



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

LORENA CHAGAS TORRES

**ALTERAÇÕES FÍSICAS EM UM SOLO SOB PASTAGEM NO NORDESTE
PARAENSE**

BELÉM
2012



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

LORENA CHAGAS TORRES

**ALTERAÇÕES FÍSICAS EM UM SOLO SOB PASTAGEM NO NORDESTE
PARAENSE**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, para obtenção do título de Mestre em Agronomia.

Orientadora: Profa. Dra. Herdjania Veras de Lima

DISSERTAÇÃO
631.43
TG89

**BELÉM
2012**

Torres, Lorena Chagas

Alterações físicas em um solo sob pastagens no Nordeste paraense./
Lorena Chagas Torres. – Belém, 2012.

44 f.

Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal Rural
da Amazônia, 2012.

1. Solo - Estrutura 2. Solo - *índice-S* 3. Solo - intervalo hídrico ótimo
– IHO I. Título.

CDD – 631.43

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZONIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
MESTRADO EM AGRONOMIA

Declaro ter recebido o documento referente à dissertação de mestrado da aluna Lorena Chagas Torres intitulada Alterações físicas de um solo sob pastagem no Nordeste paraense, em cumprimento às exigências do Programa de Pós-graduação em Agronomia.

Belém, 23 de fevereiro de 2012

Atenciosamente,

McFlora

Bibliotecária / UFRA



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

LORENA CHAGAS TORRES

**ALTERAÇÕES FÍSICAS EM UM SOLO SOB PASTAGEM NO NORDESTE
PARAENSE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Federal Rural da Amazônia, como requisito para obtenção do título de Mestre em Agronomia.

BANCA EXAMINADORA

Dra. Herdjanía Veras de Lima - Orientadora
(UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA)

Dr. Álvaro Pires da Silva – 1º Examinador
(ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA LUIZ DE QUEIROZ)

Dra. Neyde Fabíola Balarezo Giarela – 2º Examinador
(UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA)

Dr. Jorge Luiz Piccinin – 3º Examinador
(MUSEU PARAENSE EMÍLIO GOELDI)

Aos meus pais Aluizio e Lourdiney e às irmãs Mara e Alycia, pelos ensinamentos, apoio e amor incondicional.

Ao amor Gustavo Nogueira, pela compreensão, incentivo e cumplicidade.

DEDICO E OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

À Deus e à Nossa Senhora de Nazaré por terem me concebido a dádiva da vida;

À Profa. Dra. Herdjania Veras de Lima pela orientação e contribuição em minha formação profissional;

Ao Prof. Dr. Álvaro Pires da Silva da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" pela disponibilidade do laboratório de física do solo;

Ao Prof. Dr. Edson Ramos da Universidade Federal do Pará pela assistência no desenvolvimento do trabalho;

Ao Dr. Getúlio Figueiredo pelos conhecimentos transmitidos;

Ao Sr. Persio pela disponibilidade das áreas para realização das coletas;

Ao Programa de Pós-graduação em Agronomia da Universidade Federal Rural da Amazônia pela oportunidade;

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Agronomia da Universidade Federal Rural da Amazônia por todos os ensinamentos;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de estudo;

À amiga Katiane Barros, pelo companheirismo e colaboração nos trabalhos desde a graduação;

Aos amigos, Érika Freires, Renata Lima, Francisco Lúcio, Gleciâne Mascarenhas, Daniel Oliveira, Kilma Lima e Danielle Campinas, por todo o apoio e pelos momentos de descontração;

Aos amigos Cartiane Rocha e Leonardo Martins pela hospitalidade e apoio.

Aos colegas que contribuíram com as coletas em campo: Katiane, Francisco Lúcio, Tays, Priscila, Regina, Gilson, Adriane e Keila;

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Muito Obrigada!

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 Curva de retenção de água no solo (CRA) sob mata e pastagem a 10 (a) e 30 cm de profundidade (b). 32
- Figura 2 Distribuição do tamanho dos poros do solo, determinados pela derivação da equação de ajuste da curva de retenção em relação ao potencial mátrico nas áreas sob mata e pastagem a 10 cm (a) e a 30 cm de profundidade (b). 33
- Figura 3 Variação do *índice-S* em função da densidade do solo. 34
- Figura 4 Variação do conteúdo de água em função da densidade do solo nos níveis críticos da capacidade de campo ($\psi = -0,01\text{MPa}$ e $-0,033\text{MPa}$), ponto de murcha permanente ($\psi = -1,5\text{MPa}$), porosidade de aeração $\leq 10\%$ e resistência à penetração de 2,5 MPa em área sob mata (a) e pastagem (b) a 10 cm e mata (c) e pastagem (d) a 30 cm de profundidade. 36
- Figura 5 Variação do intervalo hídrico ótimo (IHO) em função da densidade do solo (D_s) em área sob mata e pastagem à 10 cm (a) e à 30 cm de profundidade (b), considerando a θ_{cc} (0,01 MPa) e em área sob mata e pastagem a 10 cm (c) e a 30 cm de profundidade (d), considerando a θ_{cc} (0,033 MPa). 38
- Figura 6 Relação entre intervalo hídrico ótimo, considerando θ_{cc} no potencial mátrico de -0,01 e 0,033MPa, e *índice-S* nas áreas de mata e pastagem a 10 e 30 cm de profundidade. 39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Caracterização química do solo sob mata e pastagem a 10 e 30 cm de profundidade.	26
Tabela 2	Distribuição granulométrica do solo sob mata e pastagem a 10 e 30 cm de profundidade.	26
Tabela 3	Resumo da estatística descritiva para densidade do solo, umidade do solo e resistência do solo à penetração de raízes, nas áreas sob mata e pastagem nas profundidades de 10 e 30 cm de profundidade.	30
Tabela 4	Parâmetros do ajuste da curva de retenção de água no solo à equação de van Genhuchten e <i>índice-S</i> .	31
Tabela 5	Modelos de regressão para as curvas de retenção de água e resistência do solo com transformações logarítmicas e respectivos coeficientes de determinação (r^2).	35

SUMÁRIO

RESUMO	
ABSTRACT	
1 CONTEXTUALIZAÇÃO	12
2 REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1 QUALIDADE FÍSICA DO SOLO	13
2.2 ALTERAÇÕES FÍSICAS EM SOLOS SOB PASTAGENS	17
REFERÊNCIAS	19
3 ALTERAÇÕES FÍSICAS DE UM SOLO SOB PASTAGEM NO NORDESTE PARAENSE	23
3.1 INTRODUÇÃO	23
3.2 MATERIAL E MÉTODOS	25
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
3.4 CONCLUSÕES	39
REFERÊNCIAS	40

TORRES, Lorena Chagas. **Alterações físicas em um solo sob pastagem no nordeste paraense**, 2011. 44 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém/PA.

RESUMO: A determinação das alterações físicas promovidas pelos sistemas de uso e manejo do solo é importante na avaliação do potencial produtivo das áreas cultivadas. Objetivou-se com este estudo, quantificar as alterações físicas do solo promovidas pelo sistema de pastagem tendo como referência um solo sob mata. Foram coletadas amostras deformadas e indeformadas na profundidade de 10 e 30 cm, em áreas adjacentes, sob floresta primária e sob pastagem utilizadas na determinação das análises químicas, para caracterização da fertilidade, e análises físicas. O estudo das propriedades físicas foi realizado a partir da densidade do solo (Ds), curva de retenção de água (CRA), resistência à penetração (RP), *índice-S* e intervalo hídrico ótimo (IHO). Foi observado maior Ds nos solos sob pastagem nas duas profundidades, no entanto, quanto à retenção de água o aumento da Ds influenciou mais fortemente a camada superficial, no solo sob pastagem. O *índice-S* variou em função do uso do solo, valores acima do proposto para solos de boa qualidade física e estrutural foram observados na mata em superfície, enquanto que, no solo sob pastagem na mesma superfície, o *índice-S* indicou pobre qualidade estrutural. O IHO em combinação ao valor de *índice-S*, no solo sob mata na camada superficial indicou condições físicas favoráveis ao desenvolvimento de plantas. Enquanto que, no solo sob pastagem o IHO atingiu níveis críticos em função da resistência à penetração e porosidade de aeração. Observou-se relação linear significativa entre IHO e *índice-S*. O sistema de pastagem promoveu alterações físicas em níveis críticos no solo sob pastagem quando comparado com o solo sob mata, tais modificações foram mais evidentes em superfície.

Termos de indexação: Solo - Estrutura. Solo - *índice-S*. Solo - intervalo hídrico ótimo – IHO.

ABSTRACT:

The determination of the physical changes promoted by land use and soil systems management is important in evaluating the productive potential of cultivated areas. The objective of this study was quantifying the soil physical changes promoted by the pasture system with reference to a soil under forest. Were disturbed and undisturbed samples collected at a depth of 10 and 30 cm, in adjacent areas in primary forest and pasture used in determining the chemical analyzes to characterize the fertility and physical analysis. The study was conducted to physical properties from Soil Density (SD), water retention curve (WRC), penetration resistance (PR), S-index and retention water curve (RWC). SD was higher in pasture soil in two layers; however, as to increase the water retention SD influenced the surface layer more strongly in the pasture. S-index varied depending on the use of soil, the above values proposed for soil of good quality were observed physical and structural wood in the surface, while in the same pasture area, the S-index indicated poor quality of the structure. The IHO in combination to the S-index value, the soil under forest in the surface layer indicated physical conditions favorable to plant growth. While in the pasture the IHO reached critical levels due to the resistance to penetration and aeration porosity. There was a significant linear relationship between IHO and S-index. The pasture system promoted physical changes in critical levels in pasture soil compared with soil under forest, such changes were more evident on the surface.

Index terms: soil- structure, soil- *índice-S*, soil- limiting water range (LLWR).

1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Solos quando submetidos a sistemas de uso e manejo sofrem alterações em sua estrutura, que influenciam as propriedades físico-hídricas do solo. Em sistemas de pastagens, as alterações físicas do solo são mais evidentes na camada superficial, e deve-se principalmente, ao efeito do pisoteio de animais, que promovem aumento na densidade do solo, retenção de água e resistência que a matriz do solo oferece ao crescimento de raízes.

Na região nordeste do estado do Pará, áreas sob vegetação nativa estão sendo gradativamente substituídas por sistemas de pastagens, e poucos estudos têm sido realizados para avaliar a magnitude das alterações promovidas pelo uso do solo, principalmente no que diz respeito à qualidade física. Desse modo, torna-se importante a determinação dessas alterações para orientar práticas de manejo que aumentem a capacidade produtiva das áreas cultivadas.

Novas metodologias para avaliar a qualidade física do solo têm sido propostas na literatura. Nesse contexto, o intervalo hídrico ótimo (IHO) tem se destacado, pois, integra em um único parâmetro as variações do conteúdo de água em função da densidade do solo em que ocorrem mínimas limitações ao desenvolvimento de plantas, considerando a porosidade de aeração, resistência à penetração e água disponível.

