

CAMILA BRASIL DIAS

**PROPRIEDADES FÍSICAS E INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO DE UM
LATOSSOLO AMARELO COESO SOB DIFERENTES USOS NO
ECOSSISTEMA TABULEIRO COSTEIRO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de Magister Scientiae.

**VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2012**

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

D541p
2012

Dias, Camila Brasil, 1984-

Propriedades físicas e intervalo hídrico ótimo de um latossolo amarelo coeso sob diferentes usos no ecossistema tabuleiro costeiro / Camila Brasil Dias. – Viçosa, MG, 2012. viii, 42f. : il. (algumas color.) ; 29cm.

Orientador: Genelício Crusoé Rocha

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 35-42

1. Física do solo. 2. Solos - Umidade. 3. Solo- Uso. 4. Solos - Classificação. 5. Solos - Análise. 6. Solos - Composição.

7. Solos - Potencial matricial. 8. Estrutura do solo.

I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Solos. Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas. II. Título.

CDD 22. ed. 631.43

CAMILA BRASIL DIAS

**PROPRIEDADES FÍSICAS E INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO DE UM
LATOSSOLO AMARELO COESO SOB DIFERENTES USOS NO
ECOSSISTEMA TABULEIRO COSTEIRO**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa, como
parte das exigências do Programa de
Pós-Graduação em Solos e Nutrição de
Plantas, para obtenção do título de
Magister Scientiae.

APROVADA: 10 de dezembro de 2012

Prof. Igor Rodrigues de Assis
(Coorientador)

Prof. Teógenes Senna de Oliveira

Prof. Paulo José Hamakawa

Prof. Genelício Crusoé Rocha
(Orientador)

*A meus pais Carlos Orlando dos Santos Dias e Jucelia Brasil Dias
As minhas irmãs Kaliane Brasil Dias e Katiane Brasil Dias
A minha sobrinha Maria Vitória Brasil Oliveira
Aos meus avós Antônio Nunes e Jozelita Dias
Dedico.*

AGRADECIMENTOS

A Deus por minha vida, família e grandes amigos.

Aos meus pais, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

As minhas irmãs e minha sobrinha pelo carinho dedicado.

Aos tios, tias, primos e primas das famílias Brasil e Dias.

A Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de fazer o curso.

Ao professor Genelício Crusoé Rocha pela orientação, apoio e confiança.

Aos coorientadores Igor Rodrigues de Assis e Raphael Bragança Alves Fernandes pelas valiosas sugestões.

Aos estimados professores da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB) pelo estímulo e por participarem da minha formação profissional. Sempre recordarei das valiosas lições ensinadas.

À equipe do laboratório de Física do Solo, professores e funcionários do Departamento de Solos da UFV, pela confiança, respeito e oportunidade.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudo.

As amigas Ana Carolina e Poliana (estudantes da UFRB), pela ajuda nas análises laboratoriais; ao funcionário da UFRB, Erivaldo Silva, e aos amigos, Alan Ribeiro, Sandro Souza, Marivaldo, meu tio Edmilson e toda equipe do grande amigo e professor Luciano Souza pela ajuda na abertura das trincheiras e coletas de amostras de solo. Quão prazeroso foi trabalhar com vocês! Obrigada pela amizade.

RESUMO

DIAS, Camila Brasil, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2012. **Propriedades físicas e intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Amarelo coeso sob diferentes usos no ecossistema tabuleiro costeiro.** Orientador: Genelício Crusoé Rocha. Coorientadores: Luciano da Silva Souza, Igor Rodrigues de Assis e Raphael Bragança Alves Fernandes.

