIO DIRETO**

CLOVIS DALRI MARCOLIN

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Agronomia da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da UPF, para obtenção do título de Mestre em Agronomia – Área de concentração em Produção Vegetal.

Passo Fundo, abril de 2006

**UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

**PROPRIEDADES FÍSICAS DE NITOSSOLO E
LATOSSOLOS ARGILOSOS SOB PLANTIO DIRETO**

CLOVIS DALRI MARCOLIN

Orientador: Prof. Dr. Vilson Antonio Klein

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Agronomia da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da UPF, para obtenção do título de Mestre em Agronomia – Área de concentração em Produção Vegetal.

Passo Fundo, abril de 2006.



UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL



A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação.

“Propriedades físicas de nitossolo e latossolos argilosos sob plantio direto”

Elaborada por

CLÓVIS DALRI MARCOLIN

Como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em
Agronomia – Área de Produção Vegetal

Aprovada em: 07/04/2006
Pela Comissão Examinadora


Dr. Wilson Antonio Klein
Presidente da Comissão Examinadora
Orientador


Dra. Jurema Schons
Coordenadora PPGAgro


Dr. Cássio Antonio Tormena
Universidade Estadual de Maringá


Dr. Mauro Antonio Rizzardi
Diretor FAMV


Dr. José Miguel Reichert
Universidade Federal Santa Maria

M321p Marcolin, Clovis Dalri

Propriedades físicas de nitossolo e latossolos argilosos
sob plantio direto / Clovis Dalri Marcolin. – 2006.
110 f. ; 24 cm.

Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade
de Passo Fundo, 2006.

Orientação: Dr. Vilson Antonio Klein.

1. Solos – Densidade. 2. Solos - Compactação.
3. Nitossolos. 4. Latossolos. 5. Plantio direto. I. Klein,
Vilson Antonio, orientador. II. Título.

CDU: 631.4

Catálogo: bibliotecária Daiane Citadin Raupp - CRB 10/1637

A **Luciane**, minha esposa, pelo apoio,
disposição e companheirismo;
Ao **Fabício**, meu filho, que chegou a
poucos dias, pela motivação.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A todas as pessoas que contribuíram na realização deste trabalho, em especial:

A minha família, esposa Luciane Bragagnolo Marcolin e filho Fabrício Bragagnolo Marcolin, pela compreensão, dedicação, incentivo, amizade e apoio para realização deste curso;

A Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária – UPF pela oportunidade de realizar o curso;

A CAPES, pela concessão da bolsa de estudos;

Ao Professor Dr. Vilson Antonio Klein pela oportunidade, orientação, confiança, incentivo, profissionalismo, compreensão e amizade demonstrada ao longo do curso;

Aos docentes do Curso de Pós-graduação da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária pela amizade, apoio, conhecimento transmitido e atenção;

Aos colegas do curso pela amizade, colaboração e convivência amigável no decorrer do curso;

Aos alunos de graduação e colegas de laboratório Marcos André Simon, Iradi João Biasuz Junior, João Paulo Massing e Giovani Zoldan pela colaboração na realização desse trabalho e amizade;

A laboratorista Ester Maria de Lima pela colaboração na realização das análises de laboratório;

Aos funcionários da FAMV pela colaboração, apoio e amizade;

A Deus, pela vida, saúde e oportunidade de poder estudar e contribuir com o conhecimento científico.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO	1
ABSTRACT	2
1 INTRODUÇÃO	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 Composição do solo	6
2.1.1 Sólidos minerais do solo	7
2.1.2 Matéria Orgânica no solo.....	8
2.2 Propriedades físicas do solo afetadas pela textura e matéria orgânica	12
2.2.1 Densidade do solo	12
2.2.2 Porosidade do solo	15
2.2.3 Umidade ótima para compactação	16
2.2.4 Limites de consistência do solo	18
2.2.5 Água no solo	21
2.3 Indicadores de qualidade física do solo	26
2.3.1 Resistência mecânica do solo à penetração	26
2.3.2 Densidade relativa do solo	30
2.3.3 Intervalo hídrico ótimo	31
3 MATERIAL E MÉTODOS	34
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
4.1 Matéria orgânica	46
4.2 Densidade, densidade máxima e densidade relativa do solo ...	49
4.3 Porosidade total	57
4.4 Água no solo	58
4.5 Umidade ótima para compactação	65
4.6 Limites de consistência	66
4.7 Relação umidade ótima para compactação e limite plástico ...	68
4.8 Resistência mecânica do solo à penetração	71
4.9 Intervalo hídrico ótimo	75
5 CONCLUSÕES	88
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89

LISTA DE TABELAS

Tabela		Página
1	Granulometria dos solos por local de coleta e por profundidade	35
2	Umidade ótima para compactação (UO), densidade máxima do solo (Ds max), curva de compactação do solo e coeficiente de determinação (r^2) para cada profundidade dos diferentes solos	51
3	Densidade relativa média do perfil de cada solo estudado	59
4	Parâmetros de ajuste dos pontos experimentais da curva de retenção de água no solo à equação de Van Genuchten	54
5	Densidade máxima do solo (DMs), densidade do solo e densidade relativa do solo no máximo IHO (M. IHO), máxima densidade de campo (MDC), IHO igual a zero com resistência de 2 e 3 MPa	81
6	Umidade no Intervalo hídrico ótimo máximo e mínimo na capacidade de campo (CC) e resistência à penetração de 2 e 3 kPa, água disponível entre o limite superior e inferiores (2 e 3 MPa) do IHO	81

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Variação do teor de matéria orgânica em profundidade para cada solo.	47
2	Variação do teor de matéria orgânica no solo (% de massa) com o teor de argila, ⁺ significativo a 0,1 no teste F.	48
3	Variação da densidade do solo (Ds) e densidade máxima no solo (DMs) com a profundidade dos solos. .	50
4	Densidade (Ds) e densidade máxima (DMs) do solo em função do teor de argila, ** significativo a 0,01 pelo teste F.	53
5	Variação da densidade relativa no solo em profundidade de cada solo.	55
6	Água indisponível, água disponível, porosidade de aeração, umidade ótima para compactação (UOC), limite plástico (LP) e limite líquido (LL) conforme a profundidade (cm) de cada solo.	60
7	Variação da capacidade de campo (CC) e do ponto de murcha permanente (PMP) conforme o conteúdo de argila, ** significativo a 0,01 pelo teste F.	61
8	Variação da capacidade de campo (CC) e do ponto de murcha permanente (PMP) conforme o conteúdo de argila mais silte, ** significativo a 0,01 pelo teste F.	62
9	Água disponível conforme o conteúdo de argila mais silte, ** significativo a 0,01 pelo teste F.	65
10	Umidade ótima para compactação do solo conforme teor de argila, ** significativo a 0,01 pelo teste F.	66
11	Limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP), conforme o conteúdo de argila, ** significativo a 0,01 pelo teste F.	67
12	Índice de plasticidade do solo, conforme o conteúdo de	

	argila, ** significativo a 0,01 pelo teste F.	68
13	Relação umidade ótima para compactação e limite de plasticidade (Rel. UOV/LP) conforme o teor de argila no solo, ** significativo a 0,01 pelo teste F.	69
14	Umidade do solo para a máxima compactação (UOC) e no limite de plasticidade (LP), conforme o teor de argila.	70
15	Resistência mecânica do solo à penetração em diferentes tensões de umidade e profundidade de cada solo.	72
16	Umidade na capacidade de campo (CC), porosidade de aeração de $0,10 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ (Pa 10%), umidade no ponto de murcha permanente (PMP), resistência à penetração (3 MPa e 2 MPa), máxima densidade de solo no campo (MDC) e IHO igual a zero nas resistências à penetração de 2 e 3 MPa, do solo 1.	76
17	Umidade na capacidade de campo (CC), porosidade de aeração de $0,10 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ (Pa 10%), umidade no ponto de murcha permanente (PMP), resistência à penetração (3 MPa e 2 MPa), máxima densidade de solo no campo (MDC) e IHO igual a zero nas resistências à penetração de 2 e 3 MPa, do solo 2.	77
18	Umidade na capacidade de campo (CC), porosidade de aeração de $0,10 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ (Pa 10%), umidade no ponto de murcha permanente (PMP), resistência à penetração (3 MPa e 2 MPa), máxima densidade de solo no campo (MDC) e IHO igual a zero nas resistências à penetração de 2 e 3 MPa, do solo 3.	78
19	Umidade na capacidade de campo (CC), porosidade de aeração de $0,10 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ (Pa 10%), umidade no ponto de murcha permanente (PMP), resistência à penetração (3 MPa e 2 MPa), máxima densidade de solo no campo (MDC) e IHO igual a zero nas resistências à penetração de 2 e 3 MPa, do solo 4.	79
20	Umidade na capacidade de campo (CC), porosidade de aeração de $0,10 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ (Pa 10%), umidade no ponto de murcha permanente (PMP), resistência à penetração (3	

	MPa e 2 MPa), máxima densidade de solo no campo (MDC) e IHO igual a zero nas resistências à penetração de 2 e 3 MPa, do solo 5.	80
21	Umidade do solo na capacidade de campo (8 kPa) e nas resistências à penetração de 2 e 3 MPa, conforme a profundidade de cada solo, como limite superior e inferior do IHO, respectivamente	85
22	Densidade do solo no máximo IHO (M. IHO), IHO igual a zero nas resistências a penetração de 2 e 3 MPa, conforme o teor de argila, * e ** significativos a 0,05 e 0,01, respectivamente, pelo teste F.	86
23	Água disponível no solo no máximo IHO na resistência a penetração de 2 e 3 MPa, * e + significativo a 0,05 e 0,1 respectivamente, pelo teste F.	87

PROPRIEDADES FÍSICAS DE NITOSSOLO E LATOSSOLOS ARGILOSOS SOB PLANTIO DIRETO

Clovis Dalri Marcolin¹; Vilson Antonio Klein²

RESUMO - As características e propriedades físicas do solo são de fundamental importância para o manejo do solo. A textura e a matéria orgânica são capazes de afetar as propriedades químicas, físicas e biológicas. Este trabalho teve como objetivo avaliar as propriedades físico-hídrico-mecânicas de solos com mais de dez anos de plantio direto, em propriedades rurais e com diferentes texturas, na região de Passo Fundo-RS, para avaliar a sua contribuição nessas propriedades. Para isso foram coletadas amostras de cinco solos até a profundidade de 30 cm, em seis camadas. Analisou-se a textura, densidade do solo, densidade máxima do solo, umidade ótima para compactação, limites líquido e plástico, relação umidade ótima para compactação e limite plástico, curva de retenção de água no solo, matéria orgânica, porosidade, resistência mecânica do solo à penetração, densidade relativa e intervalo hídrico ótimo. A matéria orgânica em solos sob plantio direto concentra-se na superfície e aumenta conforme o teor de argila, esta influencia positivamente a porosidade total e negativamente a resistência a

¹ Eng.-Agr., Mestrando do Programa de Pós-graduação em Agronomia (PPGAgro) da FAMV/UPF, Área de Concentração em Produção Vegetal. Passo Fundo - RS

² Orientador, Eng.-Agr., Dr., Professor da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da UPF – vaklein@upf.br

penetração. A densidade do solo, a densidade máxima do solo, volume de água disponível, máximo IHO e densidade do IHO igual a zero, são influenciadas negativamente pelos teores de argila. A porosidade total, umidade ótima para compactação do solo, capacidade de campo, ponto de murcha permanente, limites líquido e plástico e limite de plasticidade são influenciados positivamente pelo teor de argila. A relação umidade ótima para compactação e o limite plástico se comportam de forma quadrática em relação ao teor de argila. A densidade relativa média foi de 0,86. O intervalo hídrico ótimo decresceu com o teor de argila mais silte.

Palavras chave: Textura do solo, densidade do solo, intervalo hídrico ótimo, consistência do solo, matéria orgânica.

SOIL PHYSICAL PROPERTIES OF NITOSSOL AND CLAYEY LATOSOLS UNDER NO-TILLAGE

ABSTRACT – The soil physical properties and features of a soil play a crucial role in soil management. Texture and organic matter can affect chemical, physical, and biological properties. The aim of the present study was to assess the physical, hydraulic, and mechanical properties of soils with different textures managed under the no-tillage system for ten

years in rural estates in the region of Passo Fundo, state of Rio Grande do Sul, in southern Brazil. Samples were collected from five soils at a maximum depth of 30 cm, in six layers. The following parameters were analyzed: texture, soil density, maximum bulk density, optimal moisture content, liquid and plastic limits, ratio between optimal moisture content and plastic limit, water retention curve, organic matter, porosity, mechanical resistance to penetration, relative density, and least limiting water range (LLWR). Organic matter in no-tillage soils is mostly restricted to the surface and increases with the clay content, which has a positive influence over total porosity and a negative one over resistance to penetration. Soil density, maximum bulk density, available water, LLWR, and LLWR density equal to zero are negatively influenced by the clay content. Total porosity, optimal moisture content, field capacity, permanent wilting point, liquid and plastic limits, and plasticity index are positively influenced by the clay content. The ratio between optimal moisture content and plastic limit has a quadratic behavior in relation to clay content. The mean relative density corresponded to 0.86. LLWR decreased as clay and silt contents increased.

Key words: Soil texture, soil bulk density, the least limiting water range, soil consistency, soil organic matter.

1 INTRODUÇÃO

O sistema plantio direto é uma tecnologia de manejo de solo que minimiza a erosão em áreas de lavoura. A principal característica do sistema é realizar a semeadura no solo com os restos culturais da cultura anterior na superfície, reduzindo o número de operações agrícolas e os custos de produção. Além disso, possibilita uma maior eficiência na produção, tornando-se uma base para a sustentabilidade do sistema produtivo.

Após a adoção desse sistema, as propriedades físicas dos solos são modificadas e a compactação do solo é um tema de crescente importância. A compactação do solo causada pelo tráfego de máquinas agrícolas realizadas geralmente em condições de umidade inadequada. A compactação do solo afeta as propriedades físicas do solo, com reflexo no rendimento das culturas através da restrição ao crescimento radicular e menor disponibilidade de água e nutrientes.

Para identificar os solos que possuem problemas de compactação, estudos correlacionando o rendimento de plantas, propriedades físicas e disponibilidade de água têm sido realizados e propostos indicadores de qualidade física do solo. Esses indicadores poderão ou não apresentar restrição ao crescimento do sistema radicular, pois o clima de cada região e de cada ano minimiza ou agrava os efeitos da compactação do solo sobre o crescimento das plantas cultivadas.

Conhecer as características e propriedades do solo, que está sendo cultivando, é importante para adoção de um manejo adequado para cada solo. A textura e a matéria orgânica são capazes de afetar as propriedades químicas, físicas e biológicas do solo. Com isso, pode-se determinar a contribuição da textura e matéria orgânica na densidade, aeração, consistência e fenômenos ligados à dinâmica da água no solo.

Dessa forma, algumas propriedades do solo não podem ser utilizadas diretamente como indicadores de qualidade física do solo, devendo ser correlacionadas com a textura.

Esse trabalho teve como objetivo avaliar algumas propriedades físicas de solos sob plantio direto, em propriedades rurais com mais de dez anos de plantio direto e com diferentes texturas, na região do Planalto Médio do Rio Grande do Sul, a partir dessas avaliações relacionar os valores de cada propriedade física do solo com a textura e o teor de matéria orgânica no solo. Através de indicadores de qualidade física de solo avaliar a situação dos solos coletados na existência ou não de restrições ao crescimento de plantas cultivadas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Composição do solo

Conforme Reichardt & Timm (2004) o solo é a camada externa e agricultável da superfície terrestre. A origem do solo é a rocha matriz que, por ação de desintegração, decomposição e recombinação, se transformou, no decorrer das eras geológicas. Klar (1988) define o solo como sendo um sistema poroso constituído por partículas sólidas e espaços vazios, sendo, portanto, um armazenador de nutrientes e água para as plantas.

As partículas sólidas do solo são constituídas por material orgânico e inorgânico, geralmente intimamente ligadas (BUCKMAN & BRADY, 1979; KLAR, 1988).

Conforme Kiehl (1979), a densidade de sólidos da matéria orgânica varia de 0,6 a 1,0 g.cm⁻³. A presença de matéria orgânica altera consideravelmente a densidade de sólidos do solo, devido o seu baixo valor.

Para Libardi (2005), a densidade dos sólidos é a densidade dos sólidos do solo sem a porosidade, sendo essa propriedade importante para a determinação da porosidade total do solo. Essa depende da constituição do solo e, como essa varia relativamente pouco de solo para solo, ela se aproxima da densidade de partículas da rocha. A densidade do quartzo é 2,65 g.cm⁻³ e por isso, a densidade de sólidos oscila em torno deste valor

(REICHARDT & TIMM, 2004). Para Libardi (2005), a densidade de sólidos varia entre 2,3 a 2,9 g.cm⁻³ e como valor médio para efeito de cálculos, pode-se considerar 2,65 g.cm⁻³.

2.1.1 Sólidos minerais do solo

O termo textura diz respeito à distribuição do tamanho das partículas minerais, referindo-se especificamente às proporções relativas dos diversos grupos de minerais. Em conjunto, essa característica ajuda a determinar não somente a capacidade de suprimento de nutrientes do solo, como também o fornecimento de água e ar, tão importantes à vida das plantas. As frações texturais são classificadas em grupos de tamanho, tomando como base seu diâmetro equivalente e denominada de areia, silte e argila. As proporções dessas partículas do solo não estão sujeitas a mudanças rápidas no tempo abrangido por uma geração. A textura é uma característica do solo, que determina inclusive seu valor econômico (BAVER et al., 1973; KIEHL, 1979; REICHARDT & TIMM, 2004).

A fração argila do solo é constituída principalmente por uma mistura, em proporção variável, de argilominerais e de óxidos. Os argilominerais são formados por silicatos com estruturas em camadas, formados por lâminas tetraedais de silício ou alumínio unidas a lâminas octaedrais (INDA et al., 2004). Conforme Buckman & Brady (1979) a argila apresenta pequeno diâmetro, com isso apresenta uma área específica alta (área por unidade de massa), variando de 10 a 100 m².g⁻¹.

Segundo Hillel (1980) e Reichardt & Timm (2004), a fração do solo que mais decisivamente determina seu comportamento físico é a fração argila. Pela grande área específica é a fração mais ativa em processos físicos e químicos que ocorre no solo.

Em contraste com a argila, as partículas da fração silte tendem a apresentar formato irregular fragmentado, de formas variadas e por vezes lisas ou planas. O silte, é de fato, constituído de micropartículas de areia, em que o quartzo é realmente o mineral predominante (BUCKMAN & BRADY, 1979; KLAR, 1988).

A fração areia pode ter forma arredondada ou bastante irregular, dependendo da abrasão a que as partículas foram submetidas. São constituídas principalmente de quartzo, que é o material mais resistente à decomposição, podendo conter fragmentos de feldspato, mica e ocasionalmente vários outros minerais (HILLEL, 1980).

A areia e o silte, segundo Baver et al. (1973) e Reichardt & Timm (2004), têm área específica relativamente pequena e em conseqüência, não possuem grande atividade físico-química, mas é importante na macroporosidade do solo onde predominam fenômenos não capilares.

2.1.2 Matéria orgânica do solo

Segundo Reichardt & Timm (2004), a matéria orgânica no solo é a parte da fração sólida constituída de compostos orgânicos de

origem vegetal ou animal, em seus mais variados graus de transformação. O seu conteúdo, na maioria dos solos, varia entre 1 e 10 % e possui também elevada superfície específica. O estágio mais avançado de transformação é denominado húmus, cujas características típicas são: estado coloidal, cor escura e alta estabilidade no solo. A matéria orgânica do solo quando humificada recebe, juntamente com a fração argila, a denominação comum de complexo coloidal do solo (KIEHL, 1979).

A composição da matéria orgânica é muito variável, sendo a, relação existente entre o carbono e o nitrogênio (C/N). Uma característica importante e que varia muito conforme a origem do material, com valores de 20/1 a 1000/1. O interessante é que, qualquer que seja a relação C/N do resíduo, sua decomposição no solo atinge valores de 10/1 a 12/1, típicos do húmus. O tempo de transformação é variável para cada tipo de resíduo, sendo maior para relações maiores. A relação C/N ideal para a decomposição é 30/1 (REICHARDT & TIMM, 2004).

Segundo Kiehl (1979), o conteúdo e a composição da matéria orgânica são consequência de fatores diversos como: tipo de vegetação, topografia, clima (principalmente temperatura e precipitação pluvial) e mineralogia. No solo, o acúmulo ou a destruição da matéria orgânica sofre o efeito da atividade dos microrganismos, os quais são afetadas pelas condições de umidade, aeração, temperatura e reação do meio (pH), além do indispensável suprimento de nutrientes e de fontes de energia.