O *índice-S* obtido a partir do ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo (CRA) também tem sido considerado um indicador confiável na determinação da qualidade física e estrutural do solo. Esse índice reflete diretamente a distribuição de poros de maior frequência no solo e torna possível a comparação direta de diferentes solos e a influência dos sistemas de uso e manejo em sua qualidade física.

Diante da importância do conhecimento dos efeitos do uso e manejo do solo, avaliados por indicadores de qualidade física, estabeleceu-se a hipótese que o sistema de pastagem altera as propriedades físicas do solo a níveis críticos para o crescimento de plantas. O objetivo foi quantificar as alterações físicas do solo promovidas pelo sistema de pastagem tendo como referência um solo sob mata.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 QUALIDADE FÍSICA DO SOLO

A qualidade física de um solo é condicionada por sua estrutura, que se refere à forma e arranjo das partículas e dos poros a elas associados, que determinam a capacidade do solo em promover condições físicas adequadas ao fornecimento de nutrientes, água e oxigênio (BREWER; SLEEMAN, 1960).

A estrutura do solo pode ser afetada pelos efeitos de uso e manejo, causando conseqüentemente, aumento na densidade do solo (AZENEGASHE et al., 1997), que influencia diversas propriedades físico-hídricas. Desse modo, a quantificação destes efeitos é importante no desenvolvimento de sistemas agrícolas que possam manter seu potencial produtivo de forma sustentável (DEXTER; YOUNGS, 1992). As condições físicas favoráveis ao crescimento radicular são determinadas pela disponibilidade de água, aeração, temperatura e pela resistência que a matriz do solo oferece ao crescimento radicular (LETEY, 1985).

As principais alterações físico-hídricas do solo, ocorridas em função do aumento da Ds estão relacionadas à diminuição da porosidade total e alteração na distribuição do diâmetro dos poros (WILLATT; PULLAR, 1983; DEXTER, 1988), mudança nas características de retenção da água (KATOU et al., 1987) e aumento da resistência que o solo oferece ao crescimento de raízes (WILLAT; PULLART, 1983). Vários autores utilizaram tais propriedades para avaliar as condições físicas dos solos (ISLAM; WEIL, 2000; IMHOFF et al., 2000; RICHARD et al., 2001; KLEIN; LIBARDI, 2002; GIAROLA et al., 2003; BEUTLER et al., 2006; GIAROLA et al., 2007; BLAINSKY et al., 2008; MAZURANA et al., 2011).

A dinâmica de retenção de água no solo pode ser influenciada pelo processo de compactação, devido às alterações promovidas na porosidade total e na distribuição do diâmetro dos poros, com o aumento do volume de poros de menor tamanho, e conseqüentemente maior retenção de água (ARCHER; SMITH, 1972; TORMENA et al., 1998).

Klein e Libardi (2002) observaram umidade na condição de solo saturado $0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ maior na mata, enquanto que, no ponto de murcha permanente a umidade foi de $0,051 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ maior em solo cultivado, atribuindo a maior retenção de água às modificações da porosidade

responsável pelo movimento rápido de água no solo que ocorreram em função do aumento da densidade do solo na área cultivada. Giarola et al. (2007) também observaram redução significativa na porosidade total e na macroporosidade no horizonte A de um solo cultivado quando comparado com solo sob floresta. Quanto à microporosidade do solo, os autores não observaram alterações significativas entre as áreas, indicando que esta propriedade é mais influenciada pela textura e conteúdo de matéria orgânica do que pelos efeitos de uso e manejo.

A resistência do solo à penetração (RP) refere-se à resistência física que o solo oferece a algo que tenta se mover através dele, sendo importante para determinar a qualidade física do solo (BENGHOUGH; MULLINS, 1990). O comportamento da RP depende das variações no conteúdo de água e da densidade do solo (BUSSCHER, 1990). O crescimento radicular é reduzido com o aumento da RP e valores acima de 2,0 MPa são considerados críticos ao desenvolvimento radicular (TAYLOR et al., 1966).

Com o aumento da Ds, as maiores fricções entre as partículas e o aumento da coesão do solo atuam como mecanismos para o incremento da RP (VEPRASKAS, 1984). Assim como, quando o solo apresenta baixo conteúdo de água, há redução da película de água sobre as partículas individuais do solo e aumento na magnitude das forças de coesão entre as partículas minerais do solo que encontram-se mais próximas e difíceis de serem separadas por pequenas forças externas favorecendo o aumento nos valores de RP (KEY; ANGERS, 1999; SILVEIRA et al., 2010; PETEAN et al., 2010). Giarola et al. (2003) estudando a relação entre stress efetivo e resistência à penetração em solos coesos observou relação linear entre as duas variáveis e constatou que o aumento nos valores de RP pode estar associado também ao aumento do stress efetivo.

A qualidade física do solo pode ser melhor quantificada quando consideradas medidas integradoras das modificações promovidas pelo uso e manejo do solo. Nesse contexto, Letey (1985) introduziu o conceito de um parâmetro único para descrever o intervalo de conteúdo de água que incorpora as limitações para o crescimento de plantas quanto à porosidade de aeração, resistência à penetração e água disponível e definiu como “*Non-Limiting Water Range* (NLWR)”. Posteriormente, com base no conceito de Letey (1985), Silva et al. (1994) redefiniram e quantificaram o NLWR e proporam o “*Least Limiting Water Range* (LLWR)” ou “*Intervalo Hídrico Ótimo* (IHO)” que tem recebido destaque na avaliação da condições físicas dos solos, pois, considera de forma integrada, as variações do conteúdo de água em função da densidade do solo em que ocorrem mínimas limitações ao desenvolvimento de plantas, considerando à porosidade de aeração, resistência à penetração e

água disponível. O IHO representa a faixa de umidade do solo definida pelo limite superior, considerado a umidade na capacidade de campo ou no conteúdo de água em que a porosidade de aeração atinge níveis críticos, e pelo limite inferior, considerado como a umidade no ponto de murcha permanente ou a umidade em que a resistência do solo à penetração torna-se limitante (SILVA et al., 1997).

Valores que indicam condições críticas ao desenvolvimento de plantas quanto às propriedades que determinam o IHO foram reportados na literatura. Grabler e Siemer (1968) definem uma porosidade de aeração mínima de 10% para que a taxa de oxigênio forneça energia suficiente para que a planta realize seus processos metabólicos. Taylor et al. (1966) atribuem valores de RP acima de 2,0 MPa como restritivos ao crescimento radicular. Viehmeyer e Hendrickson (1927) consideraram como água disponível (AD) o conteúdo de água retido entre a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP). Vários autores atestaram a eficiência do IHO como um indicador da qualidade física dos solos.

O IHO foi utilizado por Silva e Kay (1996) para avaliar o crescimento de plantas de milho e observaram relação negativa entre o IHO e crescimento das plantas, e também que, os valores de umidade obtidos fora dos limites do IHO reduziram o crescimento de plantas. Tormena et al. (1998) introduziram no Brasil o conceito do IHO, estes autores verificaram em um Latossolo Roxo, que o IHO foi mais sensível às variações da estrutura do solo do que a água disponível (AD), pois a umidade em que a resistência a penetração torna-se crítica limitou em mais de 80% as amostras analisadas.

Araújo et al. (2004) verificou, que o IHO no solo sob mata nativa foi determinado pelo conteúdo de água entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente (AD), enquanto que, em um solo cultivado, o limite superior do IHO foi influenciado pela porosidade de aeração e o limite inferior pela resistência à penetração, caracterizando perda da qualidade física do solo.

Leão et al. (2006) atestou a eficiência do IHO como potencial indicador das mudanças na qualidade física do solo, após a conversão do sistema de cerrado natural em pastagens, e observou redução significativa do IHO nos sistemas de pastagens, tais limitações foram promovidas principalmente pela resistência à penetração. Olibone et al. (2010) observaram através do IHO, a contribuição do sistema de rotação de culturas em aumentar a qualidade física do solo na camada superficial.

O *índice-S* recentemente proposto por Dexter (2004a) também é utilizado para avaliar a qualidade física e estrutural do solo, sendo obtido a partir do ponto de inflexão da curva de

retenção de água no solo (CRA) que é determinada pela relação entre o conteúdo de água com base em massa ($\theta \text{ kg kg}^{-1}$) e o logaritmo do potencial hídrico do solo (hPa). Portanto, o *índice-S* é definido como valor da inclinação da CRA em seu ponto de inflexão e reflete diretamente a distribuição dos poros de maior frequência no solo.

Dexter et al. (2004a) destaca que a porosidade do solo é classificada em: porosidade estrutural, que refere-se à bioporos, fendas, microfendas e porosidade textural que ocorre entre as partículas minerais primárias. A maior declividade da curva de retenção de água do solo no ponto de inflexão é devido, principalmente, à porosidade estrutural, que é sensível aos efeitos de uso e manejo. Valores críticos de *índice-S* foram sugeridos por Dexter (2004 a, 2004 b): *índice-S* > 0,035 indica condições físicas favoráveis ao crescimento de raízes, $0,020 < \textit{índice-S} < 0,035$ indica restrições físicas do solo com pouco crescimento de raízes, e *índice-S* < 0,020 indica condições altamente restritivas, sem crescimento radicular.

Tormena et al. (2008) confirmaram a hipótese que o *índice-S* é um indicador confiável da qualidade física do solo, pois observaram diferenças entre o comportamento físico de um Latossolo vermelho - amarelo cultivado com milho sob plantio direto e preparo convencional. Menores valores de *índice-S* foram observados no sistema de preparo convencional quando comparado ao plantio direto. Foi possível também avaliar as diferenças físicas do solo na linha e entre linha de plantio, pois, maiores valores de *índice-S* foram observados na entrelinha de plantio nos dois sistemas. Assim como, Streck et al. (2008) que também observaram variações no *índice-S* de acordo com as modificações impostas pelos sistemas de manejo. Maiores valores foram observados no sistema de plantio direto, quando comparado com solo sob floresta nativa, sendo que, para o sistema de plantio direto os valores de *índice-S* foram abaixo de 0,035 na camada 15-20 e 20-35 cm, indicando restrições ao crescimento radicular nessas profundidades.

A partir do *índice-S* Silva et al. (2011) observaram que os sistemas agroflorestais melhoram ou mantiveram a qualidade física do solo quando comparado com o solo sob vegetação natural, enquanto que, o sistema de cultivo convencional apresentou valores de *índice-S* inferiores aos sistemas agroflorestais e vegetação natural, indicando alteração na qualidade física do solo.

Desse modo, a utilização do *índice-S* torna possível comparar a influência dos sistemas de uso e manejo na qualidade física dos solos, mesmo quando estão envolvidos solos com diferentes classes texturais (DEXTER et al., 2004a).

2.2 ALTERAÇÕES FÍSICAS EM SOLOS SOB PASTAGEM

Solos sob condições naturais apresentam propriedades físicas favoráveis ao crescimento de plantas, no entanto, sua utilização para fins agrícolas, promove alterações físicas que dependem do manejo, tipo de solo e do clima (GODEFROY; JACQUIN, 1975).