O objetivo deste trabalho foi avaliar alguns atributos físicos e determinar o intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Amarelo Distrófico coeso dos Tabuleiros Costeiros do Recôncavo da Bahia submetido a diferentes usos e manejo do solo. Foram coletadas 40 amostras de solo com estrutura indeformada, nos horizontes A/Ap e AB coeso em cada um dos três usos do solo: mata nativa (Mata Atlântica), pastagem degradada de *Brachiaria decumbens* e cana-de-açúcar (após 3 anos de subsolagem), localizadas no Campus da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia em Cruz das Almas-BA. Avaliaram-se a porosidade, a densidade do solo, a curva de retenção de água do solo, a resistência à penetração em função do potencial matricial da água no solo e o intervalo hídrico ótimo. Os resultados indicaram que a resistência do solo à penetração foi influenciada positivamente pela densidade e negativamente pela umidade do solo, com maior magnitude no horizonte AB, e principalmente, no solo sob pastagem. A porosidade total e a macroporosidade da mata foram semelhantes a da cana (subsolagem), mas diferem da pastagem. Considerando a mata como referência, pode-se inferir que o manejo da pastagem diminuiu a porosidade total e a macroporosidade, enquanto no caso da cana isso não aconteceu, ou seja, o manejo utilizado no cultivo da cana (subsolagem) além de tornar os horizontes Ap e AB mais parecidos fisicamente, fez com que os valores se aproximassem aos do solo sob mata. A retenção de água no solo sob mata e sob cana-de-açúcar foi maior no horizonte AB, um pouco mais argiloso que o horizonte A, entretanto, no solo sob pastagem ocorreu o inverso. O intervalo hídrico ótimo no horizonte A da mata e Ap na cana-de-açúcar foram semelhantes, e ambos maiores que na pastagem. Já no horizonte AB, o IHO para a cana-de-açúcar foi maior que para a mata, e esta maior que para a pastagem. Os horizontes A/Ap apresentaram maiores valores de densidade crítica em relação ao horizonte AB para todos os usos avaliados. O uso que mais apresentou valores de

iv

densidade do solo maiores que a densidade crítica foi a pastagem. Em solos coesos o controle da qualidade física é dependente da conservação da água ao longo do perfil, e a redução da RP por métodos que incrementem a macroporosidade via redução da D_s é uma alternativa para manter a RP em níveis não impeditivos às plantas.

ABSTRACT

DIAS, Camila Brasil, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, December, 2012. **Physical properties and limiting water range from a cohesive Oxisol under different land uses in the Coastal Plain ecosystem.** Adviser: Genelicio Crusoe Rocha. Co-advisers: Luciano da Silva Souza, Igor Rodrigues de Assis and Raphael Braganca Alves Fernandes.

The aim of this study was to evaluate some physical attributes and determine the last limiting water range in a cohesive dystrophic Oxisol of the Coastal Plains of the Reconcavo of Bahia subjected to different uses and soil management. We collected 40 samples of undisturbed soil in horizons A / Ap and AB cohesive in each of the three land uses: native forest (Mata Atlantica), degraded pasture of *Brachiaria decumbens* and cane sugar (after 3 years subsoiling), located on the campus of the Federal University of Reconcavo of the Bahia, in Cruz das Almas city, Bahia. Evaluations of porosity, density, soil water retention curve, soil penetration resistance as a function of matric potential of soil water and last limiting water range. The results indicated that the resistance to penetration was affected by the density positively and negatively by soil moisture, with greater magnitude in the AB horizon, and mainly in pasture soil. The total porosity and macroporosity of the forest were similar to sugarcane (subsoiling), but differ pasture. Considering the forest as a reference, it can be inferred that the management of pasture decreased the total porosity and macroporosity, while in the case of sugar cane that has not happened, i.e., the management used in the cultivation of sugarcane (subsoiling) besides making the Ap horizons AB and more alike physically, caused the values were close to the soil under forest. Water retention in soil under forest and under sugar cane was higher in AB horizon, slightly more clay than the horizon, however, the pasture soil the opposite happened. The least limiting water range in the A horizon of the forest and the Rev. sugar cane were similar, and both were greater than in the horizon pastagem. In the AB, the IHO for sugar cane was higher than for the forest, and this greater than for grazing. The Horizons / Ap showed higher critical density relative to the horizon AB for all uses evaluated. Use that showed values of bulk density greater than the critical density was grazing. In cohesive soils control the physical quality is

dependent on water conservation along the profile, and reduced by RP methods that increase macroporosity via reduction of D_s is an alternative to keep the RP at levels that do not impede the plants.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	5
2.1 – Localização e descrição das áreas experimentais	5
2.2. Amostragem e caracterização do solo	5
2.3 Análises físico-hídricas do solo	7
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	11
3.1. Densidade do Solo	11
3.2. Porosidade Total, Micro e Macroporosidade	13
3.3 Resistência mecânica do solo à penetração	15
3.4 Umidade volumétrica em que a RP atinge o limite crítico (UvRPc).....	20
3.5 Retenção da água no solo.....	21
3.6 Capacidade de água disponível (CAD)	24
3.7 Intervalo Hídrico Ótimo (IHO).....	24
3.7.1 Horizonte A (mata) e Ap (solos cultivados)	24
3.7.2 Horizonte AB	27
3.7.3 Densidade Crítica (Dsc)	32
4. CONCLUSÕES	34
REFERÊNCIAS.....	35

1. INTRODUÇÃO

Os Tabuleiros Costeiros são formações terciárias que se distribuem por quase toda a faixa costeira do Brasil, desde o Estado do Amapá até o Rio de Janeiro, cujos solos apesar de profundos e situados em relevo plano, apresentam limitações à produção vegetal (SOUZA, 1996; MELO FILHO et al. 2004; SOUZA, 2005). Estima-se que, no Brasil, as áreas de Tabuleiros abrangem 20 milhões de hectares, sendo que, destes, nove a dez milhões encontram-se na Região Nordeste, constituindo a principal base de sustentação agrícola dos estados e capitais da costa oriental do Brasil (SOUZA, 2005).