Para Bayer & Mielniczuk (1999), as temperaturas mais altas resultam numa elevação das taxas dos processos químicos e bioquímicos.

Conforme a lei de van Hoff, o aumento em 10° C de temperatura duplica a velocidade das reações de natureza biológica. Porém, quando são comparados solos tropicais e solos temperados, a influência da temperatura não é marcante devido à mineralogia do solo e a precipitação pluvial. Elevadas taxas de decomposição são contrabalançadas pela maior taxa de produção de resíduos vegetais que retorna ao solo.

Outra característica climática importante para a dinâmica da matéria orgânica é a precipitação pluvial, de modo que um aumento da precipitação ocorre um aumento do teor de matéria orgânica no solo, como observaram Tognon et al. (1998) em solos do Cerrado e da Amazônia Brasileira.

Solos que apresentam um grau mais avançado de intemperismo, havendo predomínio, na fração argila, de minerais com elevada área específica, determinam a grande interação desses minerais com a matéria orgânica do solo. Como resultado uma maior estabilidade da fração orgânica à decomposição pelos microrganismos (BAYER & MIELNICZUK, 1999). Segundo Tognon et al. (1998), analisando a matéria orgânica nos solos da Amazônia, verificaram que em duas formações diferentes e com vegetação e clima semelhantes ocorre uma variação no teor de matéria orgânica. Solos com presença de minerais 2:1 apresentam teores superiores de matéria orgânica do que solos com domínio de caulinita. Costa et al. (2004) encontraram alta proteção da matéria orgânica no solo pela gibsitita, que mesmo sob plantio convencional apresentou teor semelhante ao plantio direto.

A agregação do solo promove maior proteção física da matéria orgânica no solo, proporcionando aumento na estabilidade de agregados. A quebra dos agregados de solo expõe a matéria orgânica à atividade microbiana, reduzindo o conteúdo de carbono orgânico do solo (COSTA et al., 2004).

O sistema de manejo afeta muito pouco o teor de matéria orgânica no solo, como constatou Freixo (2000), em Passo Fundo – RS, identificando diferença apenas nas camadas de 0-5 e 5-10 cm de solo, onde o sistema plantio direto superou o sistema plantio convencional. As perdas de carbono nas áreas cultivadas são em torno de 10% do seu estoque em comparação com solos sob mata, porém não foram encontradas diferenças entre os sistemas de preparo. Em Goiânia - GO, não foram observadas diferenças nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm, porém houve um acúmulo de carbono em plantio convencional em 10-20 cm, pela incorporação de material vegetal, e os teores de carbono até 30 cm foram superiores preparo convencional do solo.

Comportamento semelhante encontraram Silveira & Cunha (2002) ao observaram que, após cinco anos de plantio direto, não ocorreu aumento no teor de matéria orgânica no solo. Em plantio direto, os maiores valores de matéria orgânica encontram-se na camada de 0-5 cm em relação a 5-20 cm, caracterizando maior variabilidade dessa propriedade em profundidade. Por outro lado, com o uso de arado verificou-se maior uniformidade dos valores da matéria orgânica entre as camadas de solo.

2.2 Propriedades físicas do solo afetadas pela textura e matéria orgânica

A textura do solo interfere em várias propriedades do solo, entre elas estão a densidade (DIAS JUNIOR & MIRANDA, 2000), a resistência mecânica do solo à penetração (RIBON & TAVARES FILHO, 2004), a porosidade, a retenção de água (TOGNON et al., 1998) e a disponibilidade de nutrientes (ANGHINONI & MEURER, 2004).

A principal propriedade física do solo afetada pela matéria orgânica é a agregação do solo. A partir do efeito da matéria orgânica sobre a agregação, indiretamente são afetadas as demais propriedades físicas do solo (BAYER & MIELNICZUK, 1999).

2.2.1 Densidade do solo

A densidade do solo é uma relação entre massa de sólidos secos por seu volume, essa densidade descreve de certa forma a estrutura do solo. O termo estrutura é usado para descrever o solo no que se refere ao arranjo e orientação das partículas sólidas. A estrutura define também a geometria dos espaços porosos. A densidade do solo varia com o volume total da amostra, mantendo a mesma massa de solo e diminuindo o seu volume, estará aumentando a sua densidade, indicando o grau de compactação de um solo (REICHARDT & TIMM, 2004).

A densidade máxima do solo pode ser obtida através do teste de Proctor, essa densidade é necessária para o cálculo da densidade relativa (KLEIN, 2002). Este teste foi descrito por Ralph Proctor em 1933 (VARGAS, 1977; BUENO & VILAR, 1998; NOGUEIRA, 1998) e normalizado pela ABNT pela MB – 33, tornando-se o Ensaio Normal de Compactação.

A densidade do solo é influenciada pela textura do solo (BUENO & VILAR, 1998; REICHARDT & TIMM, 2004; LIBARDI, 2005), solos arenosos apresentam densidade superior ao solo argiloso, enquanto que os solos siltosos apresentam comportamento intermediário. A densidade dos solos arenosos pode variar de 1,3 a 1,8 g.cm⁻³, enquanto os solos argilosos esta variação pode ir de 0,9 a 1,6 g.cm⁻³ e de 0,2 a 0,6 g.cm⁻³ para solos orgânicos. Para a densidade máxima do solo, Klein et al. (2004) apresenta em um solo argiloso (0,66 g.g⁻¹) a densidade de 1,55 g.cm⁻³, enquanto um solo arenoso (0,32 g.g⁻¹) foi de 1,77 g.cm⁻³.

Essa variação na densidade é em decorrência da microagregação das partículas de argila, que acarretam uma porosidade intra-agregados, o que reduz a densidade, sendo esses microagregados extremamente estáveis (KLEIN, 2005). Outro fator que pode contribuir para esse comportamento da densidade do solo é o teor reduzido de matéria orgânica nos solos arenosos (BUCKMAN & BRADY, 1979; KLAR, 1988).

Trabalhando com solos da região de Lavras – MG (DIAS JUNIOR & MIRANDA, 2000) chegaram a uma correlação positiva entre

a densidade máxima do solo (DMs) e o teor de areia (Equação 1). No mesmo estudo, obtiveram a contribuição da matéria orgânica no solo para a densidade máxima (Equação 2).

$$DMs = 2,15 \cdot 10^{-6} (\text{areia})^2 - 7,82 \cdot 10^{-4} (\text{areia}) + 1,5 \quad (1)$$

$$DMs = -0,11 (MO) + 1,69 \quad (2)$$

Onde:

Areia, g.kg⁻¹;

MO: matéria orgânica, g.kg⁻¹.

Figueiredo et al. (1998) e Braida (2004) observaram que houve uma tendência de redução nos valores da densidade máxima do solo com aumento do teor de matéria orgânica no solo.

A pressão de pré-consolidação ou pressão crítica de pré-adensamento a pressão que um solo pode suportar sem que ocorram compactações adicionais e reflete o histórico das pressões exercidas sobre o mesmo (TREIN & BOENI, 2000). Conforme Cubilla et al. (2002), o sistema radicular das plantas não altera significativamente a densidade do solo.

O material orgânico presente no solo, mas que ainda não entrou em processo acelerado de decomposição, tem o papel de prevenção contra a compactação, pois reduz a compressibilidade, propiciando

aeração e diminuindo o efeito do rearranjo das partículas do solo causado pelo tráfego de máquinas agrícolas (PECHE FILHO, 1999).

Quanto maior a quantidade de palha existente sobre a superfície do solo, durante a realização do ensaio Proctor, menores são os valores de densidade obtidos (BRAIDA, 2004). A dispersão da energia ocorre preferencialmente nos golpes finais. Nesses golpes, o solo já está mais compactado enquanto que a palha continua muito susceptível à deformação, passando a funcionar como um amortecedor entre o soquete compactador e o solo. O mesmo foi observado por Marcolin et al. (2004).

A manutenção dos resíduos na superfície do solo é capaz de absorver parte da força originada pelo rodado das máquinas agrícolas, já havia sido destacada por Jones (1995). Seixas et al. (1998) trabalhando com resíduos de madeiras nas trilhas dentro das florestas com tráfego de máquinas encontrou resultado semelhante.

2.2.2 Porosidade do solo

A porosidade é a fração volumétrica do solo ocupada por ar e água, representando o local onde circula a solução e o ar, sendo portanto o espaço em que ocorrem os processos dinâmicos do ar e solução de solo (HILLEL, 1970). Segundo Reichardt & Timm (2004), a porosidade do solo está diretamente dependente da densidade do solo. Essa também é afetada pelo nível de compactação do solo, pois quanto maior a densidade, menor será o volume do espaço poroso.

O arranjo ou a geometria das partículas do solo determina a quantidade e a natureza dos poros existentes. Como as partículas variam em tamanho, forma, regularidade e tendência de expansão pela água, os poros diferem consideravelmente quanto à forma, comprimento, largura, tortuosidade e outras características. A porosidade depende, principalmente, da textura e da estrutura dos solos (KIEHL, 1979).

Em física do solo define-se tamanho de poros como o diâmetro da maior esfera inscrita no interior do espaço ocupado pelo poro. Solos de textura arenosa, pelo fato de possuírem partículas maiores, o espaço poroso também é constituído de poros maiores denominados macroporos, por outro lado, nesses solos o volume total de poros é pequeno. Os solos arenosos possuem porosidade total na faixa de 0,32 a 0,47 $\text{m}^3.\text{m}^{-3}$, enquanto os solos argilosos variam de 0,52 a 0,61 $\text{m}^3.\text{m}^{-3}$ e os solos francos um valor intermediário (REICHARDT & TIMM, 2004; LIBARDI, 2005).

2.2.3 Umidade ótima para compactação

A umidade do solo ótima para a máxima compactação é determinada pelo teste de Proctor. Vargas (1977) explica que, na condição de solo com umidade abaixo da ótima para a compactação, o atrito entre as partículas do solo dificulta o rearranjo das mesmas e proporcionando densidades menores. Já no ponto que corresponde à umidade ótima para compactação a espessura do filme de água próximo à

superfície para saturar os vazios corresponde à máxima densidade possível de ser obtida com a força empregada. Mas quando a umidade do solo estiver acima do ótimo, a água satura os vazios proporcionando densidades menores.

A curva de compactação do solo, segundo Bueno & Vilar (1998), varia em função da textura. Solos arenosos apresentam umidade ótima menor que solos argilosos, enquanto solos siltsos têm um comportamento intermediário. Klein et al. (2004) apresenta exemplos de curvas de compactação em que o teor de argila do solo influencia a umidade ótima para a máxima compactação, sendo que para solo argiloso a umidade ideal foi de $0,32 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$, mas para solo arenoso essa foi de $0,17 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$.

Dias Junior & Miranda (2000) construíram modelo de equação para determinar a umidade ótima para compactação a partir da análise de textura do solo, (Equação 3).

$$UOC = 2,68 \cdot 10^{-4} (\text{argila}) + 0,12 \quad (3)$$

Onde:

Argila, $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Para um mesmo solo, que com o aumento do teor de matéria orgânica deslocou a curva de compactação para a direita, umidade ótima mais elevada (BRAIDA, 2004). Figueiredo et al. (1998) observaram em

seu trabalho que houve uma tendência de um aumento nos valores de umidade ótima de compactação com aumento do teor de matéria orgânica no solo. Esses autores constataram ainda que os valores de umidade de 0,90 do limite de plasticidade e a capacidade de campo podem ser usados como estimativa de umidade ótima de compactação.

2.2.4 Limites de consistência do solo

Consistência do solo, conforme Buckman & Brady (1979), é o termo usado para descrever as condições físicas do solo com diversos teores de umidade. A consistência é considerada uma combinação das propriedades do solo, que dependem das forças de atração entre suas partículas sob influência da umidade. Essa sofre a influência de vários fatores, como tipo de argila e quantidade e tipo de húmus presente. A consistência do solo é, via de regra, classificada em três níveis de umidade: molhado, úmido e seco.

A consistência é consequência da intensidade e natureza das forças de coesão e aderência presentes entre os agregados ou dentro deles, ou entre as partículas do solo. As forças que unem as superfícies sólidas são devidas à tensão superficial existente nos meniscos formados pelas películas de água que envolve partículas de solo. A coesão é proporcional à tensão superficial existente na película de água, variando inversamente com o diâmetro das partículas sólidas. Solo arenoso tem baixa coesão

entre suas partículas, enquanto que solo argiloso tem alta coesão (KIEHL, 1979).

O solo seco, segundo Buckman & Brady (1979), apresenta consistência dura ou tenaz, resistindo ao esmagamento e a outros tipos de manipulação, sendo elevada à atração entre moléculas sólidas versus sólidos. A tenacidade do sólido depende do número de pontos de contato, logo, de modo que quanto mais finas forem suas partículas maiores a tenacidade do solo.

Segundo Baver et al. (1973) o solo úmido apresenta consistência friável e é o estado de umidade em que os solos apresentam melhores condições para o preparo. A umidade existente é suficiente para agir entre as partículas minimizando o efeito cimentante que predomina em solos secos. Por outro lado, não tem água suficiente para formação de película em contato entre as partículas e produzir a coesão existente no solo plástico.

A consistência plástica, conforme Buckman & Brady (1979) e Kiehl (1979), caracteriza-se pelo fato do solo ser moldável ao ser manipulado, achata-se sem se romper e manter a forma quando o esforço é removido. Segundo Baver et al. (1973), essa é uma propriedade das argilas, não apresentada pela areia.

A consistência pegajosa ou viscosa ocorre quando o conteúdo de água superior ao da consistência plástica e se caracteriza pelo fato de um solo, achatam-se como ocorre com a consistência plástica. No entanto,

ao separarem-se se observa a amostra do solo estar aderido a superfície em que aplicou a força de deformação (KIEHL, 1979).

Buckman & Brady (1979) apresentam a equação (4), aonde demonstram a correlação entre o Índice de Plasticidade (IP), umidade entre o limite líquido e plástico, e o teor de argila no solo. Com aumento do teor de argila, ocorre um aumento pequeno do limite de plasticidade e um aumento proporcionalmente maior do limite de liquidez. Conseqüentemente, há um aumento dos índices de plasticidade com os teores crescentes de argila. As determinações dos limites de plasticidade e liquidez, em amostras de solo com diferentes teores de matéria orgânica, mostraram que houve uma diferença pequena no valor do índice de plasticidade, porém ocorre um deslocamento acentuado para os valores dos limites de plasticidade e de liquidez. A explicação para esse fato está na alta absorção de água pela matéria orgânica, evitando a formação de películas em volta das partículas do solo.

$$IP = 0,6 . \text{ argila (\%)} - 12 \quad (4)$$

Os limites de consistência são afetados pelo manejo do solo, conforme Klein & Libardi (2001), comparando os sistemas de manejo de mata, sequeiro e irrigado, constataram que ocorre uma diminuição do índice de plasticidade, provocada pelo aumento da umidade no limite plástico e redução da umidade no limite líquido no solo irrigado.

Destacam ainda que, no sistema plantio direto irrigado, o ponto de friabilidade do solo é atingido com maior teor de água no solo.

2.2.5 Água no solo

Muitos fatores afetam a retenção da água no solo, sendo o principal deles a textura, por determinar a área de contato entre as partículas sólidas e a água, determinando em boa parte a distribuição do diâmetro dos poros (REICHARDT & TIMM, 2004). Para Mesquita & Moraes (2004), o fluxo e a retenção de água no solo dependem, além da textura, da profundidade, estrutura, porosidade e pedofoma.

Conforme Libardi (2005), dois processos, basicamente, explicam a retenção de água pelo solo: a capilaridade e a adsorção. Na capilaridade, a retenção ocorre nos microporos dos agregados, o qual está sempre associada a uma interface ar – água. Na adsorção, a retenção ocorre na superfície dos sólidos do solo como filmes presos a esse. Essa retenção pode ocorrer devido às forças de London-van der Waals, campo elétrico ao redor das partículas e pelo compartilhamento de átomos de oxigênio das moléculas de água. Essas forças formam o potencial mátrico do solo, sendo impossível separar essas forças que compõem o potencial na faixa de umidade de crescimento das plantas.

Segundo Buckman & Brady (1979), a areia possui reduzida capacidade de retenção de água causado pelo grande espaço entre as partículas granulométricas e o rápido escoamento de água de percolação.

Com o aumento da proporção de areia no solo há menor capacidade de retenção de água. Sabendo-se que os solos arenosos possuem maior proporção de macroporos do que microporos e que, de maneira geral, são tanto mais pobres de matéria orgânica, quanto mais grosseiros, fácil se torna a interpretação dessa correlação (KIEHL, 1979). Além disso, conforme Klar (1988), a argila possui maior superfície específica que a areia.

A argila pode reter maior quantidade de água que as demais partículas do solo. Nos solos argilosos predomina a criptoporosidade, a qual é responsável pela retenção da água no solo (KIEHL, 1979). Para esse autor, o silte e a argila podem ser englobados em uma só discussão, por ser constituídas de partículas finas. Estratégia essa utilizada por Arruda et al. (1987) na determinação da capacidade de campo e do ponto de murcha permanente.

Para diferentes argilas, Klar (1988) destaca que a comparação das curvas de retenção das argilas caulinita com as das montmoriloníticas. Afirma que a afinidade da água para com a caulinita é maior que para a montmorilonita, associada as diferentes áreas de superfície específica. Quando a composição mineralógica for constante, a superfície sólida afetada por íons trocáveis exerce papel importante. Baver et al. (1973) destacam que a montmorilonita, com sua grande capacidade de troca de cátions por unidade de massa e sua grande superfície específica, tem maior capacidade de adsorver água que a illita, enquanto que a caulinita tem a menor capacidade de adsorção entre essas três argilas.

Mais recentemente, Bruand & Tessier (2000) concluíram que a propriedade de retenção de água da argila varia grandemente de um solo para outro a respeito da estrutura da argila. Essa variação depende da capacidade de troca de cátion, do tamanho de partícula elementar e da formação da argila.

Trabalhando com classificação físico – hídrica de solos, Ottoni Filho (2003) destaca que os solos arenosos e francos arenosos sempre apresentam alto teor de ar disponível, o que indica que os perfis de solo muito arenosos tendem a não limitar a produção vegetal no que diz respeito a problemas de aeração. Por outro lado, solos francos arenosos ou mesmo mistos arenosos / franco arenoso podem ter alto teor de água disponível nos horizontes superficiais, possivelmente pela influência da matéria orgânica.

Afirma que a relação de retenção de água no solo pelo conteúdo de matéria orgânica é afetada pela textura (RAWLS et al., 2003). O carbono orgânico retém a água em tensões menores, como afirmam os autores que a retenção de água é mais afetada na proporção de carbono orgânico na tensão de 33 kPa em relação à tensão de 1500 kPa. Solos com alto teor de matéria orgânica têm maior capacidade de retenção de água, sendo seu efeito mais evidente nos solos arenosos.

Trabalhando em áreas de agricultura de precisão, Herrera et al. (2005) observaram que a massa da espiga, comprimento da espiga e o número de grãos tiveram uma diminuição altamente significativa no solo com menor teor de argila. Essa variação ocorre devido à disponibilidade

de água e de nutrientes proporcionado pela variação no conteúdo de argila.

Arruda et al. (1987) avaliaram 17 modelos de equações para determinação da capacidade de campo e do ponto de murcha permanente, baseado no teor de argila mais silte, para a capacidade de campo a equação quadrática (5) e para o ponto de murcha permanente, hiperbólica (6) para fins práticos.

$$CC = 3,1 + 0,629 AS - 0,0034 AS^2 \quad (5)$$

$$PMP = \frac{398,9AS}{1308,1 + AS} \quad (6)$$

Onde:

CC: capacidade de campo;

AS: argila mais silte, %;

PMP: ponto de murcha permanente.

Trabalhando com diversos solos na Inglaterra e País de Gales, Hall et al. (1977) correlacionaram a umidade do solo nas tensões da capacidade de campo e ponto de murcha permanente, com diferentes texturas em superfície e subsolos. Para a umidade equivalente na capacidade de campo, em superfície (Equação 7), contribuíram para o modelo linear a argila, silte, matéria orgânica e a densidade do solo,

enquanto que para o subsolo (Equação 8) a matéria orgânica não interferiu na retenção de água. Já o ponto de murcha permanente, em superfície (Equação 9) e no subsolo (Equação 10) o modelo quadrático de umidade em relação ao teor de argila determinou a variação da retenção de água, a partir do teor de argila no solo.

$$CC = 47 + 0,25 \text{ Argila} + 0,1 \text{ Silte} + 1,12 \text{ MO} - 16,52 \text{ Ds} \quad (7)$$

$$CC = 37,2 + 0,35 \text{ Argila} + 0,12 \text{ Silte} - 11,73 \text{ Ds} \quad (8)$$

$$PMP = 2,94 + 0,83 \text{ Argila} - 0,0054 \text{ Argila}^2 \quad (9)$$

$$PMP = 1,48 + 0,84 \text{ Argila} - 0,0054 \text{ Argila}^2 \quad (10)$$

Onde:

CC: capacidade de campo;

Argila, %;

Silte, %;

PMP: ponto de murcha permanente.