A qualidade física do solo é reduzida quando há alterações em sua estrutura em função do processo de compactação, que ocorre devido às altas pressões exercidas no solo por forças externas. Em sistemas de pastagens, este processo ocorre em função do pisoteio de animais, que pode comprometer a qualidade física do solo, principalmente, nas camadas mais superficiais (GREENWOOD; MCKENZIE, 2001). Tais modificações dependem da intensidade do pisoteio, da umidade e do tipo de solo (HAVEREN, 1983; PROFFIT et al., 1993).

Vários estudos têm constatado modificações promovidas pelos sistemas de pastagens. Imhoff et al. (2000) comparando os resultados de densidade do solo com os obtidos por Carvalho (1976), na mesma área de estudo, porém anteriormente a implantação do sistema de pastejo rotacionado intensivo, observou um incremento de densidade do solo de 12% , tal aumento foi atribuído à fatores e uso e manejo do solo reduzindo portanto, sua qualidade física.

Moreira et al. (2005) constataram que a degradação de solos cultivados com pastagem resultou no aumento da densidade e da resistência à penetração, diminuição da porosidade total e redução do desenvolvimento do sistema radicular das plantas.

Leão et al. (2006) observaram que em sistemas de pastejo contínuo e rotacionado o aumento da densidade do solo afetou a distribuição do tamanho do poros, com redução dos poros de maior tamanho, aumentando a retenção de água no potencial referente à capacidade de campo, quando comparado com o solo sob cerrado natural. Verificaram também, diminuição do intervalo hídrico ótimo (IHO) nos dois sistemas de pastagens, que foram limitados principalmente pela umidade em que a RP torna-se crítica.

Cardoso et al. 2011 constataram aumento na densidade do solo e na resistência à penetração de raízes e redução na porosidade total, macroporosidade e condutividade hidráulica do solo saturado em áreas com pastagens, quando comparadas com o solo sob condições naturais. Os autores associaram estes resultados provavelmente à maior pressão mecânica sobre o solo, exercida pelo pisoteio dos animais, e à redução no teor de matéria orgânica nas pastagens.

Tais resultados sugerem as fortes alterações promovidas pelos sistemas de pastagens e a necessidade de técnicas de manejos adequados que proporcionem condições físicas favoráveis aos fluxos de água, calor e gases no solo e conseqüentemente aumento do potencial produtivo das plantas.

REFERÊNCIAS

- 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**, v.28, nº 2, p.337-345, 2004.
- ARCHER, J.R.; SMITH, P.D. The relation between bulk density, available water capacity and air capacity of soils. **Journal of Soil Science**, v.23, p.475-480, 1972.
- AZENEGASHE, O.A.; ALLEN, V.; FONTENOT, J. Grazing sheep and cattle together or separately: Effect on soil and plants. **Agronomy Journal**, v.89, p.380-386, 1997.
- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SILVA, A.P.; BARBOSA, J.C. Intervalo hídrico ótimo e produtividade de cultivares de soja. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.10, n.3, p.639-45, 2006.
- BENGHOUGH, A.G. & MULLINS, C.E. Mechanical impedance to root growth: A review of experimental techniques and root growth responses. **Journal of Soil Science**, 41:341-358, 1990.
- BLAINSKI, E; TORMENA, C. T.; FIDALSKI, J.; GUIMARÃES, R. M. L. Quantificação da degradação física do solo por meio da curva de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.975-983, 2008.
- BREWER, R.; SLEEMAN, J.R. Soil structure: attempts at its quantitative characterization. **Journal of Soil Science**, v.11 p.172-185, 1960.
- BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. **American Society of Agricultural Engineers**, v.33, p.519-524, 1990.
- CARVALHO, S.R.; Influência de dois sistemas de manejo de pastagens na compactação de uma Terra Roxa Esruturada. Piracicaba. USp/ESALQ, 1976, 89 p. Dissertação de Mestrado. In: IMHOFF, S.; SILVA, A. P.; TORMENA, C. A. Aplicação da curva de resistência do solo à penetração no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, p.1493-1500, 2000.
- DEXTER, A.R. Advances in characterization of soil structure. **Soil & Tillage Research**, v.11, p.199-238, 1988.
- DEXTER, A.R. & YOUNGS, I.M. Soil physic toward 2000. **Soil Tillage Reserch**, 24:101-106, 1992.
- DEXTER, A.R. Soil physical quality Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, v.120, p.201-214, 2004a.
- DEXTER A.R. Soil physical quality: Part III. Unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-theory. **Geoderma**, v.120, p.227-239, 2004b.
- GIAROLA, N.F.B.; SILVA, A. P.; IMHOFF, S. & DEXTER, A.R. Contribution of natural soil compaction on hardsetting behavior. **Geoderma**, 113:95-108, 2003.

GIAROLA, N.F.B.; TORMENA, C.S.; DUTRA, A. C. Degradação física de um latossolo vermelho utilizado para produção intensiva de forragem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.863-873, 2007.

GODEFROY, J.; JACQUIN, F. Relation entre la stabilité structurale des sols cultivés et le apports organiques en conditions tropicales;comparasion avec les sols forestiers. **Fruits**, v.30, p.595-612, 1975.

GRABLE, A.R.; SIEMER, E.G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corns roots. **Soil Science Society of America Proceedings**. v.32, p.180-186, 1968.

GREENWOOD, K. L.; McKENZIE, B. M. Grazing effects on soil physical properties and the consequences for pastures: a review. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, v.41, p.1231- 1250, 2001.

HAISE, H.R., HAAS, H.J., JENSEN, L.R. Soil moisture studies of some Great Plain soils: II. Field capacity as related to 1/3-atmosphere percentage and "minimum point" as related to 15- and 26-atmosphere percentages. **Soil Science Society of America Proceedings**. v.34, p.20-25, 1955.

IMHOFF, S.; SILVA, A. P.; TORMENA, C. A. Aplicação da curva de resistência do solo à penetração no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, p.1493-1500, 2000.

ISLAM, K.R.; WEIL, R.R. Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v.79, p.9-19, 2000.

KATOU, H., MIYAJI, K., KUBOTA, T. Susceptibility of undisturbed soils to compression as evaluated from the changes in the soil water characteristic curves. **Soil Science & Plant Nutrition**, v.33, n°4 p.539- 554, 1987.

KAY, B.D.; ANGERS, D.A. Soil structure. In: A. SUMNER, M.E., ed. **Handbook of Soil Science**. Boca Raton, CRC Press,1999, p.229-276.

KLEIN, V.A.; LIBARDI, P.L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.26, p.857-867, 2002.

LEÃO, T.P.; SILVA, A.P.; MACEDO, M.C.M.; IMHOFF, S.; EUCLIDES, V.P.B. Least limiting water range: A potential indicator of changes in near-surface soil physical quality after the conversion of Brazilian Savanna into pasture. **Soil & Tillage Research**, v.88, p. 279-285, 2006.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Advances in Soil Science**, v.1, p.277-294, 1985.

MAZURANA, M.; LEVIEN, R.; MÜLLER, J.; CONTE, O. Sistemas de preparo de solo: alterações na estrutura do solo e rendimento das culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35 p.1197-1206, 2011.

MOREIRA, J.A. A.; OLIVEIRA, I. P. de; GUIMARÃES, C. M.; STONE, L. F. Atributos químicos e físicos de um latossolo vermelho distrófico sob pastagens recuperada e degradada. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 35 (3),p. 155-161, 2005.

OLIBONE, D.; ENCIDE-OLIBONE, A. P.; ROSOLEM C. A. Least limiting water range and crop yields as affected by crop rotations and tillage. **Soil Use and Management**, v.26, p.485-493, 2010.

PETEAN, L. P.; TORMENA, C.A.; ALVES, S. J. Intervalo hídrico ótimo de um latossolo vermelho distroférrico sob plantio direto em sistema de integração lavoura-pecuária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.1515-1526, 2010.

PROFFITT A. P. B.; BENDOTTI S.; HOWELL M. R., EASTHAM J. The effect of sheep trampling and grazing on soil physical properties and pasture growth for a red brown earth. **Australian Journal of Agricultural Research**, v.44, p.317-331, 1993.

RICHARD, G., COUSIN, I., SILLON, J.F., BRUAND, A., GUÉRIF, J. Effect of compaction on the porosity of a silty soil: influence on unsaturated hydraulic properties. **European Journal of Soil Science**. v.52, p.49-58, 2001.

SILVA, A.P.; KAY, B.D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, v.58, p.1775-1781, 1994.

SILVA, A.P. & KAY, B.D. The sensitivity of shoot growth of corn to the least limiting water range of soils. **Plant Soil**, 184, 323-329, 1996.

SILVA, A.P.; KAY, B.D. Estimating the least limiting water range of soils from properties and management. **Soil Science Society of America Journal**, v.61, p.877-883, 1997.

SILVEIRA, D. de C.; MELO FILHO, J.F. de; SACRAMENTO, J.A.A.S.do; SILVEIRA, E.C.P.; Relação umidade versus resistência à penetração para um argissolo amarelo distrocoeso no recôncavo da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 34:659-667, 2010.

STRECK, C.A.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; HORN, R. Relações do parâmetro S para algumas propriedades físicas de solos do Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2603-2612, 2008, Número Especial.

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

van HAVEREN, B. B. Soil bulk density as influenced by grazing intensity and soil type on a shortgrass prairie site. **J. Range Manage.** v.36, p.586-588, 1983.

VEPRASKAS, M.J. Cone index of loamy sands as influenced by pore size distribution and effective stress. **Soil Science Society of America Journal**, v.48, p.1220-1225, 1984.

VIEHMEYER, F.J.; HENDRICKSON, A.H. Soil moisture conditions in relation to plant growth. **Plant Physiology**, v.2, p.71- 78, 1927.

WILLATT, S.T.; PULLAR, D.M. Changes in soil physical properties under grazed pastures. **Australian Journal of Agricultural Research**, v.22, p.343-348, 1983.

3 ALTERAÇÕES FÍSICAS EM UM SOLO SOB PASTAGEM NO NORDESTE PARAENSE

3.1 INTRODUÇÃO

Na região nordeste do Estado do Pará os sistemas de uso do solo baseiam-se em sistemas de pastagens geralmente formados pela derrubada e queima da floresta, sistemas de agricultura de subsistência, culturas de exportação e extração madeireira. No entanto, ao longo do tempo apresentam redução na produtividade, mesmo com a adição de fertilizantes, devido a alterações na estrutura física do solo.

A degradação física do solo está associada às perdas de matéria orgânica e da condição estrutural, causando alterações nas propriedades do solo relacionadas com a dinâmica de água, ar e calor (FEDDEMA, 1998). Nesse contexto, torna-se importante a determinação dessas alterações, como forma de orientar práticas de manejo que aumentem a capacidade produtiva das áreas cultivadas.

As principais alterações físicas ocorridas em função do uso do solo estão relacionadas ao aumento da densidade do solo (AZENEGASHE et al., 1997), diminuição da porosidade total e alteração na distribuição do diâmetro dos poros e (WILLATT; PULLAR, 1983; DEXTER, 1988), mudança nas características de retenção da água (KATOU et al., 1987) e aumento da resistência que a matriz do solo oferece ao crescimento de raízes (WILLAT; PULLART,1983).