A ocupação dos tabuleiros é muito dependente das precipitações pluviais, sendo que na zona mais úmida há predomínio da cana-de-açúcar e na zona mais seca de pecuária extensiva a semi-intensiva, onde as atividades agrícolas são em médias e pequenas propriedades. A agricultura é diversificada, podendo encontrar cultivos de subsistência, fruteiras e essências florestais, sendo que essas espécies geralmente apresentam baixo vigor vegetativo e baixas produtividades comparado aos mesmos cultivos realizados em outras unidades da paisagem, indicando uma relação fortemente influenciada pela baixa fertilidade natural, acidez elevada e pela estrutura dominante dos horizontes coesos. Estes fatores ressaltam a importância do estudo desses solos, para a melhoria das condições agrícolas e das populações que sobre eles residem.

Os solos dos Tabuleiros Costeiros, geralmente, apresentam-se com uma camada coesa de origem pedogenética, com profundidade oscilando entre 0,10 m e 0,60 m. Em áreas cultivadas, devido à perda de solo, é comum, a camada coesa estar menos profunda que em áreas de mata nativa (JACOMINE, 1996). O efeito da coesão prejudica o espaço poroso do solo e, conseqüentemente, a dinâmica do ar, da água e dos nutrientes, a temperatura do meio, os microrganismos aeróbicos e o crescimento e desenvolvimento do sistema radicular das plantas, com reflexos negativos na produção agrícola.

Nessa grande unidade de paisagem, os principais solos (Latosolos Amarelos coesos e Argissolos Amarelos coesos) caracterizam-se como profundos, ácidos, com baixa capacidade de troca catiônica e apresentam frequentemente horizontes coesos (duros) (REZENDE, 2000). A origem dos horizontes coesos ainda é assunto polêmico, podendo estar associada a vários processos simultâneos tais como: agrupamento de partículas de argila face a face; perda do plasma argiloso da camada superficial para as subjacentes (argiluviação); presença de compostos orgânicos pouco polimerizados; presença de sílica secundária, ferro e alumínio dispersos nos microporos; adensamento resultante da alteração da estrutura do solo pela alternância do ciclo de umedecimento e secagem e contribuição da areia fina (ARAÚJO FILHO et al., 2001; REZENDE et al, 2002).

Corrêa et al. (2008) sugeriram que a gênese de horizontes coesos deve-se ao maior conteúdo de argila muito fina ($< 0,2 \mu\text{m}$), translocada entre os horizontes ou dentro do mesmo horizonte na forma de argila dispersa. Já Moreau (2006) obteve as mesmas conclusões apresentadas por Corrêa et al. (2008) para explicar a formação de horizontes coesos de Argissolos, localizados em platôs mais amplos e menos dissecados, não dando ênfase ao tamanho da argila. Recentemente, Lima Neto et al. (2010) sugerem que a gênese do caráter coeso apresenta duas fases distintas, sendo formado inicialmente pelo entupimento dos poros decorrente da iluviação de argila fina, havendo posteriormente uma perda de Fe na parte superior, que colapsa a estrutura e provoca um ajuste face a face da caulinita.

A presença das camadas coesas nos solos dos Tabuleiros Costeiros atua como contraponto a algumas das principais potencialidades dessa unidade de paisagem, por exemplo, grande profundidade e topografia plana a suave ondulada. Por estarem, em geral, situadas próximas à superfície, essas camadas coesas, promovem redução na profundidade efetiva do solo, com reflexo direto na configuração do sistema radicular. Entre as práticas utilizadas para aumentar a profundidade efetiva dos solos dos tabuleiros com horizontes coesos encontram-se a subsolagem (mecânica), o plantio de leguminosas com alto poder de penetração de raízes objetivando a formação de bioporos

(biológica) e a associação dessas duas práticas que, em geral, tem-se mostrado a mais efetiva (CINTRA et al., 2006).

Ao se considerar as limitações agrícolas dos solos Coesos dos Tabuleiros Costeiros, qualquer interferência de uso e manejo em tais solos no sentido de aumentar a produtividade das culturas deverá passar necessariamente pela melhoria da qualidade física do solo e das condições químicas.