2.3 Indicadores de qualidade física do solo

2.3.1 Resistência mecânica do solo à penetração

A resistência mecânica do solo à penetração é uma propriedade que integra a avaliação da compactação do solo, o conteúdo de umidade, a textura e os tipos de minerais da argila presentes. Essa determinação depende da consistência e da estrutura do solo (BAVER et al., 1973). Para Imhoff et al. (2000) a curva de resistência mecânica do solo à penetração é um parâmetro útil na avaliação da qualidade física do solo, a qual permite identificar áreas com resistência mecânica potencialmente limitante ao crescimento das raízes e estabelecer a umidade e a densidade do solo crítica para o desenvolvimento das plantas.

Taylor & Gardner (1963) verificaram que, em resistência superior a 2 MPa não ocorre desenvolvimento do sistema radicular do algodão. Esse valor vem sendo o mais utilizado pela literatura como impeditivo para a maioria das culturas (TAYLOR et al., 1966; TORMENA et al. 1998; TORMENA et al. 1999; KLEIN, 2002).

Trabalhando os fatores que influenciam na resistência mecânica do solo a penetração, Ribon & Tavares Filho (2004) concluíram que o modelo que melhor permitiu a estimação da qualidade física do Latossolo Amarelo-vermelho textura média sob pastagem foi o que correlacionou resistência à penetração (RP), densidade de solo (Ds), matéria orgânica (MO) conteúdo de argila (Ag), conforme a Equação

(11). A avaliação da matéria orgânica e o conteúdo de argila dos solos são, portanto, ferramentas importantes, junto com as outras propriedades físicas que indicaram compactação de solo, na avaliação de qualidade física.

$$RP = - 12,134 + 0,004 MO + 7,6187 Ds + 0,131 Ag \quad (11)$$

Onde:

MO: matéria orgânica, kg.dm^{-3} ;

Ds: densidade do solo, g.cm^{-3} ;

Ar: argila, g.kg^{-1} .

Provavelmente, conforme Ribon & Tavares Filho (2004), a relação positiva obtida entre matéria orgânica e resistência à penetração poderia ser explicada pelo fato que matéria orgânica tem uma propriedade cimentante. A matéria orgânica obteve correlação positiva com a resistência a penetração e densidade de solo.

O sistema de preparo afeta a resistência do solo à penetração. Conforme Costa et al. (2003), o preparo convencional aumenta a resistência do solo à penetração e essa alteração ocorre devido à degradação das propriedades relacionadas com a forma e com a estabilidade da estrutura do solo em relação à mata nativa, evidenciada também pelo aumento da densidade do solo e pela diminuição da estabilidade de agregados. Também Prado et al. (2002) estudando

diferentes sistemas de preparo, observaram que a resistência à penetração aumenta quando o solo é submetido a longo período de pousio.

Araujo et al. (2004) verificaram que a resistência do solo à penetração foi influenciada positivamente pela densidade e negativamente pela umidade do solo, com maior magnitude no solo cultivado. A densidade do solo afetou a retenção de água, refletindo os efeitos do uso do solo.

A matéria orgânica no solo não teve efeito na resistência à penetração, não alterando significativamente esta propriedade no trabalho de Souza et al. (2005). Esses mesmos autores constataram que o menor valor de resistência do solo à penetração foi observado na camada de 0,0 – 0,1 m, graças ao revolvimento anual do solo nessa profundidade, o qual proporciona uma descompactação dessa camada em plantio convencional.

Segundo Assis & Lanças (2005), a resistência do solo à penetração não apresentou variação com o tempo de adoção do sistema plantio direto e em relação ao tipo de preparo, sendo influenciado apenas em profundidade, de forma mais acentuada, abaixo da camada de 0–10 cm.

Em lavouras sob plantio direto, Silva et al. (2004) observaram que o tráfego de máquinas provoca diferentes estados de compactação. O maior estado de compactação ocorre na região dita “cabeceira” da lavoura, onde as máquinas realizam as manobras e o estado de compactação vai reduzindo-se para o centro da lavoura. Constatação

semelhante foi realizada por Pereira et al. (2002), onde o sistema de plantio direto propiciou maior compactação do solo.

Existe uma relação direta entre a intensidade de tráfego e a profundidade onde se localiza a camada de maior resistência à penetração nos solos sob plantio convencional (TERMINIELLO et al., 2004).

Em relação aos efeitos observados nas plantas, Beutler & Centurion (2004a) observaram que a compactação reduz a produtividade de soja e esse efeito é menor no solo adubado. Beutler & Centurion (2004b), trabalhando com soja e arroz, observaram que a altura das plantas foi reduzida com valores de resistência à penetração superior a 3 MPa. Semelhantemente Câmara (2004) encontrou, também na cultura da soja, que a resistência à penetração de 3 MPa não foi limitante.

Para Beutler & Centurion (2004c), o valor de resistência do solo à penetração limitante à produtividade de grãos de arroz de sequeiro foi de 2,38 e 2,07 MPa, respectivamente para o Latossolo Vermelho textura média e Latossolo Vermelho textura argilosa, na umidade retida na tensão de 0,01MPa.

Já em relação ao milho, Rosolem et al. (1999) observaram que o aumento da resistência do solo à penetração causa diminuição no volume de raízes. A resistência do solo à penetração em torno de 1,3 MPa reduziu pela metade o volume das raízes do milho. Foloni et al. (2003) observaram que o sistema radicular do milho não é capaz de romper uma camada compactada de solo com resistência mecânica de 1,4 MPa.

2.3.2 Densidade relativa do solo

Como foi visto anteriormente, a densidade do solo sofre influência da textura. Dessa forma, a observação dessa propriedade não nos fornece informações suficientes sobre a sua compactação.

Com isso, foi estabelecido o conceito de densidade relativa do solo. Conforme descrevem Carter (1990), Hakansson (1990) e Klein (2002), é a relação da densidade do solo com sua densidade máxima, obtida pelo teste de Proctor normal.

A densidade relativa apresenta influência sobre o volume de macroporos do solo, como observou Carter (1990) e Ferreras et al. (2001). Além disso, a densidade relativa apresenta influência no crescimento radicular e rendimento das plantas cultivadas (LIPIEC et al., 1991).

Em relação ao rendimento de cevada (*Hordeum vulgare* L.) e trigo (*Triticum aestivum* L.), Carter (1990) observou que foi maior com densidade relativa entre 0,77 e 0,84, decrescendo quando a densidade relativa for acima ou abaixo desses valores.

Trabalhando com cevada, Hakansson (1990) obteve o máximo rendimento na densidade relativa de 0,87 para solos da Suécia. Também trabalhando com cevada na Polônia, Lipiec et al. (1991) observaram que o rendimento diminuiu quando a densidade relativa ultrapassava o valor de 0,91.

Beutler et al. (2005) observou que a densidade relativa do solo ótima para rendimento da soja (*Glycine max* L.), em casa de vegetação, foi de 0,84 e 0,75 respectivamente, em solo argiloso (0,52 g.g⁻¹ de argila) do que para solo de textura média (0,27 g.g⁻¹ de argila). Enquanto que em nível de campo, em solo de textura média, a densidade relativa ótima encontrada foi de 0,80.

A densidade relativa ótima e limitante também pode ser obtida a partir da densidade do intervalo hídrico ótimo (IHO). Klein (2002) obteve a densidade máxima do solo de 1,51 Mg m⁻³ e a densidade em que obteve a máxima disponibilidade de água às plantas foi de 1,08 Mg m⁻³, o que equivale a uma densidade relativa de 0,715. A densidade que apresentou limitações para as plantas foi de 1,33 Mg m⁻³, equivalente à densidade relativa de 0,88. Nessas condições a probabilidade de risco ao desenvolvimento das plantas é extremo, já que nesse valor de densidade de solo o IHO é zero.

2.3.3 Intervalo hídrico ótimo – IHO

Orellana et al. (1997) propuseram uma metodologia para avaliação da qualidade física do solo e a denominaram de o intervalo hídrico ótimo. Esses autores destacam que o IHO é um parâmetro que reflete condições em que a umidade do solo é ótima ao desenvolvimento das plantas, sendo o limite crítico dependente da cultura, clima, solo e

podendo ser alterado pelo manejo do solo e pela atividade biológica de raízes e insetos.

Essa metodologia foi utilizada por Klein (1998) para determinar o IHO utilizando os limites de capacidade de campo (8kPa), ponto de murcha permanente (1500 kPa), resistência à penetração (2 MPa) e a porosidade de aeração do solo ($0,1 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$).

Tormena et al. (1999) destacam que os potenciais no quais a porosidade de aeração é de $0,1 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ e no qual a resistência à penetração atinge 2,0 MPa, são fortemente influenciados pela densidade do solo. Com o aumento da densidade do solo, verifica-se aumento de potencial necessário para ocorrer à porosidade de aeração de $0,1 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$. Afirmam ainda que o IHO é positivamente afetado pela densidade até uma densidade ótima, decrescendo após esse valor.

A determinação do intervalo hídrico ótimo é um parâmetro importante no monitoramento da compactação do solo e na prevenção de perdas de produtividade do arroz de sequeiro (BEUTLER et al., 2004).

Trabalhando com diferentes sistemas de manejo de pastagem, Leão (2002) e Leão et al. (2004) observaram que a condição física do solo, avaliada pelo intervalo hídrico ótimo, mostrou-se mais restritiva ao crescimento das plantas no sistema de pastejo rotacionado que no pastejo contínuo, influenciada pela maior taxa de lotação animal. A adubação de manutenção em pastejo contínuo não influenciou as condições físicas do solo. No pastejo rotacionado, o IHO não foi afetado pela posição touceira e entre touceira, o mesmo não se repetindo no pastejo contínuo. Maior

quantidade de resíduo pós-pastejo em pastejo rotacionado de *Panicum maximum* cv. Tanzânia proporcionou menor prejuízo às propriedades físicas do solo.

No arroz de sequeiro, a compactação do solo a partir de um valor de resistência do solo à penetração de 1,82 MPa e de densidade do solo de 1,62 g.cm⁻³ reduz a produtividade em Latossolo Vermelho de textura média (BEUTLER et al., 2004).

3 MATERIAL E MÉTODOS

Para este trabalho foram coletadas amostras de cinco solos da região do Planalto Médio Gaúcho, todos sob sistema plantio direto estabelecido há mais de dez anos. Os solos apresentaram uma variação granulométrica de 0,30 a 0,80 g.g⁻¹ de teor de argila. Valores esses estão na Tabela 1, com análise granulométrica detalhada.

No solo 1 foi coletado na propriedade de Amadeo Carassa, no município de Pontão. Possui uma variação no teor de argila em profundidade foi de 0,30 g.g⁻¹, da camada de 0 a 5 cm para 0,36 g.g⁻¹, na camada de 25 a 30 cm. Esse solo apresentou teor de areia variando de 0,51 g.g⁻¹, na camada de 25 a 30 cm, a 0,53 g.g⁻¹, na camada de 5 a 10 cm. De acordo com Brasil (1973) e Streck et al. (2002), esse solo está classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico, na Unidade de Mapeamento Passo Fundo, porém apresenta um teor de argila menor ao descrito, pela influência do Arenito Botucatu no material de origem.

O solo 2, coletado no campo experimental da FAMV/UPF, município de Passo Fundo, possui a mesma classificação em relação ao solo 1. Porém esse solo apresenta teores de argila variando de 0,42 g.g⁻¹ para a profundidade de 0 a 5 cm, a 0,48 g.g⁻¹, na profundidade de 25 a 30 cm. A areia total, por consequência, diminui para 0,34 g.g⁻¹, para a camada de 25 a 30 cm, para 0,38 g.g⁻¹, para a camada de 0 a 5 cm. Esses valores estão de acordo com o que foi descrito por Brasil (1973) e Streck et al. (2002) para esse solo.

Tabela 1 – Granulometria dos solos por local de coleta e por profundidade

Profundidade	Argila	Silte	Areia					
			total	muito grossa	grossa	média	fina	muito fina
cm	-----		g.g ⁻¹					-----
Solo 1								
0 a 5	0,3082	0,1511	0,5407	0,000	0,0066	0,0884	0,3797	0,0660
5 a 10	0,3296	0,1326	0,5379	0,000	0,0064	0,0943	0,3701	0,0670
10 a 15	0,3005	0,1453	0,5542	0,000	0,0071	0,0943	0,3865	0,0664
15 a 20	0,3247	0,1306	0,5447	0,000	0,0059	0,0911	0,3779	0,0698
20 a 25	0,3390	0,1340	0,5270	0,000	0,0070	0,0870	0,3606	0,0724
25 a 30	0,3615	0,1231	0,5154	0,000	0,0056	0,0827	0,3563	0,0709
Solo 2								
0 a 5	0,4229	0,1894	0,3876	0,0025	0,0110	0,0949	0,2234	0,0558
5 a 10	0,4760	0,1657	0,3583	0,0031	0,0094	0,0797	0,2087	0,0574
10 a 15	0,4834	0,1461	0,3705	0,0040	0,0106	0,0827	0,2146	0,0585
15 a 20	0,4834	0,1650	0,3517	0,0031	0,0104	0,0849	0,1982	0,0550
20 a 25	0,4627	0,1735	0,3637	0,0022	0,0091	0,0816	0,2116	0,0592
25 a 30	0,4839	0,1678	0,3483	0,0075	0,0135	0,0724	0,1984	0,0564
Solo 3								
0 a 5	0,5506	0,1528	0,2965	0,0006	0,0056	0,0312	0,2080	0,0511
5 a 10	0,5735	0,1267	0,2998	0,0000	0,0050	0,0341	0,2087	0,0521
10 a 15	0,5692	0,1216	0,3091	0,0011	0,0039	0,0269	0,2205	0,0568
15 a 20	0,5735	0,1334	0,2931	0,0004	0,0048	0,0265	0,2067	0,0547
20 a 25	0,5779	0,1399	0,2822	0,0020	0,0055	0,0212	0,1956	0,0579
25 a 30	0,5742	0,1377	0,2882	0,0015	0,0056	0,0226	0,2056	0,0528
Solo 4								
0 a 5	0,5792	0,3682	0,0525	0,0018	0,0037	0,0061	0,0275	0,0134
5 a 10	0,6573	0,2892	0,0535	0,0020	0,0032	0,0063	0,0280	0,0140
10 a 15	0,6567	0,2917	0,0516	0,0010	0,0026	0,0049	0,0285	0,0146
15 a 20	0,6580	0,3130	0,0290	0,0000	0,0000	0,0010	0,0154	0,0126
20 a 25	0,6797	0,2738	0,0465	0,0000	0,0010	0,0037	0,0272	0,0146
25 a 30	0,7189	0,2274	0,0538	0,0000	0,0024	0,0051	0,0312	0,0150
Solo 5								
0 a 5	0,7176	0,2691	0,0133	0,0037	0,0016	0,0000	0,0028	0,0052
5 a 10	0,7698	0,2201	0,0101	0,0030	0,0011	0,0000	0,0021	0,0039
10 a 15	0,7551	0,2319	0,0130	0,0022	0,0036	0,0011	0,0025	0,0036
15 a 20	0,7444	0,2420	0,0137	0,0050	0,0025	0,0011	0,0021	0,0030
20 a 25	0,7884	0,2000	0,0116	0,0029	0,0017	0,0017	0,0019	0,0034
25 a 30	0,7671	0,2228	0,0101	0,0016	0,0028	0,0016	0,0016	0,0024

O solo 3, coletado na propriedade de Humberto Falcão, no município de Sarandi, apresentou uma variação pequena no teor de argila na profundidade, variando de $0,55 \text{ g.g}^{-1}$ na camada de 0 a 5 cm, para $0,57 \text{ g.g}^{-1}$ para as camadas de 15 até 30 cm de profundidade. Conforme a classificação desse solo apresentada por Brasil (1973) e Streck et al. (2002), esse solo é classificado como Latossolo Vermelho aluminoférrico típico, na unidade de mapeamento Erechim. Os valores de argila estão abaixo do valor descrito para essa unidade de mapeamento, provavelmente pela influência do arenito como material de origem na formação do solo, por ser coletado próximo do limite dessa unidade de mapeamento com o solo Passo Fundo com influência do arenito no material de origem. Outra possibilidade para a ocorrência de teores de argila menor que o descrito para a unidade de mapeamento se deve pela microagregação no tamanho de silte com boa estabilidade formando pseudo-silte, conforme descreve Vitorino et al. (2003), alterando os valores obtidos na análise granulométrica do solo pela não dispersão de argila.

O solo 4 foi coletado na propriedade do senhor Vilmar José Marcolin, município de Água Santa, apresentando uma variação na textura de $0,57 \text{ g.g}^{-1}$ de argila, na profundidade de 0 a 5 cm, para $0,71 \text{ g.g}^{-1}$ de argila na profundidade de 25 a 30 cm. Conforme Brasil (1973) e Streck et al. (2002), um Nitossolo Vermelho distroférico alissólico da unidade de mapeamento Estação apresenta menos de $0,60 \text{ g.g}^{-1}$ de argila no horizonte A e mais de $0,70 \text{ g.g}^{-1}$ no horizonte B. Dessa forma, o solo

estudado supera o valor de argila descrita para o horizonte A, aproximando-se dos valores de argila para o horizonte B, indicando uma aproximação da superfície do solo com o horizonte B.

O solo 5, coletado na propriedade de Volnei José Bianchi, município de Ibiacá, pertence à mesma classificação do solo 3. Possui um teor de argila variando de 0,71 a 0,78 g.g^{-1} no perfil estudado, ficando acima do valor mínimo apresentado por Brasil (1973) e Streck et al. (2002) para a unidade de mapeamento.

Em cada solo foram retiradas amostras com estrutura preservada, nas profundidades de: 0 a 5; 5 a 10; 10 a 15; 15 a 20; 20 a 25; e 25 a 30 cm, em mini-trincheiras. Essas amostras foram utilizadas para determinação da densidade do solo, da curva de retenção de água e da resistência do solo à penetração. A coleta das amostras foi realizada com auxílio de um amostrador do tipo “Uhland”, utilizando cilindros de aço inoxidável com aproximadamente 100 cm^3 . As coletas foram de forma aleatória com seis amostras para cada solo, evitando coletar nas regiões de cabeceira da lavoura e locais aonde havia terraços recentemente.

Nessas profundidades foram coletadas também amostras com estrutura não preservada para a determinação da densidade de sólidos, da textura, dos limites de consistência do solo (plasticidade e liquidez), da matéria orgânica e para o teste de Proctor. Os solos coletados sem estrutura preservada nas seis repetições foram homogeneizados por camadas e realizando apenas uma análise por camada de cada solo.

Para a análise granulométrica ou da textura, foi baseada no princípio da velocidade de queda das partículas, conforme a *Lei de Stokes*, utilizando como dispersante hidróxido de sódio, seguindo a rotina da EMBRAPA (1997).

Em relação à densidade de sólidos, foi realizada análise de seguindo a rotina da EMBRAPA (1997). Pesagem de 20 g de solo seco na estufa a 105 °C por 24 horas. Colocação desse solo em um balão volumétrico de 100 mL. Acrescentar álcool no balão até cobrir todo o material (40 ou 50 mL). Deixar o balão volumétrico em uma câmara de vácuo até parar de sair bolhas de ar do líquido, após manter o balão fechado por 24 horas para sair completamente o ar existente no interior dos agregados. No final completar o volume do balão volumétrico com álcool. Para calcular a densidade de sólidos é utilizada a equação (12).

$$DS = \frac{MS}{100 - VA} \quad (12)$$

Onde:

DS = Densidade de sólidos (g.cm⁻³)

MS = Massa de solo (g)

VA = Volume do álcool (mL)

Na determinação do limite de liquidez do solo, mudança do estado plástico para o estado líquido, foi baseado no método descrito pela Embrapa (1997). O processo inicia-se com o umedecimento de

aproximadamente 100 g de solo até obter consistência pastosa e deixar em um recipiente fechado por 24 horas, o solo não foi seco em. Espalharam-se aproximadamente 30 mL de solo na casula metálica do aparelho de Casagrande, de modo que a parte central tenha 1 cm de espessura. Cortou-se a massa de solo na sua parte central com o cortador próprio do aparelho. Girou-se a manivela do aparelho numa velocidade constante de 2 rotações por segundo, anotando-se o número de pancadas quando a ranhura central se fechar à espessura de 1 cm. Utilizando-se as repetições quando o número de pancadas fosse entre 15 e 35, retirando-se uma amostra de solo da cápsula para calcular o teor de umidade em estufa a 105° C. O limite de liquidez é representado pelo valor de umidade correspondente a 25 pancadas. A operação foi repetida cinco vezes e o limite de liquidez foi calculado pela Equação (13).

$$LL = W_N \left(\frac{N}{25} \right)^{0,12} \quad (13)$$

LL = limite de liquidez

W_N = umidade ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) correspondente a N pancadas.