Em solos sob pastagens, a compactação ocorre em função do pisoteio de animais, o que pode comprometer a qualidade física do solo, principalmente nas camadas mais superficiais (GREENWOOD; McKENZIE, 2001). Tais modificações dependem da intensidade do pisoteio, da umidade e do tipo de solo (HAVEREN, 1983; PROFFIT et al., 1993). Os efeitos dos sistemas de pastagens na qualidade física do solo foram reportados na literatura por Imhoff et al. (2001); Moreira et al. (2005); Leão et al. (2006); Araújo et al. (2007) e Cardoso et al. (2011).

Diferentes propriedades físicas do solo têm sido usadas para avaliar sua qualidade física, dentre as quais, o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) proposto Silva et al. (1994) a partir dos conceitos de Letey (1985), tem recebido destaque, pois integra em um único parâmetro as variações do conteúdo de água em função da densidade do solo em que ocorrem mínimas

limitações ao desenvolvimento de plantas, considerando a porosidade de aeração, resistência à penetração e água disponível.

Valores que indicam condições críticas ao desenvolvimento de plantas quanto às propriedades que determinam o IHO foram reportados na literatura. Grabler e Siemer (1968) definem uma porosidade de aeração mínima de 10% para que a taxa de oxigênio forneça energia suficiente para que a planta realize seus processos metabólicos. Taylor et al. (1966) atribuem valores de resistência à penetração acima de 2,0 MPa como restritivos ao crescimento radicular. Viehmeyer e Hendrickson (1927) consideraram como água disponível (AD) o conteúdo de água retido entre a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP). Vários autores atestaram a eficiência do IHO como um indicador da qualidade física dos solos (SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 1998; TORMENA et al., 1999, WU et al., 2003; LEÃO et al., 2006; OLIBONE et al., 2010; SILVA et al. 2011).

O *índice-S* recentemente proposto por Dexter (2004 a) também é utilizado para avaliar a qualidade física e estrutural do solo, sendo obtido a partir do ponto de inflexão da curva de retenção de água do solo (CRA) que é determinada pela relação entre o conteúdo de água com base em massa ($\theta \text{ kg kg}^{-1}$) e o logaritmo do potencial hídrico do solo (hPa). Portanto, o *índice-S* é definido como valor da inclinação da CRA em seu ponto de inflexão e reflete diretamente a distribuição dos poros de maior frequência no solo.

Dexter et al. (2004 a) destaca que a porosidade do solo é classificada em: porosidade estrutural, que refere-se à bioporos, fendas, microfendas e porosidade textural que ocorre entre as partículas minerais primárias. A maior declividade da curva de retenção de água do solo no ponto de inflexão é devido, principalmente, à porosidade estrutural, que é sensível aos efeitos de uso e manejo. Desse modo, a utilização do *índice-S* torna possível a comparação direta de diferentes solos e a influência dos sistemas de uso e manejo em sua qualidade física, considerando que, o limite entre solos com boa e pobre qualidade estrutural ocorre com valor de *índice-S* igual a 0,035 (Dexter et al., 2004a). Vários autores confirmaram que o *índice-S* discrimina os efeitos de uso e manejo sobre a qualidade física do solo, dentre os quais, Tormena et al. (2008); Pereira et al. (2011); Silva et al. (2011) e Li et al. (2011).

Diante da importância do conhecimento dos efeitos do uso e manejo do solo, avaliados por indicadores de qualidade física, estabeleceu-se a hipótese que o sistema de pastagem altera as propriedades físicas do solo a níveis críticos ao crescimento de plantas. O objetivo foi quantificar as alterações físicas do solo promovidas pelo sistema de pastagem tendo como referência um solo sob mata.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em duas áreas adjacentes, localizadas no município de Paragominas, Nordeste Paraense. O clima da região é do tipo Aw, segundo a classificação de Köppen, isto é, tropical chuvoso com estação seca bem definida, com temperatura média anual de 26,5°C. A precipitação pluviométrica média anual é de 1.800 mm com duas estações, uma chuvosa que vai de dezembro a maio e outra menos chuvosa de junho a novembro. A umidade relativa do ar varia de 70% a 90%. O relevo predominante da região varia de plano a suave ondulado, com altitude média em torno de 200 m (RODRIGUES et al., 2002).

A amostragem foi realizada em um Latossolo Amarelo sob mata primária (floresta equatorial subperenifólia) e sob pastagem (*Panicum maximum*, cultivar Mombaça). Em cada área, estabeleceu-se um *grid* com espaçamento regular de 25 x 30 m e foram coletadas 20 amostras indeformadas em anéis metálicos de 100 cm³ (5 cm de altura e diâmetro) e 20 amostras deformadas, em superfície (10 cm) e em subsuperfície (30 cm), perfazendo um total de 80 amostras indeformadas e 80 amostras deformadas em cada área.

As amostras deformadas foram secas ao ar, destorroadas e peneiradas em malha de 2 mm para realização da análise química, granulométrica e densidade de partícula (Dp). Nas amostras indeformadas, foram retirados os excessos de solos, de modo que ocupassem somente o volume interno do anel. Em seguida, uma tela permeável foi colocada no fundo de cada anel permitindo o fluxo de água e ar nas mesmas e evitando a perda de solo. As amostras foram saturadas em bandejas através da elevação gradual de uma lâmina de água até atingir 2/3 da altura das amostras.

O pH foi determinado em água e KCl 1N na proporção 1:2,5. Os elementos químicos Ca²⁺, Mg²⁺ e Al³⁺ foram extraídos com solução de KCl 1 N e determinados por espectrometria de absorção atômica. A extração de P e K foi realizada com solução de H₂SO₄ 0,025N + HCl 0,05N. A determinação da H⁺ + Al³⁺ foi feita com solução de acetato de cálcio 1N a pH 7,0. Os valores de matéria orgânica foram calculados com base nos teores de carbono orgânico, determinado por titulação com sulfato ferroso amoniacal a 0,1N. As análises de todos os elementos descritos estão de acordo com a metodologia da EMBRAPA (1997). As propriedades químicas dos solos são exibidas na Tabela 1.

Tabela 1: Caracterização química do solo sob mata e pastagem a 10 e 30 cm de profundidade.

Áreas	pH		M.O	P	SB	T	V	m
	H ₂ O	KCl						
			g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	---mmolc kg ⁻¹ ---		-----%-----	
			10 cm					
Mata	4,4	3,8	37,7	8,0	14,2	74,3	19,2	3,2
Pastagem	5,0	4,1	21,4	5,9	8,5	82,5	10,4	2,3
			30 cm					
Mata	4,4	3,8	16,1	4,0	3,3	41,9	8,2	7,2
Pastagem	4,6	3,8	6,4	2,3	4,4	22,8	19,3	5,2

M.O: matéria orgânica, SB: soma de bases, T: CTC efetiva total, V: saturação por bases e m: saturação por alumínio.

A análise granulométrica foi realizada pelo método do densímetro (EMBRAPA, 1979), sendo as areias separadas por tamisação em cinco frações. A caracterização granulométrica é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2. Distribuição granulométrica do solo sob mata e pastagem a 10 e 30 cm de profundidade.

Áreas	Areia*					Silte	Argila	Classe Textural
	MG	G	M	F	MF			
	-----g kg ⁻¹ -----							
	10 cm							
Mata	0	2	22	35	604	118	219	Franco-argilo-arenosa
Pastagem	0	1	14	44	628	125	187	Franco-arenosa
	30 cm							
Mata	0	1	17	32	529	140	280	Franco-argilo-arenosa
Pastagem	0	1	10	40	567	98	283	Franco-argilo-arenosa

*MG = muito grossa (2-1 mm), G = grossa (1-0,5 mm), M = média (0,5-0,25 mm), F = fina (0,25-0,1 mm) e MF = muito fina (0,1-0,05 mm)

Para a determinação da Dp, utilizou-se um picnômetro de gás, modelo ACCUPYC 1330 (Micromeritics Instrument Corporation®). As amostras de solo foram secas em estufa à aproximadamente 45° C por 24 horas. Utilizou-se aproximadamente 8,0 g de solo seco para serem processados no picnômetro.

Para determinar a curva de retenção de água (CRA), as amostras indeformadas saturadas foram submetidas a diferentes potenciais mátricos (ψ) em mesa de tensão e em câmaras de pressão de Richards, sendo utilizadas 3 amostras em cada potencial mátrico. Foram aplicados os ψ de 0,03; 0,01 MPa em mesa de tensão e os ψ de 0,1; 0,3; 0,7; 1,5 MPa em câmaras de pressão, conforme Klute (1986), até atingirem o equilíbrio, cujo momento era

definido quando se constatava a completa ausência de drenagem na mesa de tensão e nas câmaras de pressão.

A CRA foi ajustada pelo modelo matemático proposto por van Genuchten (1980) com a restrição $\left(m = 1 - \frac{1}{n}\right)$, conforme a equação 1:

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

Onde θ é a umidade do solo ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); θ_r , a umidade residual ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); θ_s , a umidade de saturação ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); ψ , o potencial mátrico (hPa); α , m , n são os parâmetros empíricos do modelo. A partir dos parâmetros ajustados do modelo de van Genuchten (1980) foi calculado o *índice-S* conforme Dexter (2004 a) (Equação 2):

$$\text{index} - s = -n(\theta_s - \theta_r) \left[1 + \frac{1}{n}\right]^{-[1+m]} \quad (2)$$

Depois de atingido o equilíbrio das amostras, a resistência à penetração foi medida com auxílio de um penetrômetro eletrônico, composto por um atuador linear elétrico com motor de passo, um painel para controle da velocidade e direção de deslocamento, sendo utilizada uma base metálica para sustentação do conjunto mecânico. A resistência a penetração é determinada através de uma célula de carga com capacidade de 20 kg, acoplada ao braço mecânico. Na extremidade da célula de carga há uma haste com cone, o qual é inserido no solo.

Após a determinação da resistência à penetração as amostras de solo foram secas em estufa a 105 °C, durante 24 h, para determinação da densidade do solo conforme Blake e Hartge (1986).

A porosidade total (PT) foi calculada a partir da equação 3:

$$PT = \left(1 - \frac{D_s}{D_p}\right) \quad (3)$$

onde D_s é a densidade do solo em Mg m^{-3} e D_p é a densidade de partículas em Mg m^{-3} .

A distribuição do diâmetro dos poros foi calculada a partir da derivação da equação 1 (DEXTER, 2004a), conforme a equação 4:

$$\frac{d\theta}{d\ln(r)} = -mn(\theta_s - \theta_r)\alpha^n r^n (1 + \alpha r^n)^{-m-1} \quad (4)$$

onde r é o raio do poro (μm).

A partir da distribuição do diâmetro dos poros determinou-se a porosidade estrutural, definida como o conteúdo de água retido até o ponto de inflexão e a porosidade textural como o conteúdo de água retido a partir do ponto de inflexão.