A qualidade física do solo para o crescimento das plantas é determinada não só pela disponibilidade de água, aeração e temperatura, mas também pela resistência que a matriz do solo oferece à penetração das raízes (HAMBLIN, 1985; LETEY, 1985). Num solo degradado, além da redução da quantidade de água disponível, a taxa de difusão de oxigênio e a resistência do solo à penetração podem limitar o crescimento das plantas na faixa de potenciais que determina a disponibilidade de água no solo (ARAUJO et al. 2004). Desta maneira, a caracterização dos efeitos dos sistemas de uso e manejo sobre a degradação da qualidade física do solo é mais bem quantificada por medidas integradoras destas modificações.

Vários atributos podem ser utilizados para caracterizar e qualificar a estrutura do solo, mas a resposta das plantas dependerá da interação entre eles (REICHERT., 2003). Deste modo, torna-se difícil estabelecer de maneira isolada o efeito desses atributos sobre o crescimento das plantas. Com o objetivo de integrar as principais propriedades físicas do solo determinantes do crescimento das plantas, Silva et al. (1994) propuseram o intervalo hídrico ótimo (IHO) do solo, baseado nos pressupostos de Letey (1985), como um índice para avaliar a qualidade física do solo.

Neste contexto, o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) incorpora num único dado à amplitude de água do solo em que são mínimas as limitações ao desenvolvimento de plantas associadas à disponibilidade de água, aeração e resistência do solo à penetração. O IHO integra as propriedades físicas do solo que diretamente influenciam o desenvolvimento das culturas. Estas inter-relações dependem da condição estrutural do solo e, portanto, do grau de degradação da estrutura a que o solo está submetido. Assim, o IHO é utilizado

como indicador da qualidade física e estrutural do solo, como proposto por Silva et al.(1994).

De acordo com Kaiser et al. (2009) o IHO pode ser considerado um “semáforo” da qualidade estrutural do solo. As condições de umidade ideais, para o desenvolvimento e crescimento das plantas, ocorrem entre os limites superior e inferior do IHO. As condições são limitantes quando situam-se acima ou abaixo dos limites do IHO, e críticas ao crescimento das plantas quando a densidade do solo estiver acima da densidade onde o IHO é nulo (SILVA & KAY, 1996, 1997; COLLARES et al. 2006). A densidade crítica obtida por meio do IHO auxilia na tomada de decisões diante das condições de manejo adotadas ou a serem adotadas em determinado solo.

Os impactos do uso e manejo na qualidade física do solo têm sido quantificados, utilizando diferentes propriedades físicas relacionadas com a forma e com a estabilidade estrutural do solo, tais como: densidade do solo (DE MARIA et al., 1999; STONE & SILVEIRA, 2001; ARAUJO et al., 2004), porosidade do solo (BEUTLER et al., 2001; OLIVEIRA et al., 2001; ARAUJO et al., 2004) e resistência do solo à penetração das raízes (TORMENA & ROLOFF, 1996; BEUTLER et al., 2001; ARAUJO et al., 2004).

Os valores médios de propriedades, como densidade, água disponível e porosidade do solo, permitem comparar os efeitos dos sistemas de manejo e, por meio das suas magnitudes, inferir a respeito da qualidade física do solo. Por outro lado, a utilização do IHO permite identificar, por meio da quantificação e da integração dos dados relativos à água disponível, as restrições impostas pela degradação estrutural à qualidade física do solo para o crescimento das plantas (ARAUJO et al. 2004).

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar alguns atributos físicos e determinar o IHO de um Latossolo Amarelo coeso dos Tabuleiros Costeiros do Recôncavo da Bahia submetido a diferentes usos e manejo do solo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 – Localização e descrição das áreas experimentais

No *campus* da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), localizado no município de Cruz das Almas, foram selecionadas três áreas, sobre solo coeso típico, submetidas aos seguintes usos e manejos: mata nativa (Mata Atlântica); pastagem de *Brachiaria decumbens* em estado de degradação e cana-de-açúcar, com subsolagem no sulco de plantio. O solo, característico da grande unidade de paisagem Tabuleiros Costeiros (JACOMINE et al., 1975; SILVA et al., 1993;) foi classificado como Latossolo Amarelo Distrófico coeso, relevo plano, textura média, originário do sedimento Grupo Barreiras (EMBRAPA, 1999).