N = o número de pancadas da determinação.

Para a determinação do teor de umidade do solo referente à mudança do estado friável para o estado plástico é o limite de plasticidade, que é determinado através da metodologia descrita pela

Embrapa (1997). Aonde retira-se aproximadamente 10 a 15 g da massa de solo proveniente da determinação do limite de liquidez e formar uma bola. Comprimindo essa bola sobre placa de vidro com o auxílio dos dedos, até formar um bastão cilíndrico de 3 mm de diâmetro e começando a quebrar-se, adicionando água ou solo seco para atingir esta consistência. Colocando os bastões em latas de alumínio para determinação da umidade em estufa a 105 °C, repetindo essa operação cinco vezes. O cálculo da umidade no limite de plasticidade é pela média da umidade de todas as determinações realizadas com cada solo.

A determinação da densidade máxima dos solos e a umidade ótima para compactação, para cada solo e profundidades, foram através do teste de Proctor normal com 560 kPa de energia (NOGUEIRA, 1998). Aonde o solo é peneirado em uma peneira de malha 4 mm, determinado à umidade do solo, preparado sete amostras de 2,2 kg cada, umedecido uma amostra até conseguir moldá-la na mão. A partir de então se acrescenta água, variando a umidade em 2% para solos argilosos e 1,5% para solos arenosos para cada amostra. Para compactar, inicia-se pela segunda amostra, podendo a primeira amostra ser compactada tanto para o primeiro ponto como para o último ponto (mais úmido), conforme os resultados obtidos. Para a compactação, efetua-se em 3 camadas, utilizando 25 golpes do soquete. Entre uma camada e outra, efetua-se uma escarificação na superfície para melhor contato entre as camadas. A última camada não pode exceder a 1 cm o limite superior do anel. Tomando cuidado especial na retirada do sobreanel para não danificar o

núcleo, ajusta-se o volume de solo ao volume do anel, pesa-se o anel com o solo compactado, retirado-se a mostra de solo do interior do anel e coletando-se três amostras do solo do interior do núcleo para o cálculo da umidade na estufa a 105 °C.

Após o cálculo da umidade média de cada núcleo realiza-se o cálculo do valor do solo seco do núcleo por “rega de três” e posterior a densidade de cada núcleo. Com estes valores constrói-se um gráfico com os valores da umidade e de suas respectivas densidade, realizando uma regressão polinomial de segundo grau dos pontos e pela derivação desta equação se obtém os valores da densidade máxima e a umidade ótima de compactação.

As amostras de solo com estrutura preservada foram submetidas às tensões de 2; 4; 6; 8; 10; 100; 300; 500 e 1500 kPa, para determinação da curva de retenção da água no solo. Para as tensões até 10 kPa utilizou-se funis de placa porosa, para as tensões 100 e 300 kPa, utilizou-se painéis de pressão com placa porosa e para a tensão de 500 e 1500 kPa utilizou-se o psicrômetro do modelo WP4 Dewpoint Potential Meter (DECAGON DEVICES, 2000).

A curva de retenção da água no solo em função do potencial mátrico foi ajustada a equação (14) de Van Genuchten (1980), utilizando o software SWRC (DOURADO NETO et al., 1990).

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left[1 + (\alpha\psi_m)^n\right]^m} \quad (14)$$

Onde:

θ = Umidade do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)

θ_s = Umidade do solo saturado ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)

θ_r = Umidade do solo à tensão de 1500 kPa ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)

Ψ_m = Potencial mátrico da água no solo (kPa)

α , m , n = Parâmetros empíricos da equação.

A resistência do solo à penetração foi determinada em laboratório, utilizando um penetrômetro eletrônico modelo MA-933, marca Marconi, com velocidade constante de $10,02 \text{ mm.s}^{-1}$, equipado com uma célula de carga de 100 N, haste com cone de 4 mm de diâmetro de base e semi-ângulo de 30° , receptor e interface acoplado a um microcomputador para coleta dos dados através de um software próprio do equipamento. As determinações foram realizadas em amostras com estrutura preservada após da determinação da curva de retenção de água no solo, essas amostras foram submetidas a diferentes tensões (0; 2; 8; 100; 300 350 kPa). Para cada amostra foram obtidos 250 valores e utilizados cerca de 200 valores centrais, em um ensaio por cilindro. Os valores de resistência à penetração foram ajustados a um modelo não-lineares proposta por Busscher (1990), que ajusta esta resistência em relação à densidade e a umidade do solo conforme equação (15).

$$RP = a * \theta^b * Ds^c \quad (15)$$

Onde:

a, b, c = Parâmetros empíricos

Ds = Densidade do solo

θ = Umidade volumétrica ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)

Para a determinação da densidade do solo, as amostras de solo com estrutura preservada, após as determinações da curva de retenção da água no solo e da resistência mecânica do solo à penetração, foram levadas à estufa e obtida a massa de solo seco e com a relação com o volume do anel foi calculado a sua densidade (EMBRAPA, 1997).

As análises do de matéria orgânica, foram realizadas no Laboratório de Fertilidade do Solo da FAMV – UPF, seguindo a metodologia da solução sulfocrômica de Tedesco et al. (1995).

A porosidade total foi determinada pela relação entre densidade do solo e densidade dos sólidos, conforme equação (16) (EMBRAPA, 1997).

$$\text{Porosidade total} = 1 - \frac{\text{Densidade do solo}}{\text{Densidade de sólidos}} \quad (16)$$

A determinação da densidade relativa (Klein, 2002), foi calculada a partir da equação (17):

$$DR = \frac{\text{Densidade do solo}}{\text{Densidade máxima do solo}} \quad (17)$$

Para determinar o intervalo hídrico ótimo (IHO), foram plotados no gráfico o valor da umidade volumétrica no solo nas tensões da porosidade de aeração de $0,1 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, da capacidade de campo (8 kPa), do ponto de murcha permanente (1500 kPa) e das resistências mecânicas do solo à penetração de 2 e 3 MPa, com suas respectivas densidades de solo. Com esses pontos, inseriu-se linha de tendência para cada potencial de água no solo. Projetando-se essas linhas de tendência para densidades de solo superiores às encontradas no campo, obtendo-se a densidade aonde a linha do limite superior do IHO (porosidade de aeração ou capacidade de campo) cruzasse a linha do limite inferior do IHO (ponto de murcha permanente ou resistência do solo à penetração), com isso obteve a densidade do solo crítica em que o IHO fosse igual a zero.

A umidade ótima para compactação foi relacionado com o limite de plasticidade para determinação da relação entre as duas propriedades do solo, conforme Equação (18) (FIGUEIREDO et al., 1998). Com esse índice foi realizado uma regressão polinomial de segundo grau com a textura para avaliar a variação desta relação.

$$Rel \rightarrow \frac{UO}{LP} = \frac{\text{Umidade ótima para compactação}}{\text{Limite de plasticidade do solo}} \quad (18)$$

Para avaliar a contribuição da textura e da matéria orgânica do solo, foram realizadas regressões lineares (múltiplas e simples) ou quadráticas, que melhor expressasse a propriedade física estudada com a textura e a matéria orgânica do solo. Nas regressões lineares múltiplas foram incluídas as variáveis que apresentaram variação significativa pelo teste F, pelo método Stepwise. Nas regressões, linear e quadrática, permaneceram as equações que apresentaram variação significativa pelo teste F nos níveis de 0,1 (+), 0,05 (*) e 0,01 (**).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Matéria orgânica

O teor de matéria orgânica nos solos estudados diminui com o aumento da profundidade (Figura 1). Comportamento esse semelhante ao descrito por Freixo (2000), Silveira & Cunha (2002) e Costa et al. (2004), devido ao maior acúmulo de material vegetal na superfície.

A redução do teor de matéria orgânica nos solos estudados não apresenta um comportamento linear, apresentando nos solos 1 e 2 (Figura 1) um pequeno aumento no teor da matéria orgânica nas camadas de 20 a 25 e 25 a 30 cm, respectivamente. Para os solos 3 e 5 o teor não chega a aumentar, mas provoca uma estabilização dos valores nas camadas de 15 a 20 e 15 a 20 cm, respectivamente. Destaca-se que o solo 4 apresenta um aumento no teor de matéria orgânica na camada de 10 a 15 cm e uma estabilização na camada de 20 a 25 cm.

O acúmulo de matéria orgânica nas camadas mais profundas dos solos ocorre, provavelmente, pela incorporação no solo de restos culturais no período preparo convencional. Freixo (2000) também observou um acúmulo em sistema plantio convencional na camada de 10 a 20 cm. A profundidade do acúmulo da matéria orgânica pode variar em função da profundidade de trabalho dos implementos agrícolas utilizados para revolvimento do solo e a incorporação dos resíduos das culturas.

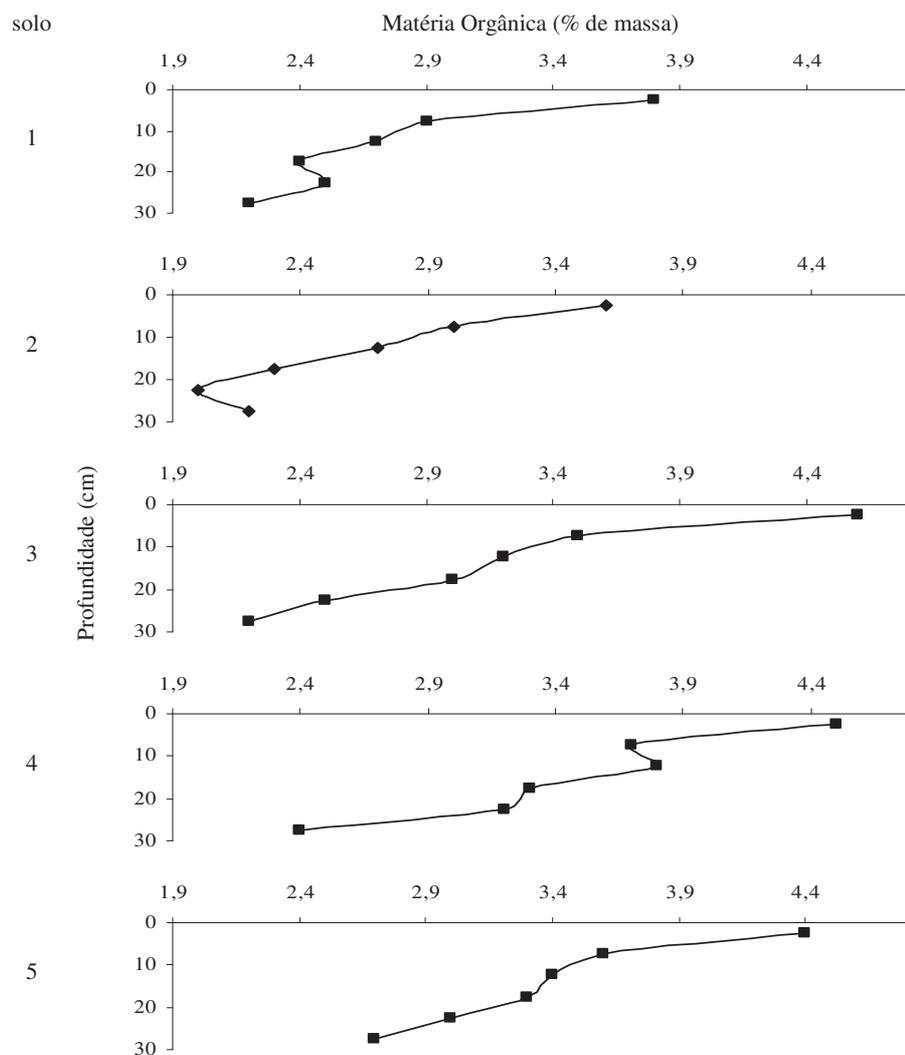


Figura 1 – Variação do teor de matéria orgânica em profundidade para cada solo.

A permanência dessa matéria orgânica acumulada em profundidade no solo pode ser provocada por diversos fatores, entre eles podemos destacar os fatores que reduzem a atividade microbiana como principalmente a aeração (KIEHL, 1979) e a proteção da matéria orgânica pelos minerais do solo (TOGNON et al., 1998; COSTA et al., 2004).

Houve um aumento do teor médio de matéria orgânica no perfil dos solos com o aumento do teor médio de argila (Figura 2). Essa tendência está de acordo com o que afirmam Kiehl (1979), Tognon et al. (1998), Bayer & Mieniczuk (1999) e Costa et al. (2004), devido à interação dos minerais do solo com a matéria orgânica, proporcionando uma maior estabilidade para a decomposição pelos microrganismos. Segundo Bayer & Mieniczuk (1999), a proporção do tamanho das partículas do solo é mais importante na determinação do teor de matéria orgânica no solo do que a variação da temperatura entre regiões.

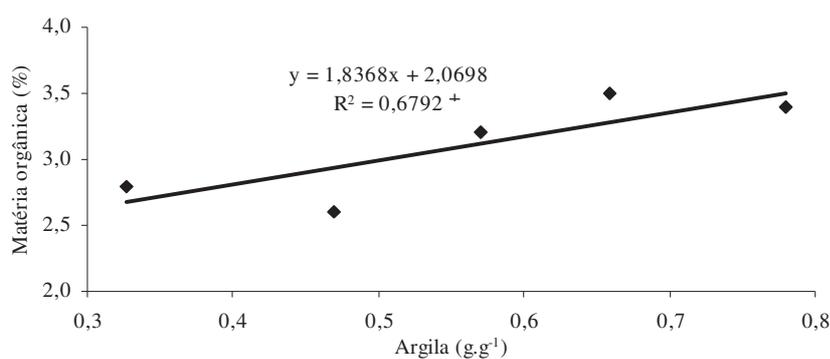


Figura 2 – Variação do teor médio de matéria orgânica no solo (% de massa) com o teor médio de argila, + significativo a 0,1 no teste F.

4.2 Densidade, densidade máxima e densidade relativa do solo

A densidade do solo e a densidade máxima do solo (teste de Proctor), em profundidade, estão apresentadas na Figura 3. As equações das curvas de compactação dos solos em profundidade com sua respectiva densidade máxima do solo e umidade ótima para compactação estão na Tabela 2.

A densidade do solo apresentou um comportamento semelhante para todos os solos, com um valor relativamente baixo na camada superficial, um aumento nas camadas sub superficiais e com uma nova redução nas camadas mais profundas. Porém, os solos 1 e 3 apresentam um aumento da densidade na camada de 25 a 30 cm. Esta variação da densidade do solo provavelmente reflete o histórico das compactações de cada solo, podendo ser “pé de grade” ou “pé de arado”, conforme a profundidade da maior densidade do solo.

Como destaca Cubilla et al. (2002), o sistema radicular das plantas cultivadas não altera significativamente a densidade do solo. Com isso, a variação da densidade do solo no perfil pode dar idéia da compactação sofrida pelo mesmo por um período longo, talvez desde o período de preparo convencional, como é o caso dos solos 1 e 3 que apresentam um aumento da densidade na camada de 25 a 30 cm, caracterizando um “pé de arado”.

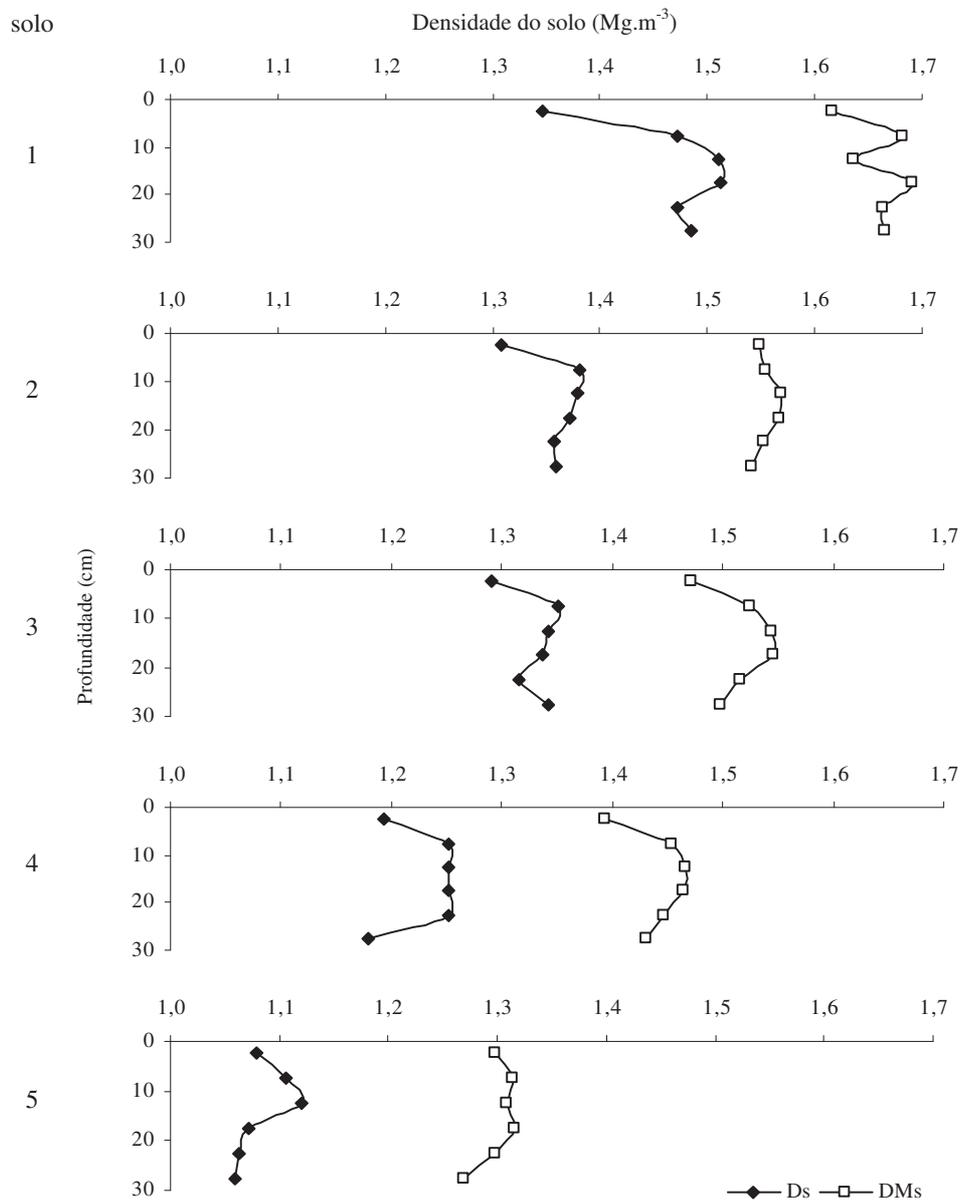


Figura 3 – Variação da densidade do solo (Ds) e densidade máxima no solo (DMs) com a profundidade dos solos.