O IHO foi determinado, conforme Silva et al. (1994). Os valores críticos para o crescimento das plantas de acordo com o potencial mátrico, resistência do solo e porosidade de aeração foram, respectivamente: a capacidade de campo (θ_{CC}) ou conteúdo de água no potencial mátrico de -0,01 e -0,033 MPa (HAISE et al., 1955), o ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) ou conteúdo de água no potencial de -1,5 MPa (RICHARDS; WEAVER, 1944), o conteúdo de água no solo em que a resistência (θ_{RP}) atinge 2,0 MPa (TAYLOR et al., 1966), e o conteúdo de água no solo em que a porosidade de aeração (θ_{PA}) é de $0,10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (GRABLE; SIEMER, 1968).

A relação entre θ e ψ foi estabelecida a partir do modelo proposto por Silva et al. (1994), que considera o efeito da D_s na retenção de água, conforme a equação 5:

$$\theta = \exp(a + bDs)\psi^c \quad (5)$$

Onde θ é o conteúdo de água no solo ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), D_s é a densidade do solo (Mg m^{-3}), ψ é potencial mátrico do solo (MPa) e a , b e c são os parâmetros de ajuste do modelo.

Os dados de resistência à penetração foram ajustados em relação à umidade volumétrica (θ) e a densidade do solo (D_s) utilizando o modelo não linear proposto por Busscher (1990) (Equação 6):

$$RP = d\theta^e D_s^f \quad (6)$$

Onde RP é a resistência à penetração (MPa), θ é o conteúdo de água no solo ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), D_s é a densidade do solo (Mg m^{-3}). Os coeficientes d , e e f são os parâmetros do modelo. Os valores de θ_{RP} em que ocorre resistência à penetração de 2,0 MPa foram obtidos por meio

do modelo matemático ajustado aos dados de resistência conforme a equação 6. O valor de θ_{PA} , em que a porosidade de aeração é de 10% foi calculado a partir da equação 7.

$$\theta_{PA_{10\%}} = \left[\left(1 - \frac{D_s}{D_p} \right) - 0,1 \right] \quad (7)$$

onde $\theta_{PA_{10\%}}$ é a umidade em que a porosidade de aeração é de 10% ou $0,1 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, D_s é a densidade do solo (Mg m^{-3}), D_p é a densidade de partícula (Mg m^{-3}).

O IHO foi calculado como a diferença entre o limite superior e inferior dos conteúdos de água em que ocorrem os parâmetros físicos considerados. De acordo com Wu et al. (2003) o IHO pode ser calculado a partir das equações:

(a) Se $(\theta_{PA} \geq \theta_{CC})$ e $(\theta_{RP} \leq \theta_{PMP})$:

$$IHO = \theta_{CC} - \theta_{PMP}$$

(b) Se $(\theta_{PA} \geq \theta_{CC})$ e $(\theta_{RP} \geq \theta_{PMP})$:

$$IHO = \theta_{CC} - \theta_{RP}$$

(c) Se $(\theta_{PA} \leq \theta_{CC})$ e $(\theta_{RP} \leq \theta_{PMP})$:

$$IHO = \theta_{PA} - \theta_{PMP}$$

(d) Se $(\theta_{PA} \leq \theta_{CC})$ e $(\theta_{RP} \geq \theta_{PMP})$:

$$IHO = \theta_{PA} - \theta_{RP}$$

Se o IHO for igual a zero a densidade do solo é conhecida como densidade crítica (Dsc). A D_s acima da Dsc constitui-se um indicativo de condições físicas desfavoráveis para o desenvolvimento do sistema radicular das plantas (SILVA; KAY, 1997).

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Maiores valores de Ds observados na pastagem com relação à mata, podem indicar alterações na estrutura do solo e por conseqüência no arranjo de poros (Tabela 3). Essas alterações causam estresses físicos às plantas devido à excessiva resistência do solo à penetração e ou, reduzida aeração, mesmo quando a disponibilidade de água no solo é adequada (GIAROLA et al., 2007). Estes resultados estão de acordo com os obtidos por Islam e Weil (2000); Araújo et al. (2004) e Giarola et al. (2007) que observaram valores de Ds maiores em área cultivada do que em área sob mata. A maior Ds em áreas sob pastagens está associada às altas pressões exercidas pelo pisoteio de animais, que podem comprometer a qualidade física do solo, principalmente nos primeiros 15 cm de profundidade (GREENWOOD; MCKENZIE, 2001).

Em subsuperfície, os maiores valores de Ds na área sob pastagem, podem estar associados às práticas de manejo, como aração e gradagem utilizadas na área antes da implantação do sistema de pastagem, que podem ter contribuído para o aumento da Ds nesta profundidade (Tabela 3).

Tabela 3. Resumo da estatística descritiva para densidade do solo, umidade do solo e resistência do solo à penetração de raízes, nas áreas sob mata e pastagem nas profundidades de 10 e 30 cm de profundidade.

Variável	Média	Mínimo	Máximo	DP	CV
Mata (10 cm)					
Ds	1,26	1,03	1,40	0,08	6,56
θ	0,23	0,11	0,40	0,09	39,46
RP	1,62	0,58	3,76	0,82	50,27
Pastagem (10 cm)					
Ds	1,60	1,49	1,69	0,05	3,21
θ	0,23	0,16	0,33	0,05	22,35
RP	3,60	0,73	10,41	0,58	67,97
Mata (30 cm)					
Ds	1,45	1,28	1,57	0,08	5,62
θ	0,22	0,12	0,34	0,07	32,12
RP	2,37	0,80	5,72	1,46	61,82
Pastagem (30 cm)					
Ds	1,59	1,43	1,70	0,08	5,40
θ	0,23	0,15	0,33	0,06	25,25
RP	3,64	0,65	10,90	3,52	96,79

Ds: densidade do solo (Mg m^{-3}); θ umidade do solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); RP: resistência do solo à penetração (MPa); DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação (%).

As alterações físicas dos solos sob pastagens dependem da intensidade do pisoteio animal, da umidade e do tipo de solo (HAVEREN, 1983; PROFFIT et al., 1993). O aumento da Ds também pode estar associado à redução nos conteúdos de matéria orgânica da área cultivada (SILVA; KAY, 1997). Houve redução de 43 e 60% do conteúdo de matéria orgânica no solo sob pastagem a 10 e 30 cm de profundidade, respectivamente, quando comparado com o solo de mata.

A partir do coeficiente de variação observou-se ampla dispersão nos valores de RP (Tabela 3), que estão associados ao gradiente de umidade imposto e a variabilidade nos valores de densidade do solo (IMHOFF et al., 2000). LIMA et al. (2006) e BLAINSKY et al. (2008); obtiveram elevados coeficientes de variação ao estudar essa relação, salientando a importância da padronização do conteúdo de água na determinação e interpretação da RP.

As curvas de retenção de água indicam diferenças entre as áreas, que podem ser observadas a partir dos parâmetros de ajuste a curva de retenção de água (Tabela 4). Em superfície (10 cm), o solo sob pastagem apresentou menor valor de n indicando lenta redução no conteúdo de água à medida que aumenta a tensão da água no solo, enquanto que para o solo sob mata a 10 cm a curva é mais íngreme indicando diminuição de água mais rápida.

Tabela 4. Parâmetros do ajuste da curva de retenção de água no solo à equação de van Genhuchten e *índice-S*.

Áreas	θ_{sat}	θ_{res}	α	n	<i>índice-S</i> *
	-----cm ³ cm ⁻³ -----		hPa ⁻¹		
			10 cm		
Mata	0,387	0,108	0,012	1,446	0,048
Pastagem	0,356	0,163	0,045	1,370	0,023
			30 cm		
Mata	0,343	0,129	0,015	1,433	0,032
Pastagem	0,352	0,162	0,029	1,444	0,026

θ_{sat} : umidade de saturação; θ_{res} : umidade residual; α , n : parâmetros do modelo
 (*): o *índice-S* foi calculado com base na θ em Kg Kg⁻¹

O conteúdo de água na capacidade de campo é determinado pela porosidade estrutural do solo, enquanto que, no ponto de murcha permanente, os fatores determinantes para a disponibilidade de água são a textura, mineralogia e o conteúdo de matéria orgânica (HILLEL, 1998). Solos com maior quantidade de partículas finas tendem a reter mais água sob baixos potenciais, conforme constatado por Centurion e Andrioli, (2000). No entanto, na área sob mata, a 10 cm de profundidade, o maior conteúdo de argila e M.O, quando comparado com a pastagem na mesma profundidade, não determinaram a maior retenção de

água, indicando maior influência do uso do solo nas modificações estruturais com o aumento da D_s , do que nas modificações quanto à textura do solo (Figura 1).

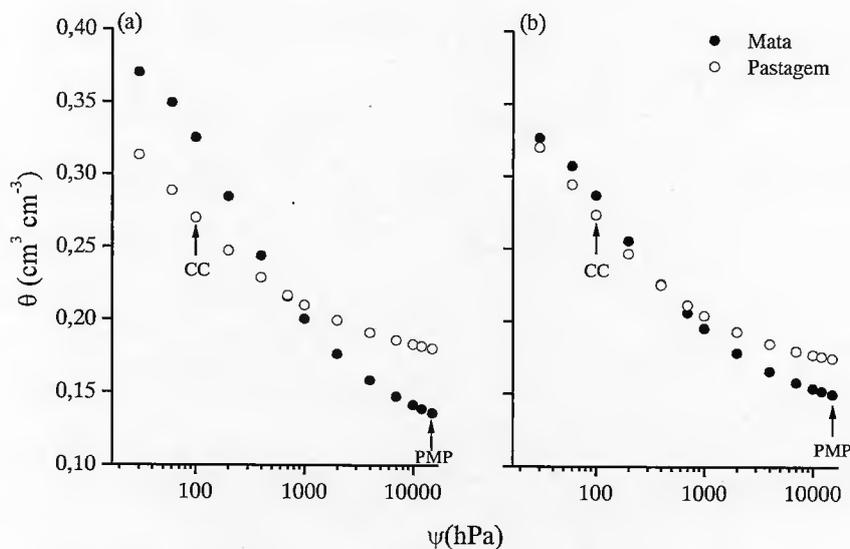


Figura 1. Curva de retenção de água no solo (CRA) sob mata e pastagem à 10 (a) e 30 cm de profundidade (b).

As alterações na D_s promoveram menor umidade na saturação e maior no ponto de murcha permanente em área sob pastagem em superfície (Tabela 4). Essas diferenças indicam que o sistema de pastagem apresentou maior influência na porosidade responsável pelo movimento rápido da água no solo, com conseqüente aumento da retenção de água. Resultados semelhantes foram obtidos por Klein e Libardi (2002), que verificaram a umidade na condição de solo saturado, $0,15 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ maior na mata, enquanto que, no ponto de murcha permanente a umidade foi de $0,051 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ maior em solo cultivado, atribuindo a maior retenção de água às modificações da porosidade pelo aumento da densidade do solo na área cultivada.

Com exceção da área sob mata em superfície, os valores do *índice-S* foram menores que 0,035 (Tabela 4 e Figura 2) considerado por Dexter (2004 a, c) como indicativo de solos com estrutura degradada, independente da classificação textural. Não foram observados valores de *índice-S* abaixo de 0,02, associado por Dexter (2004a, c) a solos com estrutura extremamente degradada. Altos valores de *índice-S* correspondem à grande quantidade de poros que drenam a água no ponto de inflexão, ou seja, aqueles que estão no pico da curva de distribuição do diâmetro dos poros.

Vale ressaltar que, o valor de 0,035 sugerido por Dexter (2004 a,b) para o *índice-S* ainda é provisório, sendo necessário mais estudos com diferentes solos e sistemas de manejo

que possam confirmar a eficiência dos limites já propostos ou estabelecer limites mais adequados às condições tropicais.

O menor valor do *índice-S* foi observado na área sob pastagem a 10 cm de profundidade (Tabela 4 e Figura 2), com predominância de poros de 48 μm , enquanto que na mata em mesma profundidade houve maior quantidade de poros de 180 μm . Menores valores do *índice-S* em áreas cultivadas estão associados à diminuição do pico da distribuição do diâmetro dos poros, que reduz a amplitude das curvas (DEXTER, 2004a).

Em subsuperfície, as diferenças entre os máximos das curvas foram menos evidentes, indicando uma pequena alteração no raio dos poros predominantes na área sob pastagem (Figura 2b). Os poros predominantes na área sob mata foram de 144 μm e na pastagem de 72 μm .

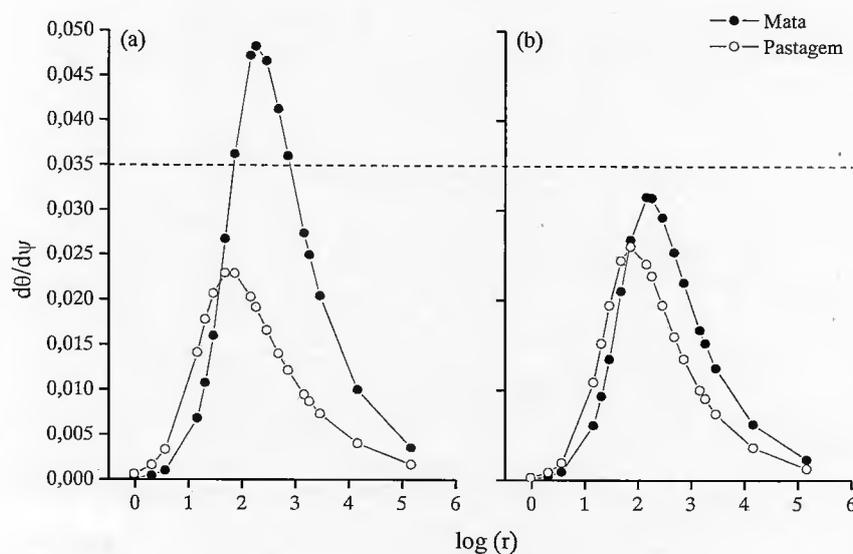


Figura 2. Distribuição do tamanho dos poros do solo, determinados pela derivação da equação de ajuste da curva de retenção em relação ao potencial mátrico nas áreas sob mata e pastagem à 10 cm (a) e à 30 cm de profundidade (b). A linha pontilhada representa o valor crítico de $S=0,035$ sugerido por Dexter (2004a).

De acordo com Dexter (2004) o *índice-S* apresenta relação negativa significativa com a D_s (p -valor $< 0,05$), conforme observado na Figura 3. Tormena et al. (2008); Streck et al. (2008); Pereira et al. (2011); Silva et al. (2011); Li et al. (2011) também observaram aumento nos valores de *índice-S* com a redução da D_s . Com a compactação do solo há redução preferencial dos poros de maior tamanho causando mudanças na distribuição do diâmetro dos poros e, conseqüentemente, nas características de retenção de água (HILL et al., 1985). Richard et al. (2001) observaram modificações na geometria dos poros em função do processo de compactação, assim como, redução do volume de poros estruturais no solo compactado em

comparação com o não compactado, o que resultou em alterações nas propriedades hidráulicas do solo com maior retenção de água na camada compactada.

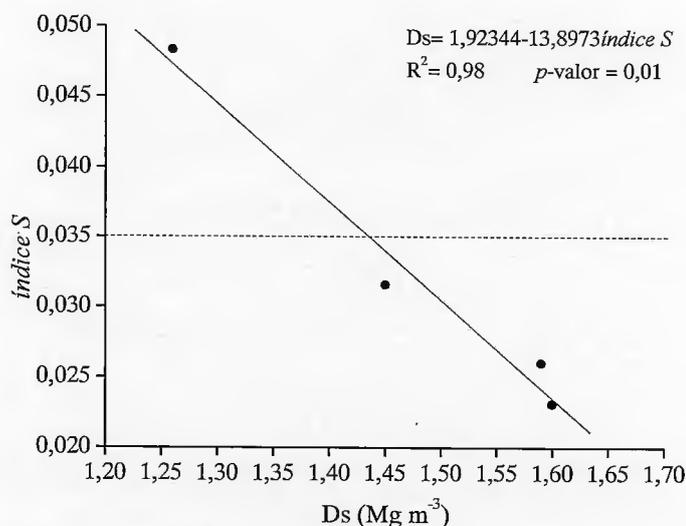


Figura 3. Variação do *índice-S* em função da densidade do solo. *O modelo ajustado é significativo a p -valor < 0,05. A linha pontilhada representa o valor crítico de $S=0,035$ estabelecido por Dexter (2004).

Para a curva de retenção de água (CRA), o modelo matemático ajustado aos dados explicou acima de 80% a variação do conteúdo de água nas áreas e profundidades avaliadas e para a curva de resistência do solo (CRS) o modelo explicou acima de 70% a variabilidade dos dados, com exceção à área de mata a 10 cm de profundidade que apresentou r^2 de 0,54 (Tabela 5). No entanto, apesar do reduzido coeficiente de determinação o valor de F foi significativo ($p < 0,01$). Os resíduos dos modelos da CRA e CRS apresentaram distribuição normal pelo teste de Kolmogorov-Smirnov (p -valor < 0,015).

A umidade do solo apresentou correlação positiva com a D_s e negativa com o ψ em todas as áreas estudadas (Tabela 5). Tais resultados estão de acordo com Tormena et al. (1998); Tormena et al. (1999); Araújo et al. (2004); Leão et al. (2004); Leão et al. (2006). A influência da D_s na retenção de água ocorre devido às alterações promovidas na porosidade total e na distribuição do diâmetro dos poros, com o aumento do volume de poros de menor tamanho, e conseqüentemente maior retenção de água (ARCHER; SMITH, 1972; TORMENA et al., 1998).

A resistência à penetração variou positivamente com a D_s e negativamente com o conteúdo de água (Tabela 5), conforme constatado por Silva et al. (1994); Tormena et al. (1998); Imhoff et al. (2000); Imhoff et al. (2001); Blainsky et al. (2008); Vaz et al. (2011). A influência da diminuição da umidade no aumento nos valores de RP está associada à redução

da película de água sobre as partículas individuais do solo e ao aumento na magnitude das forças de coesão entre as partículas minerais do solo (KEY; ANGERS, 1999; PETEAN et al., 2010) ou com o aumento do “stress efetivo” (GIAROLA et al., 2003). Tal comportamento é ainda mais evidente quando há incremento nos valores de D_s , que aumenta a fricção e coesão entre as partículas e/ou agregados ocasionando maiores valores de RP (VEPRASKAS, 1984).

Tabela 5. Modelos de regressão para as curvas de retenção de água e resistência do solo, com transformações logarítmicas e respectivos coeficientes de determinação (r^2).

Áreas	Modelos de regressão	r^2
Curva de Retenção de Água (CRA)		
10cm		
Mata	$\ln \theta = -2,05617 + 0,07845 D_s - 0,17611 \ln \psi$	0,88
Pastagem	$\ln \theta = -3,48879 + 1,08317 D_s - 0,10049 \ln \psi$	0,91
30 cm		
Mata	$\ln \theta = -2,78224 + 0,60178 D_s - 0,13592 \ln \psi$	0,82
Pastagem	$\ln \theta = -2,13426 + 0,22574 D_s - 0,10294 \ln \psi$	0,83
Curva de Resistência do Solo (CRS)		
10 cm		
Mata	$\ln RP = 0,00343 - 2,71689 \ln \theta + 5,28205 \ln D_s$	0,54
Pastagem	$\ln RP = 0,00303 - 2,30273 \ln \theta + 7,26962 \ln D_s$	0,71
30 cm		
Mata	$\ln RP = 0,03871 - 1,50224 \ln \theta + 4,31441 \ln D_s$	0,86
Pastagem	$\ln RP = 0,00343 - 2,71689 \ln \theta + 5,28205 \ln D_s$	0,72

θ : umidade do solo ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); D_s : densidade do solo (Mg m^{-3}); ψ : potencial mátrico (MPa); RP: resistência do solo à penetração (MPa).

Houve aumento na retenção de água nos potenciais mátricos referentes à capacidade de campo, à medida que os valores de D_s aumentaram (Figura 4), o mesmo comportamento foi observado por Silva et al. (1994), Tormena et al. (1998) e Tormena et al. (1999). O aumento da D_s afeta a macroporosidade, pois, há diminuição do diâmetro dos poros entre os agregados, que atuam no aumento da retenção de água em menores potenciais mátricos (HILL et al., 1985).