Tabela 2 – Umidade ótima para compactação (UO), densidade máxima do solo (Ds max), curva de compactação do solo e coeficiente de determinação (r^2) para cada profundidade dos diferentes solos

Prof cm	UO g.g ⁻¹	Ds máx g.cm ⁻³	Equação	r ²
Solo 1				
0 a 5	0,1941	1,617	Ds = -41,207u ² + 16,00u + 0,0637	0,9087
5 a 10	0,1833	1,682	Ds = -72,885u ² + 26,721u - 0,767	0,9425
10 a 15	0,1849	1,636	Ds = -38,151u ² + 14,106u + 0,3316	0,7926
15 a 20	0,1785	1,692	Ds = -72,743u ² + 25,975u - 0,6271	0,9492
20 a 25	0,1823	1,663	Ds = -65,762u ² + 23,973u - 0,5214	0,5317
25 a 30	0,1808	1,666	Ds = -134,38u ² + 48,603u - 2,7288	0,9357
Solo 2				
0 a 5	0,2208	1,549	Ds = -56,371u ² + 24,893u - 1,1993	0,9999
5 a 10	0,2218	1,553	Ds = -38,836u ² + 17,231u - 0,3579	0,9908
10 a 15	0,2196	1,569	Ds = -47,346u ² + 20,798u - 0,7144	0,8892
15 a 20	0,2221	1,566	Ds = -40,205u ² + 17,865u - 0,4182	0,9423
20 a 25	0,2241	1,553	Ds = -38,238u ² + 17,138u - 0,3674	0,9961
25 a 30	0,2319	1,541	Ds = -39,154u ² + 18,16u - 0,5651	0,9933
Solo 3				
0 a 5	0,2663	1,472	Ds = -29,304u ² + 15,609u - 0,6066	0,9677
5 a 10	0,2454	1,525	Ds = -20,44u ² + 10,032u + 0,2937	0,9492
10 a 15	0,2442	1,544	Ds = -24,18u ² + 11,809u + 0,1026	0,9999
15 a 20	0,2529	1,545	Ds = -33,567u ² + 16,979u - 0,602	0,9462
20 a 25	0,2583	1,516	Ds = -29,433u ² + 15,208u - 0,448	0,9734
25 a 30	0,2619	1,498	Ds = -26,517u ² + 13,892u - 0,3213	0,9623
Solo 4				
0 a 5	0,3073	1,393	Ds = -23,339u ² + 14,343u - 0,8104	0,9703
5 a 10	0,2930	1,453	Ds = -41,67u ² + 24,416u - 2,1332	0,9799
10 a 15	0,2919	1,466	Ds = -57,196u ² + 33,393u - 3,4083	0,9965
15 a 20	0,2942	1,464	Ds = -78,735u ² + 46,329u - 5,3513	0,9123
20 a 25	0,3021	1,446	Ds = -52,308u ² + 31,608u - 3,329	0,9578
25 a 30	0,3127	1,431	Ds = -42,486u ² + 26,573u - 2,7244	0,9895
Solo 5				
0 a 5	0,3847	1,298	Ds = -19,118u ² + 14,711u - 1,5318	0,8271
5 a 10	0,3752	1,313	Ds = -15,465u ² + 11,605u - 0,8639	0,9867
10 a 15	0,3743	1,309	Ds = -12,287u ² + 9,197u - 0,412	0,9384
15 a 20	0,3700	1,316	Ds = -22,12u ² + 16,367u - 1,7118	0,9414
20 a 25	0,3852	1,298	Ds = -29,413u ² + 22,66u - 3,0664	0,9587
25 a 30	0,3952	1,2698	Ds = -15,057u ² + 11,9u - 1,0814	0,9594

u = Umidade gravimétrica do solo (g.g⁻¹).

Comparando a densidade do solo e a máxima densidade do solo, dos cinco solos, podemos observar claramente uma redução da densidade com o aumento do teor de argila. Isso é confirmado com uma regressão linear múltipla entre a densidade do solo com a matéria orgânica e as diversas frações granulométricas.

A argila e a matéria orgânica foram estatisticamente significativas, com r^2 de 0,8893, para a densidade do solo (Equação 19).

$$Ds = 1,81212955 - 0,03381171 MO - 0,738903 Argila \quad (19)$$

Onde:

Ds: densidade do solo, g.cm^{-3} ;

MO: matéria orgânica, % a base de massa;

Argila, g.g^{-1} .

Para a densidade máxima do solo (DMs), foram estatisticamente significativos com r^2 de 0,915 para matéria orgânica e argila respectivamente (Equação 20).

$$DMs = 1,96454775 - 0,02611812 MO - 0,693436 Argila \quad (20)$$

Onde:

Ds: densidade do solo, g.cm^{-3} ;

MO: matéria orgânica, % a base de massa;

Argila, g.g^{-1} .

Essas relações negativas da densidade e densidade máxima no solo com argila e matéria orgânica com a estão de acordo com que afirmaram Reichardt & Timm (2004), Bueno & Vilar (1998), Figueiredo et al. (1998), Peche Filho (1999), Dias Junior & Miranda (2000), Braida (2004) e Libardi (2005).

Analisando apenas a argila como variável independente (Figura 4), podemos verificar que, ambas as densidades mantêm uma inclinação da reta semelhante.

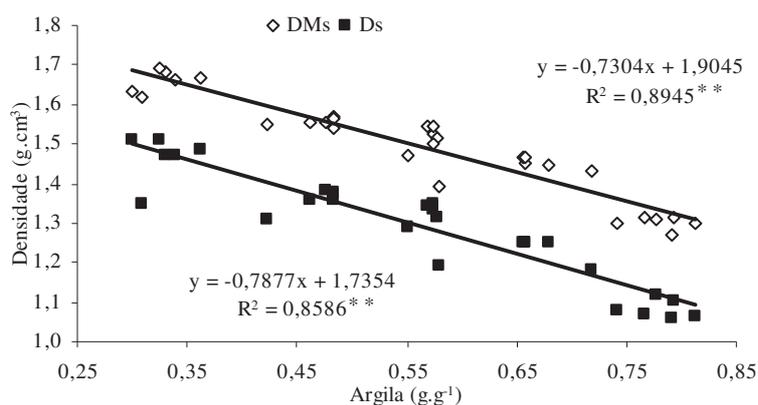


Figura 4 – Densidade (Ds) e densidade máxima (DMs) do solo em função do teor de argila, ** significativo a 0,01 pelo teste F.

Na Tabela 3 são apresentados os valores médios da densidade relativa para cada solo, valores esses expressos detalhadamente no perfil de cada solo na figura 5. A variação da densidade relativa no perfil

refletindo a variação ocorrida com a densidade e densidade máxima do solo.

Tabela 3 – Densidade relativa média do perfil de cada solo estudado

Solo	Densidade Relativa
1	0,884
2	0,874
3	0,877
4	0,853
5	0,832

Considerando os valores de densidade relativa estabelecidos por Carter (1990), em que a densidade relativa ótima para cereais varia de 0,77 a 0,84, apenas o solo 5 apresenta valores dentro desta faixa. Para os demais solos, o solo 4 está pouco acima desta faixa e os solos 1, 2 e 3 poderiam apresentar alguma restrição ao desenvolvimento de cereais nas camadas de 10 a 15, 5 a 10 e 25 a 30 cm, respectivamente.

Já Hakansson (1990) considera a densidade relativa de 0,87 para o máximo rendimento de cevada, valor esse coincidente com os solos 2 e 3. Para o solo 1, a densidade relativa está pouco acima deste valor e os solos 4 e 5 estão com uma densidade relativa inferior a considerada ideal conforme o autor.

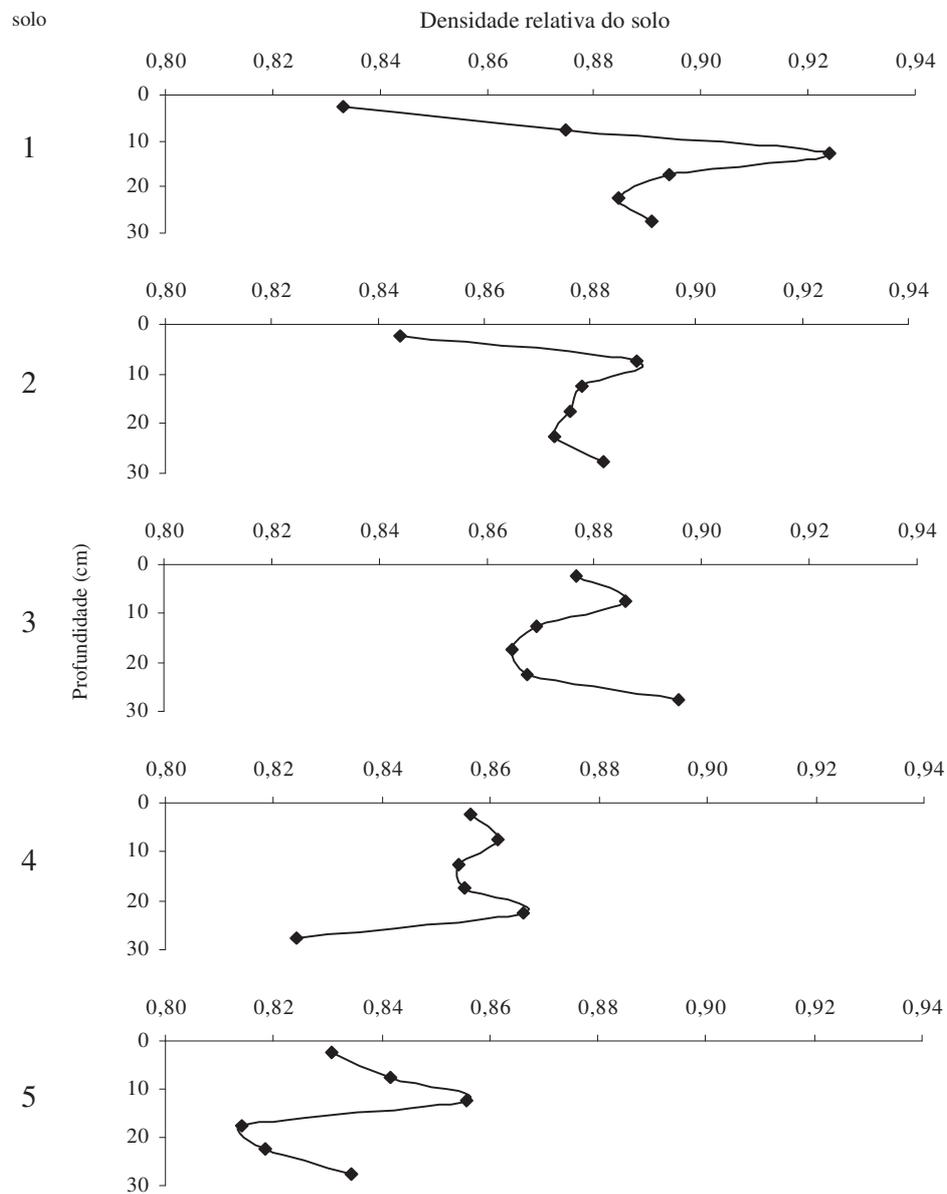


Figura 5 – Variação da densidade relativa no solo em profundidade de cada solo.

Para Lipiec et al. (1991) restrições ao rendimento ocorrem com valores superiores a 0,91, o qual ocorre apenas no solo 1 na camada de 10 a 15 cm. Essa restrição na camada poderá dificultar o aprofundamento do sistema radicular das culturas neste solo.

Para soja, Beutler et al. (2005) considera, em laboratório, que a densidade relativa ideal é de 0,84 e 0,75 respectivamente para os solos com 0,57 e 0,27 g.g⁻¹ de argila e em nível de campo o valor de 0,80 em solo de 0,57 g.g⁻¹ de argila. Valores esses bem abaixo dos obtidos nos solos estudados, apenas o solo 5 apresenta um valor próximo de 0,84.

Com base na densidade relativa a partir do intervalo hídrico ótimo (IHO), Klein (2002) observou que a máxima disponibilidade de água ocorria na densidade relativa de 0,715 e a densidade relativa restritiva de 0,88, no qual o IHO é a zero. Nesses solos, a menor densidade relativa observada foi de 0,832 para o solo 5, enquanto os solos 1, 2 e 3 apresentam uma densidade relativa próxima da restritiva.

Como a densidade relativa influencia diretamente a macroporosidade (CARTER, 1990; FERRERAS et al., 2001) um valor ótimo ou restritivo dependerá do regime hídrico de cada local, sem excesso ou deficiência hídrica. Portanto, respeitar o limite superior e o limite inferior do intervalo hídrico ótimo para cada solo.

4.3 Porosidade total

A porosidade total do solo (PT) apresentou relação significativa para densidade relativa, matéria orgânica e argila, com r^2 de 0,9539, conforme a Equação (21). Para a determinação da porosidade total é utilizada a densidade do solo, dessa forma, foram estatisticamente significativos os fatores que contribuem diretamente com essa propriedade do solo.

$$PT = 0,99739442 + 0,00757720MO + 0,208436Argila - 0,72441954DR \quad (21)$$

Onde:

PT: porosidade total, $m^3.m^{-3}$;

DR: densidade relativa do solo;

MO: matéria orgânica, % a base de massa;

Argila, $g.g^{-1}$.

A relação positiva da porosidade total do solo com o teor de argila está de acordo com o que afirmam Reichardt & Timm (2004) e Libardi (2005), pela agregação proporcionada pela argila no solo. Da mesma forma, a correlação positiva da matéria orgânica está de acordo com que afirmaram Bayer & Mielniczuk (1999), quando destacam que a matéria orgânica no solo afeta, principalmente, a estrutura do solo e com isto aumenta a porosidade total.

4.4 Água no solo

Na Tabela 4 estão apresentados os parâmetros de ajuste da curva característica de retenção de água no solo pela equação de Van Genuchten. Baseado nessa equação, foram determinados os valores do ponto de murcha permanente (1500 kPa) e da capacidade de campo (8 kPa), demonstrados na figura 6. Considerado como água indisponível o volume de água retida abaixo do ponto de murcha permanente e água disponível como o volume de água retida entre o ponto de murcha permanente e a capacidade de campo. A porosidade de aeração o volume de poros superior à capacidade de campo.

Sobrepondo esses valores estão os limites de liquidez e de plasticidade e a umidade ótima para compactação, valores esses transformados para umidade volumétrica.

Para a capacidade de campo, foi utilizada a tensão de 8 kPa, valor médio do proposto por Reichardt (1988), que sugeriu valores de 6 a 10 kPa. A umidade na capacidade de campo aumenta linearmente com o aumento do teor de argila e argila mais silte no solo, conforme Figuras 7 e 8. A análise da argila e do silte em conjunto deve-se a essas serem partículas finas (KIEHL, 1979), metodologia esta utilizada por Arruda et al. (1987).

Tabela 4 – Parâmetros de ajuste dos pontos experimentais da curva de retenção de água no solo à equação de Van Genuchten

Profundidade	α (1/kPa)	m	n	Θ_r (m ³ .m ⁻³)	Θ_s (m ³ .m ⁻³)
Solo 1					
0 a 5	0,0003	3,3881	0,3792	0,159	0,492
5 a 10	0,0003	3,3291	0,3802	0,175	0,445
10 a 15	0,0004	3,3071	0,3779	0,180	0,430
15 a 20	0,0001	4,9213	0,4299	0,180	0,429
20 a 25	0,0003	3,3789	0,4306	0,175	0,445
25 a 30	0,0001	7,1477	0,4992	0,177	0,440
Solo 2					
0 a 5	0,0003	3,6055	0,3577	0,196	0,507
5 a 10	0,0003	4,1636	0,3891	0,203	0,479
10 a 15	0,0004	4,6616	0,4192	0,203	0,480
15 a 20	0,0003	4,1334	0,3412	0,202	0,482
20 a 25	0,0003	4,2400	0,3801	0,200	0,488
25 a 30	0,0003	4,1038	0,3996	0,200	0,487
Solo 3					
0 a 5	0,0003	3,2555	0,3971	0,193	0,513
5 a 10	0,0003	3,4414	0,3497	0,232	0,490
10 a 15	0,0003	3,4822	0,3841	0,231	0,493
15 a 20	0,0002	4,9846	0,3899	0,230	0,496
20 a 25	0,0003	5,0480	0,4001	0,226	0,503
25 a 30	0,0003	3,3116	0,5164	0,231	0,494
Solo 4					
0 a 5	0,0002	3,3606	0,2903	0,242	0,550
5 a 10	0,0002	3,557	0,2995	0,258	0,528
10 a 15	0,0002	3,4294	0,3054	0,260	0,524
15 a 20	0,0002	3,6164	0,3229	0,257	0,529
20 a 25	0,0003	3,6649	0,2923	0,249	0,544
25 a 30	0,0003	3,5326	0,3078	0,243	0,555
Solo 5					
0 a 5	0,0001	6,3454	0,3032	0,266	0,593
5 a 10	0,0001	5,5761	0,2839	0,287	0,583
10 a 15	0,7529	0,0974	3,0606	0,291	0,577
15 a 20	0,5023	0,0409	8,2236	0,278	0,596
20 a 25	0,5886	0,0324	10,3054	0,276	0,599
25 a 30	0,7515	0,0394	8,1996	0,275	0,600

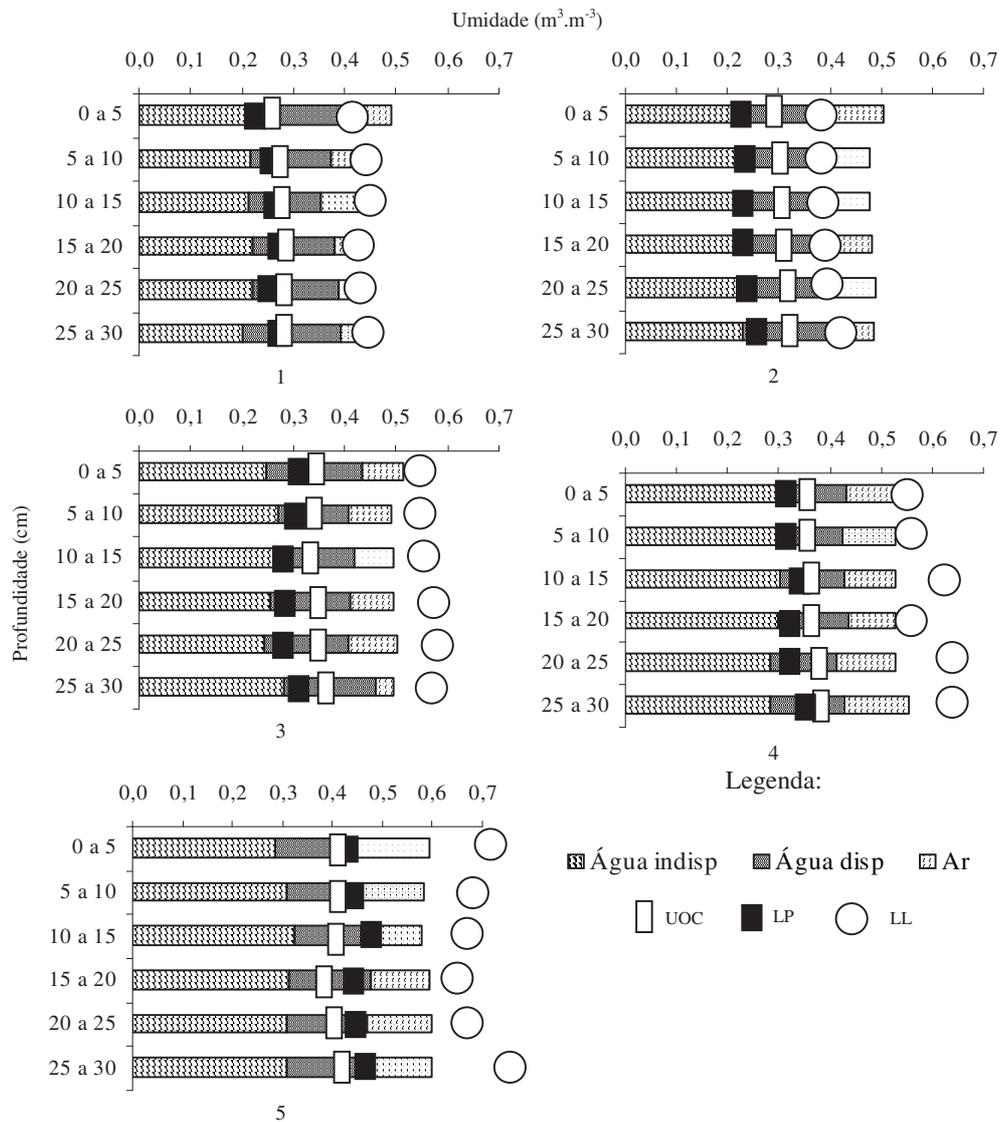


Figura 6 – Água indisponível, água disponível, porosidade de aeração, umidade ótima para compactação (UOC), limite plástico (LP) e limite líquido (LL) conforme a profundidade (cm) de cada solo.

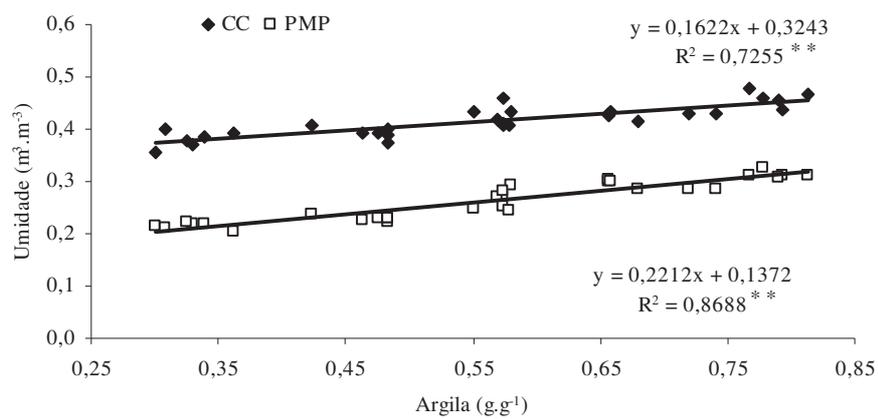


Figura 7 – Variação da capacidade de campo (CC) e do ponto de murcha permanente (PMP) conforme o conteúdo de argila, ** significativo a 0,01 pelo teste F.

A contribuição da argila na retenção de água na capacidade de campo concorda com Hall et al. (1977), Kiehl (1979), Arruda et al. (1987) Mesquita & Moraes (2004) e Herrera et al. (2005), variado apenas o modelo em relação a esses autores.