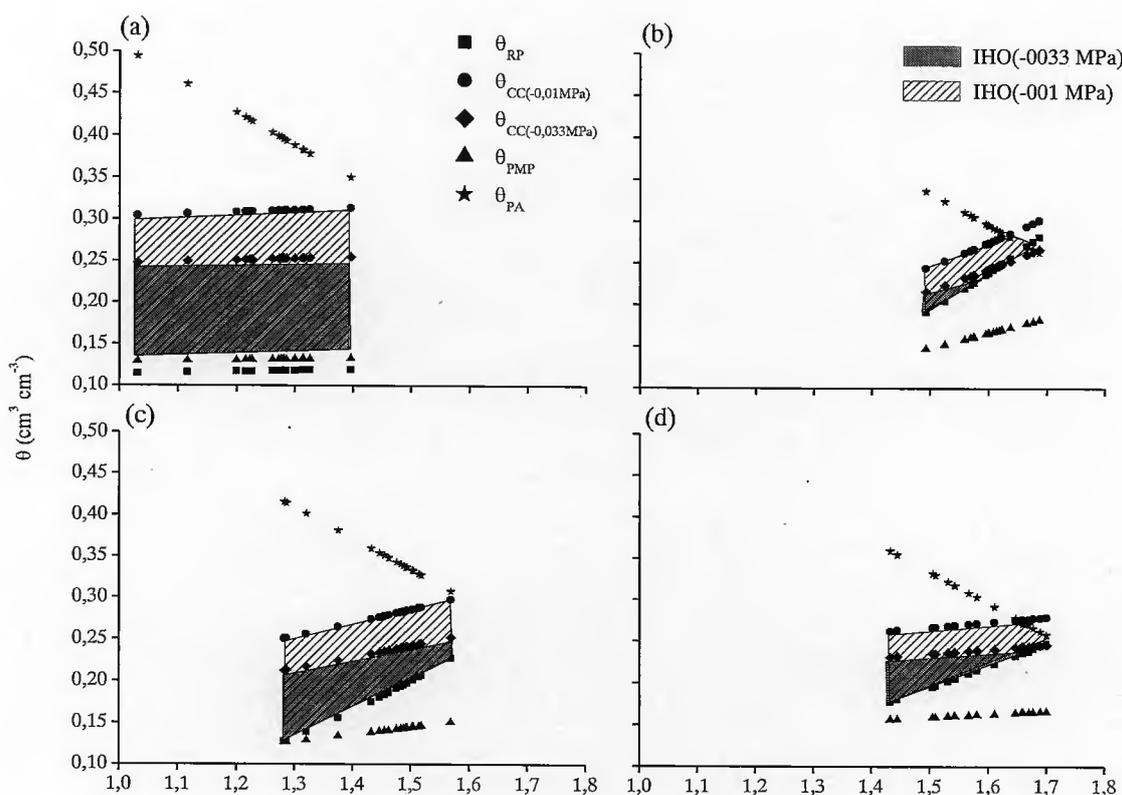


Figura 4. Variação do conteúdo de água em função da densidade do solo nos níveis críticos da capacidade de campo ($\psi = -0,01\text{MPa}$ e $-0,033\text{MPa}$), ponto de murcha permanente ($\psi = -1,5\text{MPa}$), porosidade de aeração $\leq 10\%$ e resistência à penetração de 2,5 MPa em área sob mata (a) e pastagem (b) à 10 cm e mata (c) e pastagem (d) a 30 cm de profundidade. A área hachurada é referente ao IHO considerando a $\theta_{CC}(-0,01\text{ MPa})$ e a área sólida é referente ao IHO considerando a $\theta_{CC}(-0,033\text{ MPa})$.

O maior valor de D_s observado na mata ($1,40\text{ Mg m}^{-3}$) é próximo do menor valor observado no solo sob pastagem ($1,49\text{ Mg m}^{-3}$), ambos em superfície. Nesses pontos a RP torna-se restritiva em maiores conteúdos de água na área sob pastagem, indicando que os maiores valores de D_s , obtidos em decorrência dos efeitos do uso causaram maior influência na RP no solo cultivado (Figura 4a). Estes resultados estão de acordo com Araújo et al. (2004).

Na área sob mata em superfície, o IHO teve como limite superior e inferior os valores de umidade na capacidade de campo ($\psi -0,01$ e $-0,033\text{ MPa}$) e no ponto de murcha permanente, respectivamente, em toda a variação de D_s (Figura 4a). Tais resultados combinados com o valor de *índice-S* acima de 0,035, confirmam que solos sob vegetação natural apresentam condições físicas desejáveis ao desenvolvimento de plantas.

Na área sob pastagem em mesma profundidade, o limite inferior foi atribuído à θ_{RP} , em toda a variação de D_s , indicando que área apresenta limitações ao crescimento radicular, principalmente, em baixos conteúdos de água (Figura 4b). Desse modo, deve-se tomar

maiores precauções quanto ao manejo do solo, afim de, minimizar os efeitos causados pela compactação. Vários autores constataram que a umidade em que a RP torna-se restritiva freqüentemente limita o IHO (SILVA et al., 1994; LEÃO et al., 2006; FIDALSKI et al., 2010; PETEAN et al., 2010).

A Ds de $1,62 \text{ Mg m}^{-3}$ na área de pastagem a 10 cm de profundidade, estabelece o limite em que a θ_{PA} substitui $\theta_{CC(-0,01\text{MPa})}$ no limite superior do IHO (Figura 4b), indicando que a partir deste valor de Ds a difusão de oxigênio torna as condições físicas indesejáveis ao desenvolvimento das plantas, e a partir da Ds de $1,67 \text{ Mg m}^{-3}$ o IHO foi igual a zero, indicando a densidade do solo crítica (Dsc). A influência do IHO igual a zero para o crescimento e desenvolvimento de plantas é difícil de ser prevista, considerando que quando submetidas às condições de estresses, as plantas promovem adaptações quanto a sua dinâmica morfológica e fisiológica (LEÃO et al., 2006).

Na profundidade de 30 cm, as áreas amostradas apresentaram limitações quanto à θ_{RP} em toda a variação de Ds. A $\theta_{PA} \leq 10\%$ não foi restritiva na área sob mata, enquanto que, sob pastagem a θ_{PA} substituiu a $\theta_{CC(-0,01 \text{ MPa})}$ como limite superior a partir da Ds de $1,66 \text{ Mg m}^{-3}$ (Figura 4c e d).

Com exceção à área sob mata, a 10 cm de profundidade, o limite inferior de água disponível referente ao ponto de murcha permanente apresentou pouca influência na determinação da disponibilidade de água no solo, pois, foi substituído pelo conteúdo de água em que a RP torna-se restritiva em toda a variação da Ds (Figura 4).

A θ_{CC} atuou como limite superior do IHO ($-0,033\text{MPa}$) em todas as áreas e profundidades avaliadas, portanto, a diferença entre água disponível e IHO está relacionada as limitações impostas pela resistência que a matriz do solo oferece ao desenvolvimento radicular. Resultados semelhantes foram obtidos por Aszargadeh et al. (2010) ao estudar o IHO considerando a θ_{CC} no potencial mátrico de $-0,033\text{MPa}$.

As variações do IHO em função da densidade do solo são apresentadas na figura 5, considerando a θ_{CC} no potencial mátrico de $-0,01$ e $-0,033 \text{ MPa}$. A utilização de $-0,033 \text{ MPa}$ como potencial mátrico referente à capacidade de campo, reduziu o IHO e o tornou praticamente inexistente na área sob pastagem a 10 cm de profundidade (Figura 5c). Desse modo, torna-se mais adequada, nesse estudo, a utilização da θ_{CC} referente ao potencial mátrico de $-0,01 \text{ MPa}$. Resultados semelhantes foram obtidos por Silva et al. (2011).

O sistema de pastagem causou a redução do IHO principalmente a 10 cm de profundidade, atingindo o valor zero, principalmente pela restrição causada pela RP em menores conteúdos de água, tal fato, pode ocasionar perdas na produção vegetal e animal.

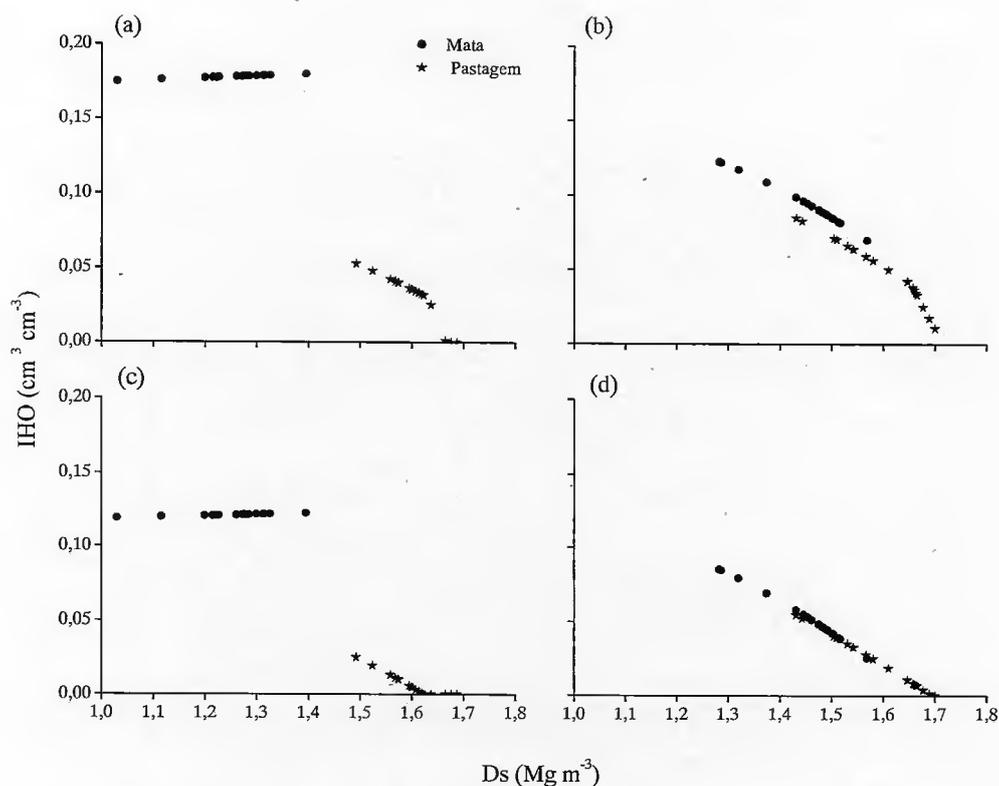


Figura 5. Variação do intervalo hídrico ótimo (IHO) em função da densidade do solo (D_s) em área sob mata e pastagem a 10 cm (a) e a 30 cm de profundidade (b), considerando a θ_{CC} (-0,01 MPa) e em área sob mata e pastagem a 10 cm (c) e a 30 cm de profundidade (d), considerando a θ_{CC} (-0,033 MPa).

Considerando a relação entre D_s e *índice-S* (figura 3), observou-se que para a D_{sc} de $1,67 \text{ Mg m}^{-3}$, definida onde o $IHO_{(\theta_{-0,01 \text{ MPa}})}$ é igual a zero, na área sob pastagem a 10 cm de profundidade, o valor do *índice-S* correspondente foi de 0,019, estando próximo do valor de 0,02, indicado por Dexter (2004 a,b) para solos em que não há crescimento radicular.

Observou-se relação linear significativa ($p\text{-valor} < 0,05$) entre IHO e *índice-S* (Figura 6), indicando a possibilidade de utilização do *índice-S* em avaliar a disponibilidade de água no solo. Estes resultados estão de acordo com Asgarsadeh et al. (2010) que também observaram relação significativa entre *índice-S* e $IHO_{(-0,01 \text{ e } -0,033 \text{ MPa})}$, em doze solos agrícolas no Iran.

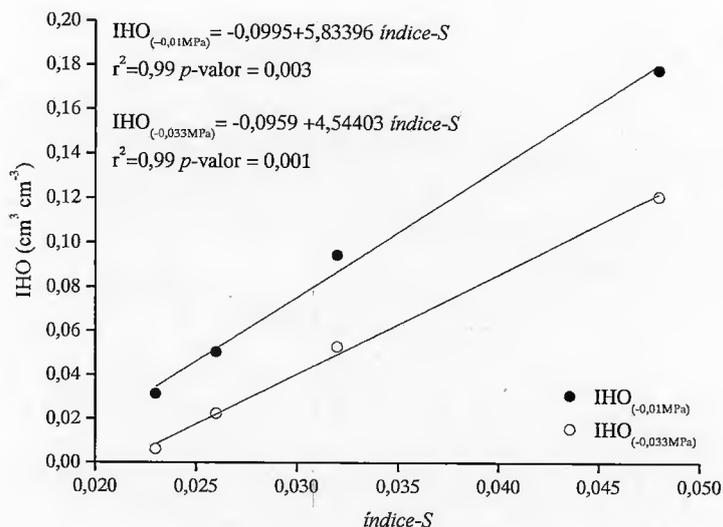


Figura 6. Relação entre intervalo hídrico ótimo, considerando θ_{cc} no potencial mátrico de -0,01 e -0,033MPa, e *índice-S* nas áreas de mata e pastagem a 10 e 30 cm de profundidade.