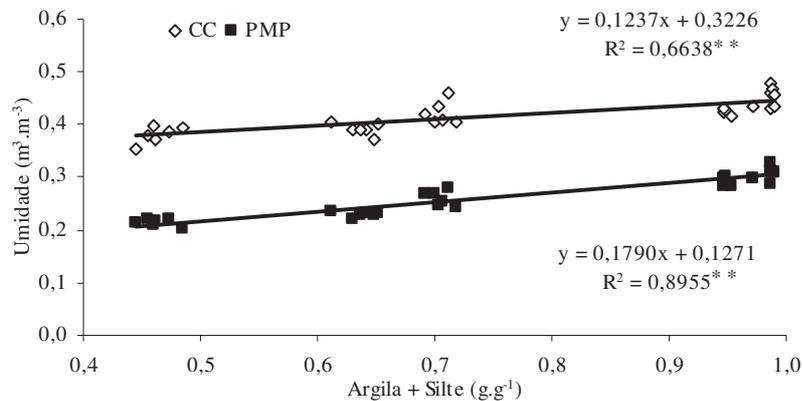


Figura 8 – Variação da capacidade de campo (CC) e do ponto de murcha permanente (PMP) conforme o conteúdo de argila mais silte, ** significativo a 0,01 pelo teste F.

Hall et al. (1977) apresenta um modelo de regressão linear múltiplo (Equações 7 e 8), com contribuição da argila e do silte não somados, matéria orgânica e da densidade do solo. Arruda et al. (1987) apresenta um modelo quadrático (Equação 5), utilizando como variável independente a argila e o silte somados. Para este trabalho, as propriedades como matéria orgânica, densidade e densidade relativa do solo não tiveram variação significativa, diferindo do que foi afirmado por esses autores. Dessa forma, os solos estudados apresentam comportamento distinto dos solos de outras regiões.

A matéria orgânica é mais importante na retenção de água para solos arenosos do que para solos argilosos (RAWLS et al., 2003). Como os solos estudados foram predominantemente argilosos, com

menor importância da matéria orgânica na retenção de água, essa pode não ter influenciado significativamente essa propriedade do solo.

A densidade do solo possui variação negativa com o aumento do teor de argila no solo. Com isso, na análise de regressão da umidade na capacidade de campo, a influência da textura do solo ocorre em ambos os atributos, não evidenciando uma influência da densidade sobre a umidade na capacidade de campo.

O ponto de murcha permanente, da mesma forma que a capacidade de campo, apresentou variação linear significativa para argila e argila mais silte, conforme as Figuras 7 e 8.

A não contribuição da matéria orgânica e da densidade do solo na umidade do ponto de murcha permanente concorda com Hall et al. (1977) e Rawls et al. (2003). Isso se deve pelo fato da matéria orgânica influenciar menos essa umidade do que a capacidade de campo (RAWLS et al., 2003). A estrutura do solo é desconsiderada para o cálculo da umidade no ponto de murcha permanente utilizando-se o psicrômetro.

Hall et al. (1977) observou uma tendência de curva polinomial de segundo grau da argila na umidade do ponto de murcha permanente. Dessa forma, a tendência linear observada nesses solos difere, mesmo utilizando a soma da argila com o silte, o que indica, da mesma forma, que a capacidade de campo em solos sob plantio direto apresentam dinâmica distinta.

Avaliando-se o volume de água disponível, umidade entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente, obteve uma variação linear estatisticamente significativa para argila, silte e densidade do solo, conforme a Equação (22), com coeficiente de determinação de 0,5418. Na análise com a soma da argila mais silte, esses foram significativos, juntamente com a densidade do solo, conforme Equação (23), com coeficiente de determinação de 0,5368.

$$AD = 0,44984121 - 0,137454 \text{Argila} - 0,170193 \text{Silte} - 0,14426420 Ds \quad (22)$$

$$AD = 0,46851901 - 0,151861 AS - 0,15512598 Ds \quad (23)$$

Onde:

AD: água disponível, $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$;

Ds: densidade do solo, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$;

Argila, $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$;

Silte, $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$;

AS: argila mais silte, $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$.

Analisando apenas os componentes da textura do solo, obtendo-se uma regressão linear tendo como variável independente a soma da argila e do silte, conforme Figura 9.

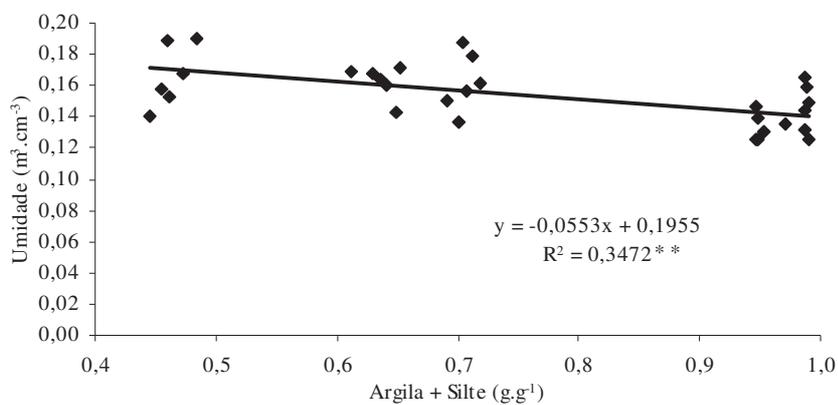


Figura 9 – Água disponível conforme o conteúdo de argila mais silte, ** significativo a 0,01 pelo teste F.

4.5 Umidade ótima para compactação

A umidade ótima para compactação do solo (Figura 10), apresentou uma tendência linear positiva com o aumento do teor de argila no solo, similar a Bueno & Vilar (1998) e Dias Junior & Miranda (2000). Figueiredo et al. (1998) e Braida (2004) afirmam ainda que essa umidade é influenciada pelo teor de matéria orgânica no solo, sendo que nesses solos essa contribuição não foi estatisticamente significativa.

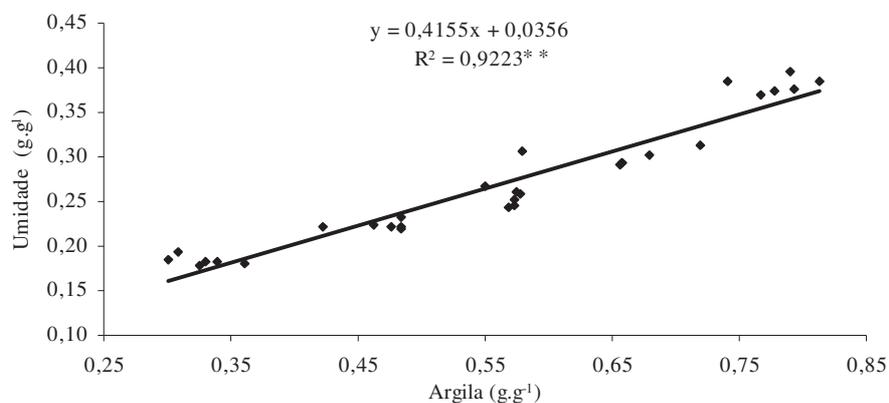


Figura 10 – Umidade ótima para compactação do solo conforme teor de argila, ** significativo a 0,01 pelo teste F.

4.6 Limites de consistência

Para os limites de consistência do solo, liquidez e plasticidade, foram observadas uma variação não linear positiva da umidade com o aumento do teor de argila no solo, sendo o modelo polinomial de segundo grau, conforme Figura (11). O aumento dos limites líquidos e plásticos com o aumento do teor de argila concorda com que afirmaram Buckman & Brady (1979), mas cabe salientar que esses autores não esclarecem se este aumento ocorre de forma linear ou através de outro modelo, como nesses solos ocorreu de forma polinomial de segundo grau.

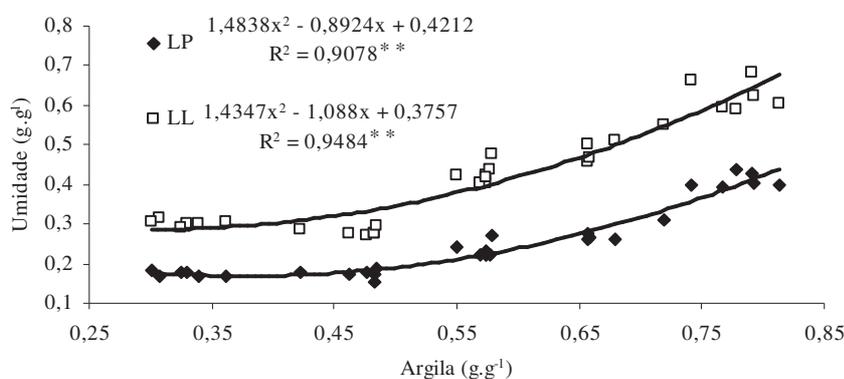


Figura 11 – Umidade nos limites de liquidez (LL) e de plasticidade (LP), conforme o conteúdo de argila, ** significativo a 0,01 pelo teste F.

Pode-se constatar também uma variação do índice de plasticidade com o aumento do teor de argila, que é o intervalo de umidade entre o limite líquido e plástico, como pode ser observado na Figura (12). Essa variação em relação ao teor de argila resulta do fato da areia não possuir viscosidade e nem capacidade de ser moldada (BUCKMAN & BRADY, 1979; KLAR, 1988).

Buckman & Brady (1979) apresentam uma equação de relação linear entre o índice de plasticidade e o teor de argila no solo, (Equação 4). Esta equação difere dessa obtida na Figura 12, com isso, cada trabalho pode ser utilizado somente para os solos estudados, não podendo ser extrapolada para outros solos. Neste sentido, requer estudos desta propriedade para outros tipos de solos para poder melhor observar este comportamento.

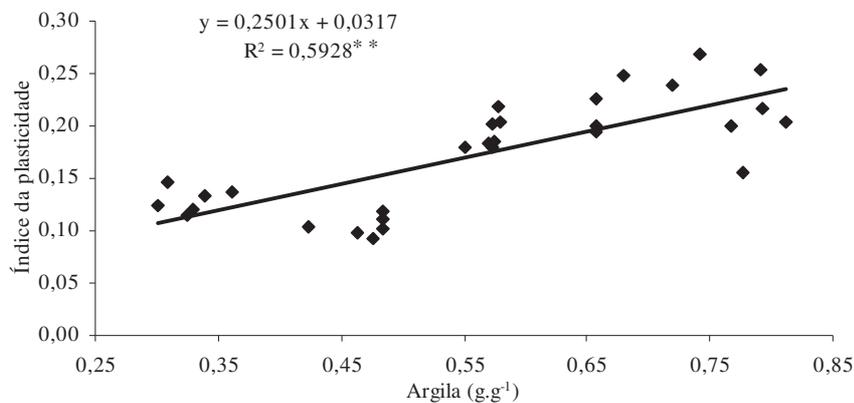


Figura 12 – Índice de plasticidade do solo, conforme o conteúdo de argila no solo, ** significativo a 0,01 pelo teste F.

4.7 Relação umidade ótima para compactação e limite de plasticidade

Figueiredo et al. (1998) apresentam o valor de relação entre umidade ótima para compactação e o limite de plasticidade de 0,90. O estudo dessa relação tem por objetivo facilitar, em nível de campo a identificação da umidade ótima para compactação, evitando com isso o tráfego de máquinas, diminuindo a compactação do solo.

Nos solos estudados, pode-se constatar que, para essa relação, ocorre uma influência do teor de argila no solo. Como podemos observar na Figura (13), essa relação apresenta uma curva no modelo de polinomial de segundo grau, com o valor máximo encontrando-se no teor de argila de 0,506 g.g⁻¹, valor este de 1,194. Com isso o valor de 0,90

proposto por Figueiredo et al. (1998) não pode ser utilizado como referência para todos os solos, mas sim relacionado com o teor de argila.

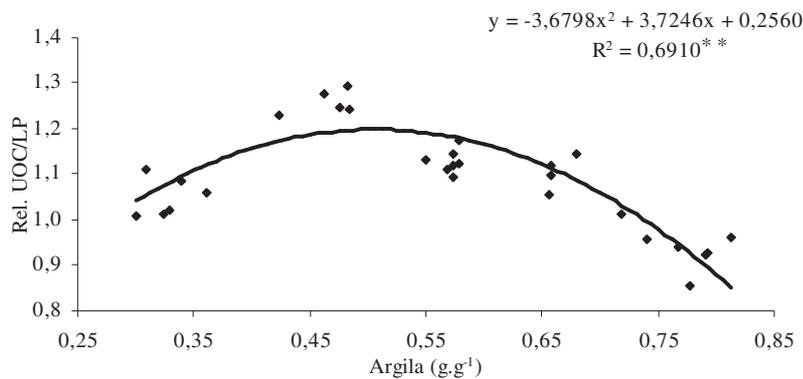


Figura 13 – Relação umidade ótima para compactação e limite de plasticidade (Rel. UOV/LP) conforme o teor de argila no solo, ** significativo a 0,01 pelo teste F.

A umidade do solo aonde se encontra as melhores condições para o preparo é quando está na consistência friável (BAVER et al., 1973). Portanto, quando a umidade do solo ótima para compactação for inferior a umidade do limite de plasticidade, essa umidade encontra-se na faixa de umidade friável, com isso poderá causar maiores compactações no solo. Solos que apresentam a umidade ótima para compactação superior à umidade do limite de plasticidade, à compactação máxima do solo ocorre fora da faixa de umidade do solo considerada ideal para o preparo do solo. Esses solos, teoricamente, apresentariam menores problemas físicos decorrentes da compactação, ao menos que as

operações agrícolas estejam sendo realizadas fora da faixa de umidade considerada ideal ao preparo. Contudo, não se pode evidenciar essa relação nos solos estudados comparando a relação umidade ótima para compactação e limite de plasticidade com a densidade relativa do solo.

O comportamento curvilíneo da relação umidade ótima para compactação e o limite de plasticidade com o teor de argila ocorre devido ao comportamento distinto dessas duas propriedades do solo em relação ao teor de argila. A umidade ótima para compactação tem uma variação linear em relação ao teor de argila, enquanto que o limite de plasticidade possui uma variação quadrática com o teor de argila, ambas as propriedades possuem variação positiva com o teor de argila. Para melhor visualizar esse comportamento diferenciado das duas propriedades do solo, estas podem ser vistas na figura 14.

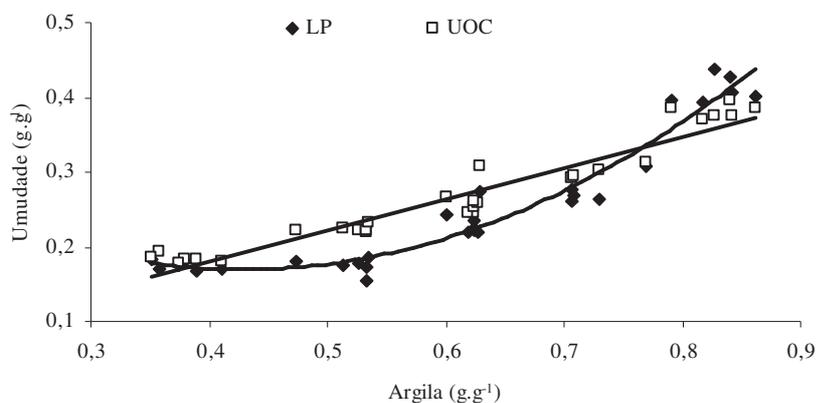


Figura 14 – Umidade do solo para a máxima compactação (UOC) e no limite de plasticidade (LP), conforme o teor de argila.

4.8 Resistência mecânica do solo à penetração

Na Figura 15 estão os valores da resistência do solo à penetração em profundidade para os diferentes solos. Podemos observar a tensão de água no solo onde a resistência se torna limitante ao crescimento do sistema radicular das plantas.

Considerando o valor crítico de resistência 2 MPa, conforme Taylor & Gardner (1963), Taylor et al. (1966), Tormena et al. (1998), Tormena et al. (1999) e Klein (2002), nos solos 2, 3, 4 e 5 esse valor é atingido com a tensão de 50 kPa e no solo 1 na tensão de 100 kPa. Quando é utilizado o valor crítico de referência da soja de 3 MPa (BEUTLER & CENTURION, 2004b; CAMARA, 2004), os solos 1, 2 e 3 atingem esse valor com tensão de 500 kPa e o no solo 4 atinge com 50 kPa na profundidade de 20 a 25 cm e o solo 3 com 100 kPa.

A variação da resistência à penetração no perfil do solo acompanha a variação da densidade do solo, pelo fato de que a resistência a penetração é dependente da densidade e da umidade do solo (BUSSCHER, 1990). Ao momento que é fixado a tensão de água no solo, como ocorre na Figura 15, a única variável independente é a densidade do solo.

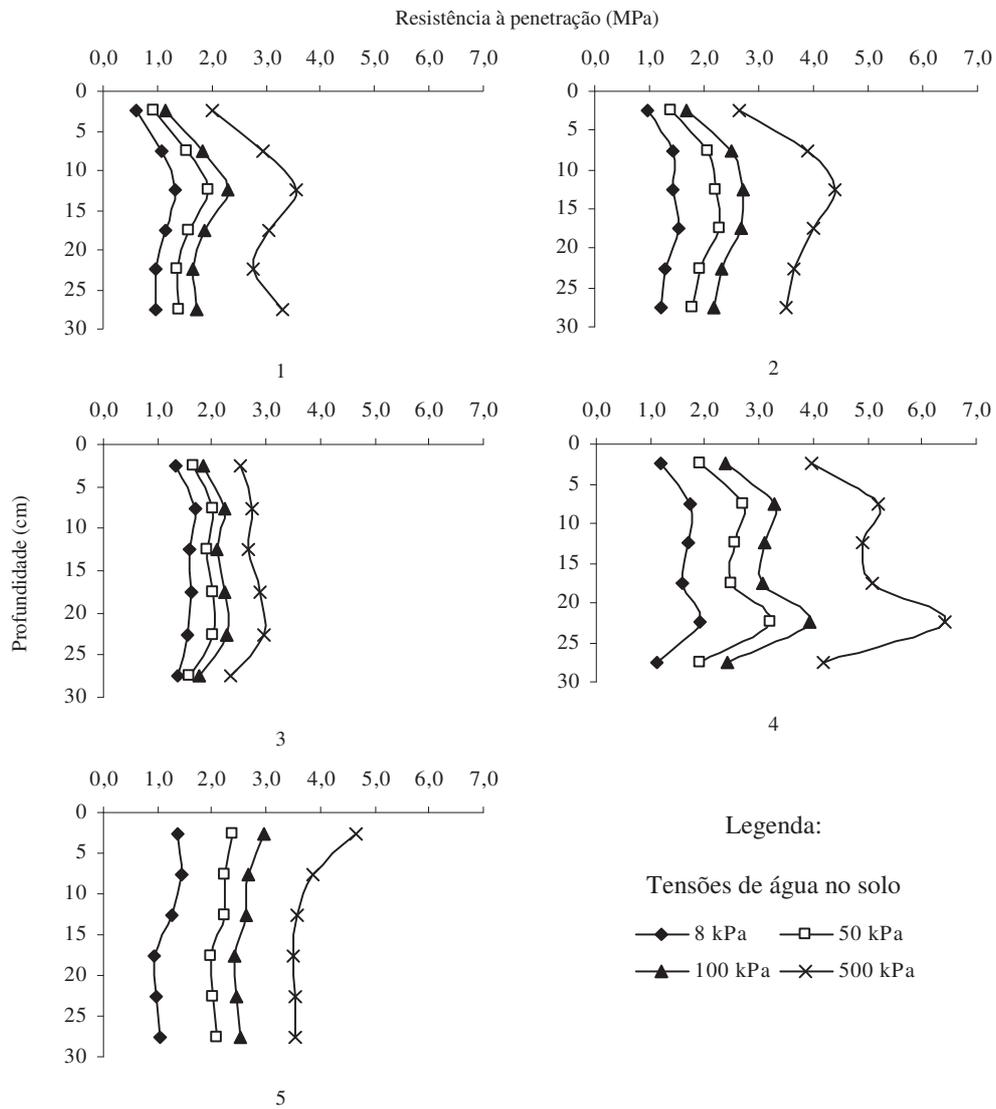


Figura 15 – Resistência mecânica do solo à penetração em diferentes tensões de umidade e profundidade de cada solo.

Analisando de modo geral o comportamento da resistência à penetração no perfil do solo, destaca-se o solo 4 como o solo em que apresenta maior resistência, podendo atingir o valor crítico para o milho, conforme Foloni et al. (2003), de 1,4 MPa na umidade da capacidade de campo, de 8 kPa. Além disso, esse solo apresenta uma resistência superior a 6 MPa na umidade de 500 kPa. O solo 1, que apresentou a menor resistência à penetração, apenas na profundidade de 20 a 25 cm na umidade de 500 kPa ultrapassou o valor de 3 MPa.

Realizou-se uma regressão múltipla da resistência à penetração com a textura, densidade do solo e matéria orgânica. Para essa regressão, a densidade do solo não foi estatisticamente significativa, como encontraram Ribon & Tavares Filho (2004), pelo fato que essa propriedade juntamente com a umidade não apresentam um comportamento linear, conforme Busscher (1990) e também influenciada pela textura.

Nesses solos foi estatisticamente significativa a contribuição do silte e da matéria orgânica na resistência a penetração, sendo essas com alta significância e com um coeficiente de determinação de 0,6312, respectivamente, sendo essa relação positiva para o silte e negativa para a matéria orgânica do solo, conforme Equação (24).

$$RP = 1,57001421 - 0,24530597 MO + 4,88617807 S \quad (24)$$

Onde:

RP: resistência à penetração, MPa;

MO: matéria orgânica, g.g⁻¹;

S: silte, g.g⁻¹.

Quando é utilizados a soma da argila com o silte, juntamente com a densidade do solo e a matéria orgânica, Equação (25). Mantendo-se a mesma tendência negativa para a matéria orgânica e positiva para a textura. A influência positiva da densidade do solo concorda com os autores Beltrame et al. (1981) e Ribon & Tavares Filho (2004), de certa forma, também concorda com Busscher (1990), pois este autor afirma que a contribuição da densidade é positiva, mas não linear.

$$RP = - 5,95497893 - 0,08486872 MO + 3,58054296 AS + 4,0714897 Ds \quad (25)$$

Onde:

RP: resistência à penetração, MPa;

MO: matéria orgânica, g.g⁻¹;

AS: argila mais silte, g.g⁻¹;

Ds: densidade do solo, g.cm⁻³.

Em relação à matéria orgânica, ao contrário de Ribon & Tavares Filho (2004), neste trabalho foi observada uma relação negativa dessa com a resistência à penetração, indicando um efeito benéfico da

matéria orgânica no solo. Além de uma relação positiva da matéria orgânica com a resistência à penetração, também observaram uma relação positiva dessa com a densidade do solo. Como neste estudo, foi encontrada relação negativa da matéria orgânica com a densidade do solo. Essa relação deve ter sido a causa da matéria orgânica influenciar negativamente com a resistência à penetração, pois, segundo Busscher (1990), a densidade é uma propriedade que tem influencia na resistência à penetração.

4.9 Intervalo hídrico ótimo (IHO)

Nas Figuras 16, 17, 18, 19 e 20 estão demonstrados os intervalos hídricos dos solos 1, 2, 3, 4 e 5 respectivamente. Para cada solo apresenta-se uma relação da densidade do solo com a umidade correspondente nas tensões de capacidade de campo, ponto de murcha permanente, porosidade de aeração de $0,10 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ e resistência mecânica à penetração de 2 e 3 MPa.

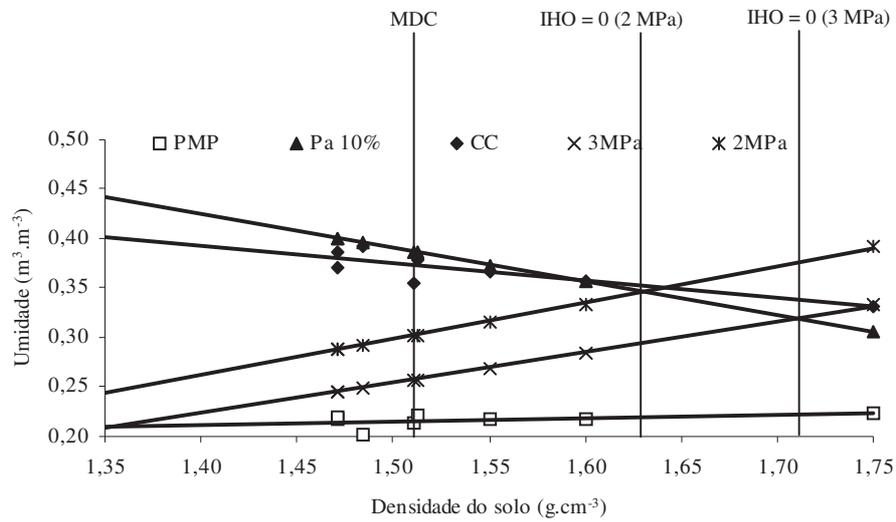


Figura 16 – Umidade na capacidade de campo (CC), porosidade de aeração de $0,10 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ (Pa 10%), umidade no ponto de murcha permanente (PMP), resistência à penetração (3 MPa e 2 MPa), máxima densidade de solo no campo (MDC) e IHO igual a zero nas resistências à penetração de 2 e 3 MPa, do solo 1.

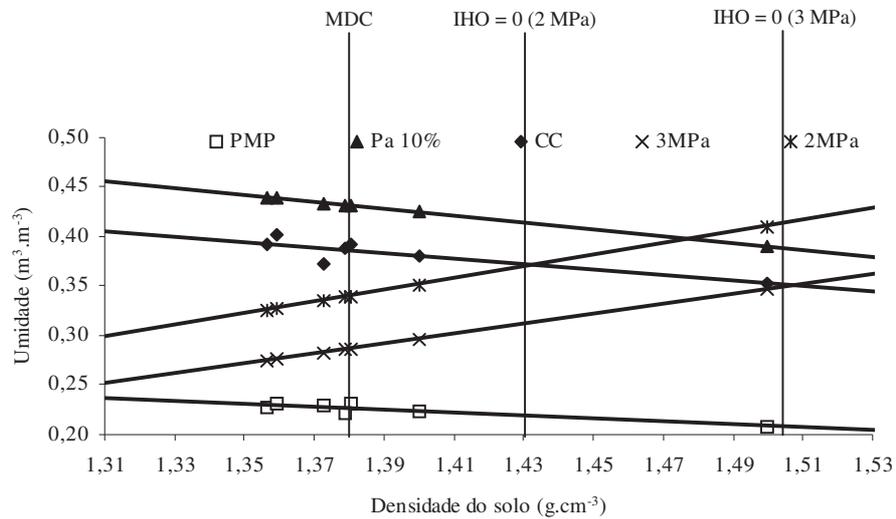


Figura 17 – Umidade na capacidade de campo (CC), porosidade de aeração de $0,10 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ (Pa 10%), umidade no ponto de murcha permanente (PMP), resistência à penetração (3 MPa e 2 MPa), máxima densidade de solo no campo (MDC) e IHO igual a zero nas resistências à penetração de 2 e 3 MPa, do solo 2.

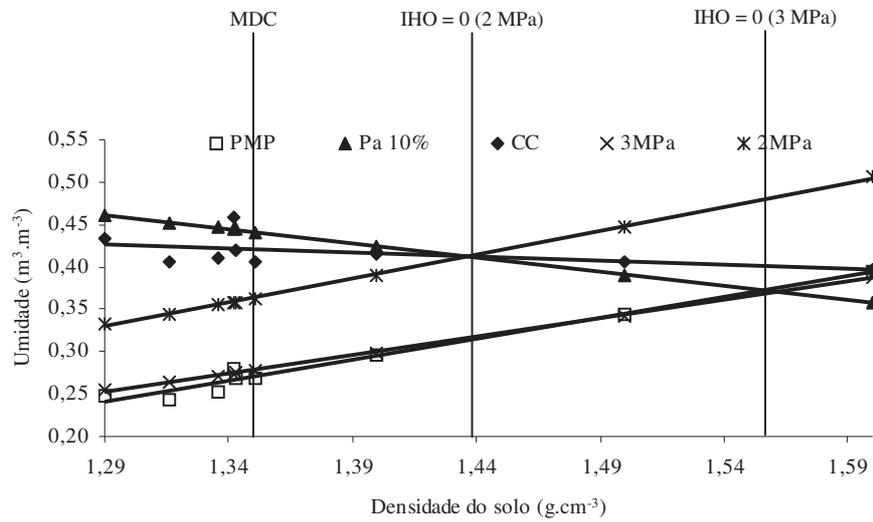


Figura 18 – Umidade na capacidade de campo (CC), porosidade de aeração de $0,10 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ (Pa 10%), umidade no ponto de murcha permanente (PMP), resistência à penetração (3 MPa e 2 MPa), máxima densidade de solo no campo (MDC) e IHO igual a zero nas resistências à penetração de 2 e 3 MPa, do solo 3.

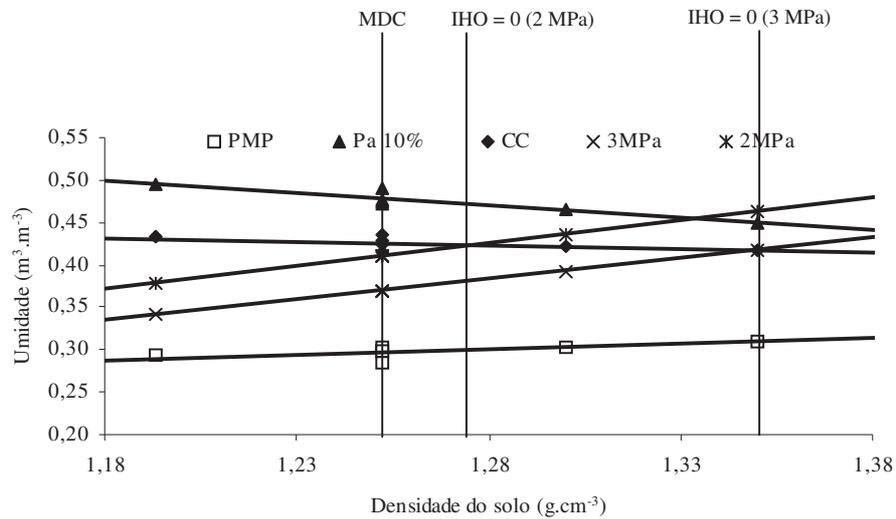


Figura 19 – Umidade na capacidade de campo (CC), porosidade de aeração de $0,10 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ (Pa 10%), umidade no ponto de murcha permanente (PMP), resistência à penetração (3 MPa e 2 MPa), máxima densidade de solo no campo (MDC) e IHO igual a zero nas resistências à penetração de 2 e 3 MPa, do solo 4.

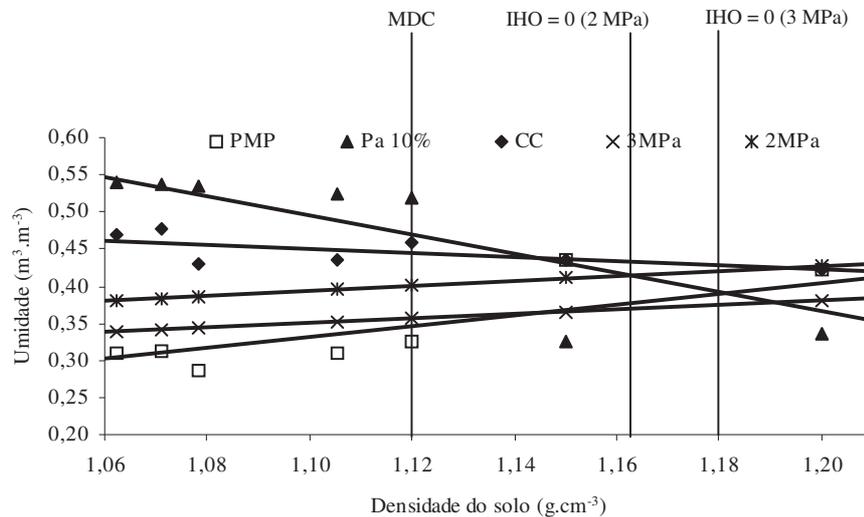


Figura 20 – Umidade na capacidade de campo (CC), porosidade de aeração de $0,10 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ (Pa 10%), umidade no ponto de murcha permanente (PMP), resistência à penetração (3 MPa e 2 MPa), máxima densidade de solo no campo (MDC) e IHO igual a zero nas resistências à penetração de 2 e 3 MPa, do solo 5.

Os valores da densidade do solo e relativa do máximo IHO, densidade máxima no campo e densidade crítica estão na tabela 5. Os valores da umidade na capacidade de campo e resistência à penetração de 2 e 3 MPa, considerando o máximo IHO e na máxima densidade do solo encontrada no campo estão na tabela 6, valores extraídos das figuras 16, 17, 18, 19 e 20.

Tabela 5 – Densidade máxima do solo (DMs), densidade do solo e densidade relativa do solo no máximo IHO (M. IHO), máxima densidade de campo (MDC), IHO igual a zero com resistência de 2 e 3 MPa

Solo	DMs	Densidade do solo				Densidade relativa do solo			
		M. IHO	MDC	2 MPa	3 MPa	M IHO	MDC	2 MPa	3 MPa
		g.cm ⁻³							
1	1,66	1,35	1,51	1,63	1,72	0,81	0,91	0,98	1,04
2	1,56	1,31	1,38	1,43	1,52	0,84	0,89	0,92	0,97
3	1,52	1,29	1,35	1,44	1,56	0,82	0,89	0,95	1,03
4	1,44	1,18	1,25	1,27	1,35	0,85	0,87	0,88	0,94
5	1,30	1,06	1,12	1,16	1,18	0,82	0,86	0,89	0,91

Tabela 6 – Umidade no Intervalo hídrico ótimo máximo e mínimo na capacidade de campo (CC) e resistência à penetração de 2 e 3 kPa, água disponível entre o limite superior e inferiores (2 e 3 MPa) do IHO

Solo	IHO máximo					IHO mínimo				
	Umidade		Água dispon.			Umidade		Água dispon.		
	CC	2 MPa	3 MPa	2 MPa	3 MPa	CC	2 MPa	3 MPa	2 MPa	3 MPa
	-----					-----				
	m ³ .m ⁻³									
1	0,40	0,25	0,21	0,15	0,19	0,38	0,30	0,26	0,07	0,12
2	0,41	0,30	0,25	0,12	0,15	0,39	0,34	0,29	0,05	0,10
3	0,43	0,33	0,25	0,10	0,17	0,41	0,36	0,28	0,06	0,14
4	0,43	0,37	0,34	0,06	0,10	0,43	0,41	0,37	0,02	0,06
5	0,46	0,38	0,34	0,09	0,12	0,46	0,40	0,36	0,04	0,09

Para o solo 1, Figura 16 e Tabelas 5 e 6, observa-se uma variação da densidade do solo de 1,35 a 1,51 g.cm⁻³ ou uma densidade relativa de 0,81 a 0,91, respectivamente. Esse é o solo que apresenta a maior variação de densidade no campo, comparado com os demais solos. A densidade relativa desse solo aonde o IHO é igual a zero é de 0,98 (para a resistência à penetração de 2 MPa) portanto, possui uma variação da densidade relativa de 0,07 entre a máxima densidade relativa em nível de campo para a densidade restritiva. Considerando a resistência à penetração de 3 MPa, o IHO é igual a zero na densidade relativa de 1,04, portanto superior à densidade máxima do solo no teste de Proctor, que é de 1,66 g.cm⁻³, é pouco provável de ser atingida no campo. Esse solo apresenta também o maior volume de água disponível para as plantas do que os demais solos.

O solo 4 (Figura 19), apresenta o menor volume de água disponível para as plantas (Tabela 6). Portanto, é o solo que apresenta maiores restrições ao crescimento de plantas, baseado no IHO. Esse solo, em condições climáticas adversas, poderá apresentar restrições ao cultivo, por apresentar uma pequena lâmina de água disponível. A densidade relativa do máximo IHO e a máxima densidade do campo (Tabela 5) apresentam uma pequena variação, de apenas 0,02 e a máxima densidade encontra-se próxima da densidade que o IHO é igual a zero, variando apenas 0,01, a menor variação entre os solos e o menor valor, 0,88, para a resistência à penetração de 2 MPa .

Para os solos 2, 3 e 5 (Figuras 17, 19 e 20 respectivamente), o IHO é intermediário comparando aos solos 1 e 4. A densidade relativa destes três solos em que o IHO é igual a zero (resistência a penetração de 2 MPa) também varia entre os solos extremos, mas não atingem valores elevados como o solo 1 que é próximo a um. Para a resistência à penetração 3 MPa, a densidade relativa em que IHO é igual a zero, é superior a um no solo 3, semelhante ao solo 1, e o solo 2 aproxima-se desse valor. O solo 5 apresenta a menor densidade relativa restritiva para a resistência à penetração de 3 MPa.

Comparando os valores de densidade relativa destes solos com os valores encontrados por Klein (2002), aonde o máximo IHO foi de 0,715, sendo que nenhum dos solos estudados apresentaram densidade relativa inferior a 0,81. Para densidade relativa aonde o IHO é igual a zero na resistência à penetração de 2 MPa, utilizada pelo autor, o valor apresentado foi de 0,88, semelhante ao valor encontrado no solo 4, sendo que para os demais solos este valor foram superiores. Carter (1990), Hakansson (1990) e Beutler et al. (2005) apresentam valores de densidade relativa inferior a 0,88 encontrado nos solos estudados, apenas Lipiec et al. (1991) apresentou valor mais elevado que é de 0,91, valor esse superior aos dos solos 4 e 5 e próximo do valor do solo 2. Os solos 3, e principalmente, o solo 1, apresentam densidade relativa restritiva superior aos valores descritos pelos autores citados anteriormente, no caso do solo 1 este está próximo da densidade máxima do solo do teste de Proctor, indicando uma maior tolerância à compactação.

Na Figura 21, está apresentada a variação do intervalo hídrico ótimo para cada solo em profundidade. Nessa figura, pode-se observar as camadas onde se apresentam as maiores limitações. Em relação aos limites do intervalo hídrico ótimo, destaca-se como sendo o limite superior a umidade na capacidade de campo para todos os solos. Como limite inferior à resistência mecânica do solo a penetração, tanto a 2 como a 3 MPa. Todos os solos apresentam IHO positivo no perfil do solo, com destaque apenas para o solo 4 que este se aproxima de zero na camada de solo de 20 a 25 cm.

Quando se utiliza o IHO como indicador de qualidade física do solo, observa-se que o solo 4 apresenta restrições ao desenvolvimento de plantas pelo baixo volume de água disponível e o solo 1 como o solo que apresenta o maior volume de água disponível para as plantas e, portanto, as melhores condições físicas que os demais solos. Um comportamento divergente para a densidade relativa média e em profundidade dos solos estudados, como foi discutido anteriormente. Para a densidade relativa, o solo 1 apresentou o maior valor médio no perfil e na camada de 15 a 20 cm foi de 0,924, considerada limitante ao crescimento das plantas quando comparada com os valores de literatura, como foi discutido anteriormente. O solo 4 apresentou a segunda menor densidade relativa, sendo inferior apenas o solo 5. Dessa forma, o solo 4 apresentaria menores restrições ao crescimento do sistema radicular das plantas que o solo 1.

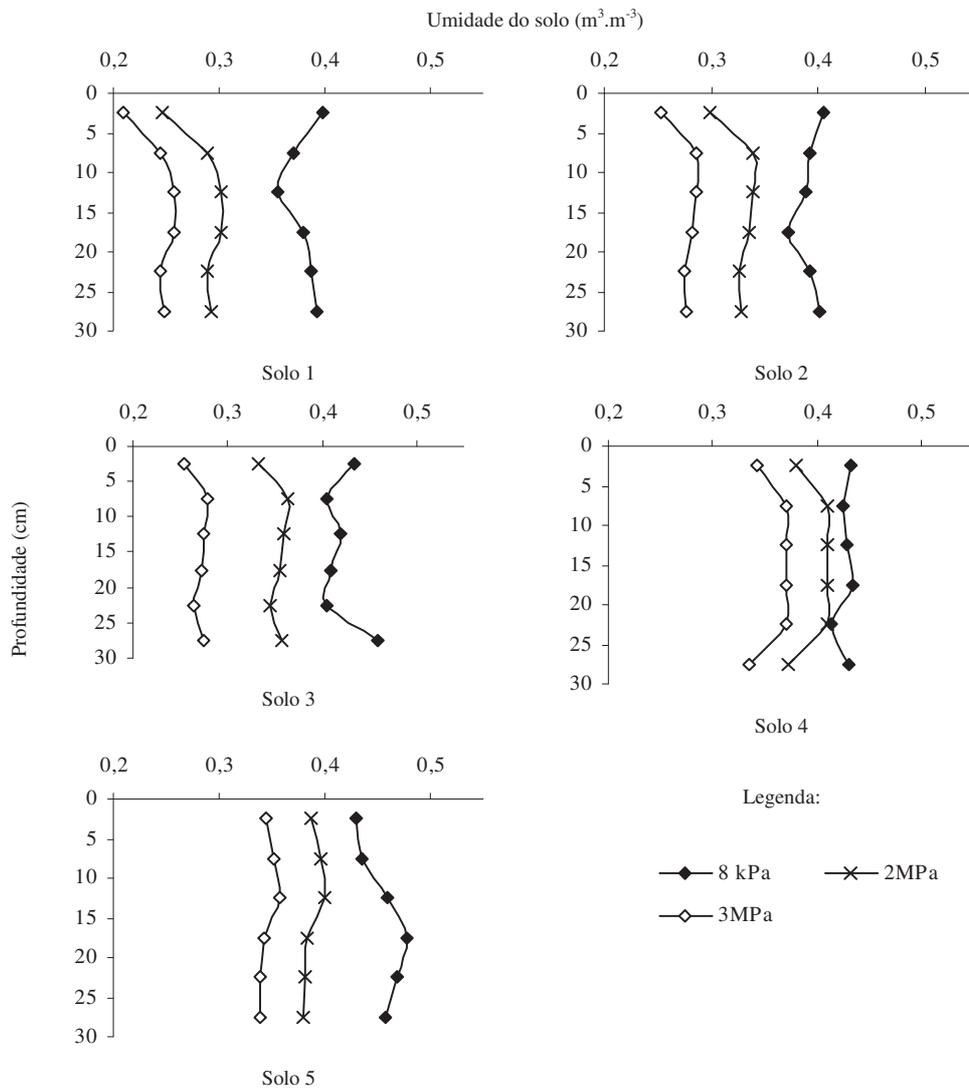


Figura 21 – Umidade do solo na capacidade de campo (8 kPa) e nas resistências à penetração de 2 e 3 MPa, conforme a profundidade de cada solo, como limite superior e inferior do IHO, respectivamente.