Menores valores de IHO determinam a redução da qualidade física do solo, expondo as plantas a condições físicas inadequadas ao seu crescimento. Estes resultados indicam que as alterações promovidas pelo sistema de pastagem, através das limitações pelo conteúdo de água na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente, porosidade de aeração e resistência à penetração impõe restrições ao crescimento das plantas, quando comparado com o solo sob condições naturais, principalmente na camada superficial.

2.4 CONCLUSÃO

O sistema de pastagem alterou, a níveis críticos, a qualidade física do solo quando comparado com o solo sob mata, principalmente na camada superficial, sendo o *índice-S* e o IHO medidas sensíveis às alterações estruturais promovidas pelos efeitos de uso e manejo do solo.

REFERÊNCIAS

ARAUJO, 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**, v.28, nº 2, p.337-345, 2004.

ARCHER, J.R.; SMITH, P.D. The relation between bulk density, available water capacity and air capacity of soils. **Journal of Soil Science**, v.23, p.475-480, 1972.

ASGARZADEH, H., MOSADDEGHI, M.R., MAHBOUBI, A.A., NORASTI, A., DEXTER, A.R. Soil water availability for plants as quantified by conventional available water, least limiting water range and integral water capacity. **Plant and Soil** v.335, p.229-244, 2010.

AZENEGASHE, O.A.; ALLEN, V.; FONTENOT, J. Grazing sheep and cattle together or separately: Effect on soil and plants. **Agronomy Journal**, v.89, p.380-386, 1997.

BLAINSKI, E; TORMENA, C. T.; FIDALSKI, J.; GUIMARÃES, R. M. L. Quantificação da degradação física do solo por meio da curva de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.975-983, 2008.

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. 2 ed. Madison: SSSA. Part 1: Physical and mineralogical methods, 1986, p.363-375.

BREWER, R.; SLEEMAN, J.R. Soil structure: attempts at its quantitative characterization. **Journal of Soil Science**, v.11 p.172-185, 1960.

BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. **American Society of Agricultural Engineers**, v.33, p.519-524, 1990.

CENTURION, J. F.; ANDRIOLI, I. Regime hídrico de alguns solos de Jaboticabal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.701-709, 2000.

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

DEXTER A.R. Soil physical quality: Part III. Unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-theory. **Geoderma**, v.120, p.227-239, 2004b.

DEXTER, A.R. Advances in characterization of soil structure. **Soil & Tillage Research**, v.11, p.199-238, 1988.

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

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Manual de Métodos de Análise de solo**. Rio de Janeiro, 1979. 247p.

FEDDEMA, J.J. Estimated impacts of soil degradation on the african water balance and climate. *Climate Res.*, 10:127-141, 1998.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. Least limiting water range and physical quality of soil under groundcover management systems in citrus. *Scientia Agricola*. v.67, n.4, p.448-453, 2010.

GIAROLA, N.F.B.; SILVA, A. P.; IMHOFF, S. & DEXTER, A.R. Contribution of natural soil compaction on hardsetting behavior. *Geoderma*, 113:95-108, 2003.

GIAROLA, N.F.B.; TORMENA, C.S.; DUTRA, A. C. Degradação física de um latossolo vermelho utilizado para produção intensiva de forragem. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.31, p.863-873, 2007.

GODEFROY, J.; JACQUIN, F. Relation entre la stabilité structurale des sols cultivés et le apports organiques en conditions tropicales;comparasion avec les sols forestiers. *Fruits*, v.30, p.595-612, 1975.

GRABLE, A.R.; SIEMER, E.G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corns roots. *Soil Science Society of America Proceedings*. v.32, p.180-186, 1968.

GREENWOOD, K. L.; MCKENZIE, B. M. Grazing effects on soil physical properties and the consequences for pastures: a review. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, v.41, p.1231- 1250, 2001.

HAISE, H.R., HAAS, H.J., JENSEN, L.R. Soil moisture studies of some Great Plain soils: II. Field capacity as related to 1/3-atmosphere percentage and "minimum point" as related to 15- and 26-atmosphere percentages. *Soil Science Society of America Proceedings*. v.34, p.20-25, 1955.

HILL, R.L.; HORTON, R.; CRUSE, M.R. Tillage effects on soil water retention and pore size distribution of two Mollisols. *Soil Science Society of America Journal*, v.49, p.1264-1270, 1985.

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

IMHOFF, S.; SILVA, A. P.; TORMENA, C. A. Aplicação da curva de resistência do solo à penetração no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.35, p.1493-1500, 2000.

IMHOFF, S.; DA SILVA, A.P.; DIAS JÚNIOR, M.S.; TORMENA, C.A. Quantificação de pressões críticas para o crescimento de plantas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.25, p.11-18, 2001.

ISLAM, K.R.; WEIL, R.R. Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v.79, p.9-19, 2000.

KATOU, H., MIYAJI, K., KUBOTA, T. Susceptibility of undisturbed soils to compression as evaluated from the changes in the soil water characteristic curves. **Soil Science & Plant Nutrition**, v.33, n°4 p.539–554, 1987.

KAY, B.D. Rates of changes of soil structure under different cropping systems. **Advances in Soil Science**, v.12, p.1-51, 1989.

KAY, B.D.; ANGERS, D.A. Soil structure. In: A. SUMNER, M.E., ed. **Handbook of Soil Science**. Boca Raton, CRC Press, 1999, p.229-276.

KLEIN, V.A.; LIBARDI, P.L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.26, p.857-867, 2002.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Part 1: Physical and mineralogical methods. 2. ed. Madison: ASA-SSSA, 1986, p.635-660.

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 Ciência do Solo**, v.28, p.415-423, 2004.

LEÃO, T.P.; SILVA, A.P.; MACEDO, M.C.M.; IMHOFF, S.; EUCLIDES, V.P.B. Least limiting water range: A potential indicator of changes in near-surface soil physical quality after the conversion of Brazilian Savanna into pasture. **Soil & Tillage Research**, v.88, p. 279–285, 2006.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Advances in Soil Science**, v.1, p.277-294, 1985.

LI, L.; YIN CHAN, K.; NIU, Y.; LI, G.; OATES, A.; DEXTER, A.; HUANG, G. Soil physical qualities in an Oxic Paleustalf under different tillage and stubble management practices and application of S theory. **Soil & Tillage Research** v.113, p. 82–88, 2011.

LIMA, C. L. R.; SILVA, A. P.da; IMHOFF, S.; LEÃO, T. P. Estimativa da capacidade de suporte de carga do solo a partir da avaliação da resistência à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.217-223, 2006.

OLIBONE, D.; ENCIDE-OLIBONE, A. P.; ROSOLEM C. A. Least limiting water range and crop yields as affected by crop rotations and tillage. **Soil Use and Management**, v.26, p.485-493, 2010.

PEREIRA, F. de S.; ANDRIOLI, I.; PEREIRA, F. de S.; OLIVEIRA, P.R. de; CENTURION, J. F.; FALQUETO, R. J.; MARTINS, A.L. da S. Qualidade física de um latossolo vermelho submetido a sistemas de manejo avaliado pelo índice-S. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p. 87-95, 2011.

PETEAN, L. P.; TORMENA, C.A.; ALVES, S. J. Intervalo hídrico ótimo de um latossolo vermelho distroférico sob plantio direto em sistema de integração lavoura-pecuária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.1515-1526, 2010.

PROFFITT A. P. B.; BENDOTTI S.; HOWELL M. R., EASTHAM J. The effect of sheep trampling and grazing on soil physical properties and pasture growth for a red brown earth. **Australian Journal of Agricultural Research**, v.44, p.317-331, 1993.

RICHARD, G., COUSIN, I., SILLON, J.F., BRUAND, A., GUÉRIF, J. Effect of compaction on the porosity of a silty soil: influence on unsaturated hydraulic properties. **European Journal of Soil Science**. v.52, p.49-58, 2001.

RICHARDS, L.A., WEAVER, L.R. Fifteen atmosphere percentage as related to the permanent wilting point. **Soil Science**, v.56, p. 331-339, 1944

RODRIGUES, T.E.; VALENTE, M.A.; GAMA, J.R.N.F.; OLIVEIRA JUNIOR, R.C. de; SANTOS, P.L. dos; SILVA, J.L. da. Zoneamento Agroecológico do município de Paragominas, Estado do Pará. **Boletim-Técnico Belém: Embrapa Amazônia Oriental**, p.64, 2002.

SILVA, A.P.; KAY, B.D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, v.58, p.1775-1781, 1994.

SILVA, A.P.; KAY, B.D. Estimating the least limiting water range of soils from properties and management. **Soil Science Society of America Journal**, v.61, p.877-883, 1997.

SILVA, G.L.; LIMA, H.V.; CAMPANHA, M.M.; GILKES, R.J.; OLIVEIRA, T.S. Soil physical quality of Luvisols under agroforestry, natural vegetation and conventional crop management systems in the Brazilian semi-arid region. **Geoderma** v.167, p. 61-70, 2011.

STRECK, C.A.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; HORN, R. Relações do parâmetro S para algumas propriedades físicas de solos do Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2603-2612, 2008, Número Especial.

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

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

TORMENA, C.A.; DA SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. **Soil & Tillage Research**, v.52, p.223-232, 1999.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; IMHOFF, S.D.C.; DEXTER, A.R., Quantification of the soil physical quality of a tropical Oxisol using the S index, **Scientia Agricola**, v. 65, p. 56-60, 2008.

van GENUCHTEN; M.TH. A Closed-Form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.44, p.892-897, 1980.

van HAVEREN, B. B. Soil bulk density as influenced by grazing intensity and soil type on a shortgrass prairie site. **J. Range Manage.** v.36, p.586-588, 1983.

VAZ, C.M.P.; MANIERI, J.M.; C. de MARIA, I.; TULLER, M. Modeling and correction of soil penetration resistance for varying soil water content. **Geoderma**, v.166, p. 92–101, 2011.

VEPRASKAS, M.J. Cone index of loamy sands as influenced by pore size distribution and effective stress. **Soil Science Society of America Journal**, v.48, p.1220-1225, 1984.

VIEHMEYER, F.J.; HENDRICKSON, A.H. Soil moisture conditions in relation to plant growth. **Plant Physiol**, v.2, p.71- 78, 1927.

WILLATT, S.T.; PULLAR, D.M. Changes in soil physical properties under grazed pastures. **Australian Journal of Agricultural Research**, v.22, p.343-348, 1983.

WU, L.; FENG, G.; LETEY, J.; FERGUSON, L.; MITCHELL, J.; MCCULLOUGH-SANDEN, B.; MARKEGARD, G. Soil management effects on the non limiting water range. **Geoderma**, v.114, p.401-414, 2003.