Na Figura 22, apresenta a variação da densidade do solo para o máximo IHO e as densidades em que IHO igual a zero, conforme a variação do teor de argila no solo. Nesta figura podemos constatar uma redução da densidade para as três densidades, devido à influência da textura na densidade do solo, conforme discutido anteriormente. Nota-se que, com o aumento do teor de argila, ocorre uma aproximação dos valores da densidade entre a densidade de máximo IHO e a densidade do IHO igual a zero, com isso diminui a faixa de densidade onde não ocorre restrição hídrica. Com isso, ocorre uma redução do volume de água disponível para as plantas (Figura 23).

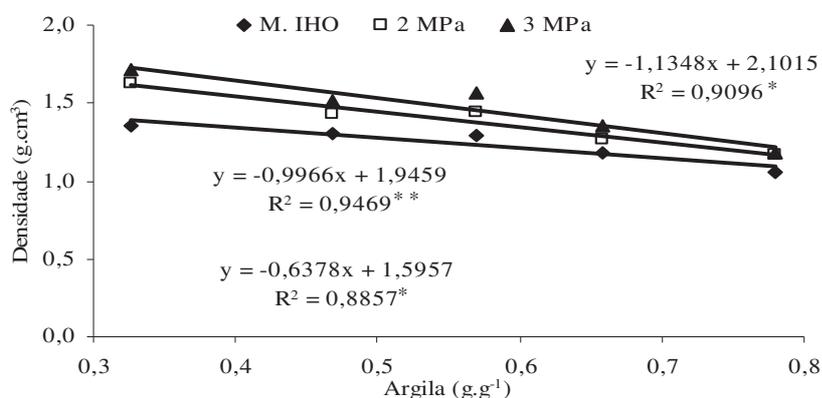


Figura 22 – Densidade do solo no máximo IHO (M. IHO), IHO igual a zero nas resistências a penetração de 2 e 3 MPa, conforme o teor de argila, * e ** significativos a 0,05 e 0,01, respectivamente, pelo teste F.

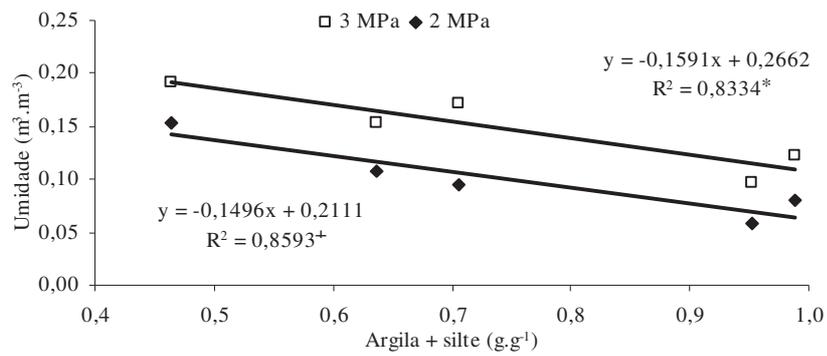


Figura 23 – Água disponível no solo no máximo IHO na resistência a penetração de 2 e 3 MPa, * e + significativo a 0,05 e 0,1 respectivamente, pelo teste F.

5 CONCLUSÕES

Em relação aos solos estudados, os resultados obtidos permitem concluir que independente da classe de solo, verificou-se que o teor de matéria orgânica em solos sob plantio direto concentra-se na superfície e apresenta relação positiva com o teor de argila. O teor de argila foi positivamente relacionado com a porosidade total e negativamente com a resistência do solo à penetração. A densidade do solo, a densidade máxima do solo, o volume de água disponível, o máximo IHO e a densidade crítica apresentam valores decrescentes com o teor de argila. A porosidade total, a umidade ótima para compactação do solo, a capacidade de campo, o ponto de murcha permanente, os limites de liquidez e de plasticidade são influenciados positivamente pelo teor de argila. A relação entre a umidade ótima para compactação e o limite de plasticidade se comporta de forma quadrática em relação ao teor de argila. A densidade relativa média foi de 0,86. O intervalo hídrico ótimo decresceu com o teor de argila mais silte.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANGHINONI, I.; MEURER, E. Suprimento de nutrientes pelo solo e sua absorção pelas plantas. In: BISSANI, C. A. *Fertilidade dos solos e manejo da adubação de culturas*. Porto Alegre: Gênese, 2004. 33-42 p.

ARAÚJO, M. A.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Propriedades físicas de um latossolo vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 28: p. 337-345, 2004.

ARRUDA, F. B.; ZULLO JUNIOR, J.; OLIVEIRA, J. B. de. Parâmetros de solo para o cálculo da água disponível com base na textura do solo. *Revista brasileira de ciência do solo*, Campinas, v. 11, p. 11 – 15, 1987.

ASSIS, R. L. de; LANÇAS, K. P. Avaliação dos atributos físicos de um nitossolo vermelho distroférrico sob sistema plantio direto, preparo convencional e mata nativa. *Revista Brasileira de Ciência de Solo*, Campinas, v. 29: p. 515-522, 2005.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O. (Eds.) *Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais*. Porto Alegre: Gênese, 1999. p. 9 – 26.

BAVER, L. D.; GARDNER, W. H.; GARDENER, W. R. *Física de suelos*. México: C.R.A.T./ A.I.D., 1973. 529p.

BELLIDO, L. L. Cultivos herbáceos: cereales. Madri: Multi-prensa, 1991. 539 p.

BELTRAME, L.F.S.; GONDIM, L.A.P.; TAYLOR, J.C. Estrutura e compactação na permeabilidade de solos do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 5, p.145-149, 1981.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Compactação e adubação na produtividade da soja. In: Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água, 15, 2004, Santa Maria. *Resumos expandidos*. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2004a. CD-ROM.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Matéria seca e altura de plantas de soja e arroz em função do grau de compactação e do teor de água de dois latossolos. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 24, n. 1, p.142-149, jan./abr. 2004b.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Resistência à penetração em latossolos: valor limitante à produtividade de arroz de sequeiro. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 34, n. 6, p. 1793-1800, nov-dez, 2004c.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; ROQUE, C. G.; FERRAZ, M. V. Densidade relativa ótima de Latossolos Vermelhos para a produção de soja. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 29, p. 843 – 849, 2005.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SILVA, A. P. da; ROQUE, C. G.; FERRAZ, M. V. Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo na produtividade de arroz de sequeiro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.39, n.6, p.575-580, jun. 2004.

BRAIDA, J. A. *Matéria orgânica e resíduos vegetais na superfície do solo e suas relações com o comportamento mecânico do solo sob plantio direto*. 2004. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) UFSM. Santa Maria, 2004.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. Divisão pedológica. *Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul*. Recife, 1973. 431 p. (DNPEA, Boletim técnico, 30).

BRUAND, A. e TESSIER, D. Water retention properties of the clay in soils developed on clayey sediments: significance of parent material and

soil history. *European Journal of Soil Science*, v. 51, p. 679 – 688, dez. 2000.

BUCKMAN, H. O.; BRADY, N. C. *Natureza e propriedade dos solos*. 5 ed. Trad. A. B. N. Figueiredo Filho. Rio de Janeiro: Biblioteca Universitária Freitas Bastos, 1979. 647p.

BUENO, B. S. ; VILAR, O. M. *Mecânica dos solos*. São Carlos: USP, EESC, 1998, v. 1, 131p.

BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. *Transactions of ASAE*, v. 33, p. 519-24, 1990. Decagon Devices, 2000.

CAMARA, R. K. *Influência da escarificação do solo sob sistema plantio direto nas propriedades do solo e na cultura da soja*. 2004. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - FAMV - UPF. Passo Fundo, 2004.

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

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

COSTA, F. de S.; BAYER, C.; ALBUQUERQUE, J. A. FONTOURA S. M. V. Aumento de matéria orgânica num latossolo bruno em plantio direto. *Ciência Rural*, Santa Maria: v.34, n.2, p.587-589, mar-abr, 2004.

CUBILLA, M.; REINERT, D.; REICHERT, J. M. Plantas de cobertura do solo: uma alternativa para aliviar a compactação em sistema plantio direto. In: Reunião Sul-brasileira de ciência do solo, 4, 2002, Porto Alegre, *Resumo expandido*. Porto Alegre: UFRGS, 2002, CD-Rom.

DECAGON DEVICES. *Operator's manual version 1.3 WP4 dewpointmeter*. USA, Decagon devices. 70 p. 2000.

DIAS JUNIOR, M. de; MIRANDA, E. E. V. de. Comportamento da curva de compactação de cinco solos da região de Lavras (MG). *Ciência Agrotecnica*, Lavras. v.24. n. 2, p.337-346. 2000.

DOURADO NETO, D.; JONG VAN LIER, Q. de; BOTREL, T. A.; LIBARDI, P. L. Programa para confecção da curva de retenção de água no solo utilizando o modelo de Genuchten. *Engenharia Rural*. v. 1, p. 92-102, 1990.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Manual de métodos de análise de solo*. 2ª ed. Rio de Janeiro. 1997. 212p.

FERRERAS, L. A.; BATTISTA, J. J. de; AUSILIO, A.; PECORARI, C. Parâmetros físicos del suelo em condiciones no perturbadas y bajo laboro. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*. Brasília, v. 36, n. 1, p. 161 – 170, 2001.

FIGUEIREDO, L. H. A. *et al.* Efeito dos manejos do solo na densidade do solo máxima e umidade ótima de um Latossolo Roxo. In: Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água, 12, 1998, Fortaleza. *Resumos expandidos*. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 1998. p. 236-237.

FOLONI, J. S. S.; CALONEGO, J. C.; LIMA, S. L. de. Efeito da compactação do solo no desenvolvimento aéreo e radicular de cultivares de milho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. Brasília, v. 38, n. 8, p. 947-953, ago. 2003.

FREIXO, A. A. *Caracterização da matéria orgânica de latossolos sob diferentes sistemas de cultivo através de fracionamento físico e espectroscopia de infravermelho.*, 2000. Dissertação (Mestrado em Agronomia) UFRJ, Rio de Janeiro, 2000. 86 p.

HALL, D. G. M.; REEVE, M. J.; THOMASSON, A. J.; WRIGHT, V. F. *Water retention, porosity and density of field soils*. Harpenden: Soil Survy, 1977. 75p. (Technical Monograph, 9).

HAKANSSON, I. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. *Soil e Tillage Research*. v. 16, p. 105 – 120, 1990.

HERRERA, M. D. L.; WEIRICH NETO, P. H.; COLET, M. J. Resposta de rendimento do milho (*Zea mays* L.) à variabilidade do conteúdo de argila do solo. . In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 34, 2005, Canoas. *Anais...* Canoas: SBEA, 2005. CD-Rom.

HILLEL, D. *Solo e água: fenômenos e princípios físicos*. Porto Alegre: UFRGS, 1970. 231p.

HILLEL, D. *Fundamentals of soil physics*. New York: Academic press, 1980. 213 p.

IMHOFF, S.; SILVA, A. P. da; TORMENA, C. A. Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade de um solo sob pastagem. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 35, n. 7, p. 1493 – 1500, jul. 2000.

INDA JR., A. V.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C. Composição da fase sólida mineral do solo. In: MEURER, E. J. *Fundamentos de química do solo*. 2. ed. Porto Alegre: Gênese, 2004. p. 35-72.

JONES, A. J. *Soil compaction tips*. IANR. Nebraska Cooperative Extension. University of Nebraska-Lincoln, 1995.

KLAR, A.E. *A água no sistema solo – planta – atmosfera*. 2 ed. São Paulo: Nobel, 1988. 408p.

KIEHL, E.J. *Manual de edafologia*. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 262p.

KLEIN, V. A. *Propriedades físico-hídrico-mecânicas de um latossolo roxo, sob diferentes sistemas de uso e manejo*. 1998. Tese (Doutorado em solos e nutrição de plantas) – ESALQ – USP. Piracicaba, 1998. 150p.

KLEIN, V. A. Densidade relativa – um indicador de qualidade física do solo. In: Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água, 14, 2002, Cuiabá. *Resumos expandidos*. Cuiabá: SBCS, 2002. CD-ROM.

KLEIN, V. A. *Propriedades do solo e manejo da água em ambientes protegidos com cultivo de morangueiro e figueira*. Passo Fundo: ed. UPF, 2005. 61 p.

KLEIN, V. A. LIBARDI, P. L. Consistência de um Latossolo Roxo submetido a diferentes sistemas de uso e manejo. *Suelo y nutrición vegetal*, São Tiago, v. 1, p. 54 – 58, 2001.

KLEIN, V. A.; MASSING, J. P.; CAMARA, R. K.; BIASUZ Jr., I. J.; SIMON, M. A. Densidade máxima e relativa de solos sob plantio direto. In: Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água, 15, 2004, Santa Maria. *Resumos expandidos*. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2004. CD-ROM.

LEÃO, T. P. Intervalo hídrico ótimo em diferentes sistemas de pastejo e manejo de pastagem. 2002. Dissertação (Mestrado em solos e nutrição de plantas) – ESALQ – USP. Piracicaba, 2002. 58p.

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. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, Campinas, v. 28, p. 415-423, 2004.

LIBARDI, P. L. *Dinâmica da água no solo*. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2005, 335p.

LIPIEC, J.; HAKANSSON, I.; TARKIEWICZ, S.; KOSSOWSKI, J. Soil physical properties and growth of spring barley as related to the degree of compactness of two soils. *Soil e Tillage Research*, v. 19, p. 307 – 317, 1991.

MARCOLIN, C. D. et al. Efeito de restos culturais sobre a superfície do solo na compactação do solo. In: Reunião Brasileira de Manejo e

Conservação do Solo e da Água, 15, 2004, Santa Maria. *Resumos expandidos*. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2004. CD-ROM.

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

NESMITH, D. S. Soil compaction in double-cropped wheat and soybeans on an Ultisol. *Soil Society Science of America Journal*, Madison, v. 51, p. 183-6, 1987.

NOGUEIRA, J. B. *Mecânica dos solos: ensaios de laboratório*. São Carlos: USP, EESC, 1998. 248p.

ORELLANA, J. A.; PILATTI, M. GRENON, D. A. Soil quality: an approach to physical state assessment. *Journal Sust. Agriculture*. v. 9, p. 91-107, 1997.

OTTONI FILHO, T. B. Uma classificação físico-hídrica dos solos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 27. p. 211 – 222, 2003.

PECHE FILHO, A. Critérios para avaliar a qualidade do plantio direto. *O Agrônomo*. IAC. Campinas. v.51, n. 1, 1999.

PEREIRA, J. O.; SIQUEIRA, J. A. C.; URIBE-OPAZO, M. A.; SILVA, S. de L. Resistência do solo à penetração em função do sistema de cultivo e teor de água do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 6, n. 1, p. 171-174, 2002.

PRADO, R. de M.; ROQUE, C. G.; SOUZA, Z. M. de. Sistemas de preparo e resistência à penetração e densidade de um Latossolo Vermelho eutrófico em cultivo intensivo e pousio. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 37, n. 12, p. 1795-1801, dez. 2002

RAWLS, W. J.; PACHEPSKY, Y. A.; RITCHIE, J. C.; SOBECKI, T. M.; BLOODWORTH, H. Effect of soil organic carbon on soil water retention. *Geoderma*, v. 116, 2003, p. 61 – 76.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 12, p. 211 – 216, 1988.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. *Solo, planta e atmosfera: conceito, processo e aplicações*. Barueri: Manole, 2004, 478 p.

RIBON, A. A. e TAVARES FILHO, J. Models for the estimation of the physical quality of a Yellow Red Latosol (Oxisol) under pasture. *Braz. arch. biol. technol.*, v. 47, n. 1, p. 25-31, mar. 2004.

ROSOLEM, C.A. *et al.* Crescimento radicular de plântula de milho afetado pela resistência à penetração. *Revista Agropecuária Brasileira*, v. 34, n. 5, p.821-828, 1999.

SEIXAS, F.; OLIVEIRA JÚNIO, E. D. De; SOUZA, C. R. De. Efeito da camada de resíduos florestais na compactação do solo causada pelo transporte primário da madeira. *Scientia forestalis*, n. 54, p. 9 – 16, 1998.

SILVA, V. R. da; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em plantio direto. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 34, n. 2, mar-abr, 2004.

SILVEIRA, P. M. da; CUNHA, A. A. da. Variabilidade de micronutrientes, matéria orgânica e argila de um Latossolo submetido a sistemas de preparo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 37, n. 9, p. 1325 – 1332, set. 2002.

SOUZA, Z. M de; BEUTLER, A. N.; MELO, V. P.; MELO, W. J. de. Estabilidade de agregados e resistência à penetração em latossolos adubados por cinco anos com biossólido. *Revista Brasileira de Ciência de Solo*, Campinas, v. 29, p. 117-123, 2005.

STRECK, E. V. *et al.* *Solos do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre: EMATER/RS; UFRGS, 2002. 128 p.

TAYLOR, H. M.; GARDNER, H. R. Penetration of cotton seedling taproots as influenced by bulk density, moisture content and strength of soil. *Soil Science Society of America Proceedings*, Madison, v. 102, p. 153-6, 1963.

TAYLOR, H. M.; ROBERTSON, G. M.; PARKER, J. J. Soil strength root penetration for medium to coarse textured soil materials. *Soil Science Society of America Journal*, v. 102, p. 18-22, 1966.

TEDESCO, M. J. *et al.* Análise de solo, plantas e outros materiais. 2. ed. Porto Alegre: Departamento de solos – UFRGS, 1995. 174 p.

TEIXEIRA, C. F. A.; PAULETTO, E. A.; SILVA, J. B. da. Resistência mecânica à penetração de um argissolo amarelo distrófico típico sob diferentes sistemas de produção em plantio direto. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 33, n. 6, p. 1165-1167, nov-dez, 2003.

TERMINIELLO, A. M.; BALBUENA, R. H.; DRAGHI, L. M. CLAVERIE, J. A.; PALANCAR, T. C.; JORAJURÍA, D. Comportamento mecânico do solo sob tráfego em dois sistemas de preparo do solo. *Engenharia. Agrícola*, Jaboticabal, v. 24, n. 1, p.158-166, jan./abr. 2004.

TOGNON, A. A., DEMATTE, J. L. I. e DEMATTE, J. A. M. Teor e distribuição da matéria orgânica em latossolos das regiões da floresta amazônica e dos cerrados do Brasil central. *Sci. agric.*, 1998, v. 55, n. 3, p. 343-354.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; GONÇALVES, A. C. A.; FOLEGATTI, M. V. Intervalo ótimo de potencial da água no solo: um conceito para avaliação da qualidade física do solo e manejo da água na agricultura irrigada. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 3, n. 3, p. 286-292, 1999.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. da; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 22, p. 573 – 581, 1998.

TREIN, C. R. E BOENI, M. Pressão de pré-consolidação do solo influenciado pelo teor de água do solo e pressão de inflação dos pneus do trator. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 29, 2000, Fortaleza. *Resumos expandidos*. Fortaleza: SBEA, 2000. CD-ROM.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of American Journal*. Madison, v. 44, p. 892-8, 1980.

VARGAS, M. *Introdução à mecânica dos solos*. São Paulo: USP, 1977. 509 p.

VITORINO, A. C. T. *et al.* Mineralogia, química e estabilidade de agregados do tamanho de silte de solos da Região Sudeste do Brasil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 38, n. 1, p. 133-141, jan. 2003.