O clima da região é do tipo Aw a Am (tropical quente e úmido), segundo a classificação de Köppen, e apresenta uma precipitação pluviométrica média anual de 1.170 mm, variando entre 900 a 1.300 mm, sendo os meses de março a agosto os mais chuvosos, e setembro a fevereiro os mais secos. A temperatura média anual é de 24,1 °C, evapotranspiração potencial de 1.267 mm anuais, e excedente hídrico em junho, julho e agosto (SEI, 2012).

O cultivo da cana-de-açúcar foi implantado em uma área anteriormente ocupada com pastagem em estado de degradação, pois apresentava perda de vigor, típicos sinais de deficiência de nutrientes, invasão de ervas daninhas, além de elevada resistência à penetração. Com o objetivo de reduzir essa elevada resistência à penetração, a área foi subsolada em agosto de 2009, com subsolador de três hastas distanciadas entre si 0,50 m e com profundidade efetiva de trabalho de aproximadamente 0,45 m. A cana foi plantada no sulco de subsolagem.

2.2. Amostragem e caracterização do solo

Para a avaliação da granulometria, teor de argila dispersa em água, grau de floculação e densidade de partículas, foram coletadas amostras deformadas no perfil do solo em cada uma das áreas estudadas, nos seguintes horizontes: Mata nativa, horizonte A, camada de 0 - 0,25 m; horizonte AB, camada de 0,25

- 0,45 m. Pastagem e cana de açúcar, horizonte Ap, camada de 0 - 0,18 m; horizonte AB, camada de 0,18 - 0,32 m.

Para a avaliação da qualidade estrutural do solo, em cada trincheira, foram retiradas quarenta amostras com estrutura indeformada, na porção central de cada horizonte – totalizando, portanto, 240 amostras coletadas nas três áreas. Para a retirada destas amostras utilizou-se para um amostrador de solos modelo Uhland, cujos cilindros mediam 5 cm de altura e 5 cm de diâmetro. Na área cultivada com cana, a coleta das amostras foi feita nas linhas de plantio, onde foi realizada a subsolagem. Após a coleta, as amostras foram cuidadosamente revestidas com um filme de PVC e acondicionadas em caixa de isopor para serem analisadas no laboratório de física do solo da Universidade Federal de Viçosa.

A caracterização química das amostras coletadas nas três áreas avaliadas foi realizada no Laboratório de Fertilidade da Universidade Federal de Viçosa. Os resultados obtidos encontram-se no Quadro 1.

Quadro 1. Resultados da caracterização química* do Latossolo coeso submetido a diferentes usos.

Uso	Horizonte	pH H ₂ O	P	K	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Al ⁺³	H ⁺ +Al ⁺³	CTC	V	m	P _{rem}
			mg dm ⁻³		-----cmol _c dm ⁻³ -----					-----%-----		mg L ⁻¹
Mata	A	4,39	3,6	82	0,36	0,23	0,88	5,2	6,00	13,3	52,4	38,2
Mata	AB	4,42	1,8	21	0,14	0,00	0,98	3,4	3,59	5,3	83,8	44,1
Pastagem	Ap	5,80	1,2	86	0,58	0,32	0,00	2,4	3,52	31,8	0,0	46,1
Pastagem	AB	5,89	0,4	142	0,47	0,24	0,00	1,9	2,97	36	0,0	46,1
Cana	Ap	4,86	1,8	33	0,33	0,20	0,68	3,9	4,51	13,5	52,7	43,3
Cana	AB	4,80	1,3	27	0,31	0,13	0,88	3,9	4,41	11,6	63,3	37,7

*pH em água, KCl e CaCl₂ - relação 1:2,5; Ca⁺² e Mg⁺² e Al⁺³ - Extrator:KCl, 1 mol L⁻¹; H⁺+Al⁺³ Extrator Acetato de Cálcio 0,5 mol L⁻¹-pH 7,0; CTC (capacidade de troca catiônica), a pH 7,0; V% (índice de saturação por bases); P-rem = fósforo remanescente.

A granulometria foi determinada por peneiramento e pelo método da pipeta, baseado no princípio da velocidade de queda das partículas, conforme a Lei de Stokes, utilizando-se como dispersante químico o hidróxido de sódio a 0,1 mol L⁻¹ (EMBRAPA, 1997, modificado por Ruiz, 2005). Para dispersão física

foi empregada a agitação lenta de 50 rpm por 16 horas em agitador orbital do tipo Wagner .

A argila dispersa em água (ADA) foi determinada seguindo metodologia descrita para análise granulométrica, com agitação lenta, suprimindo-se o uso de dispersante químico (EMBRAPA, 1997).

A densidade de partículas do solo (Dp) foi obtida segundo o método do balão volumétrico, utilizando-se álcool como líquido penetrante (EMBRAPA, 1997).

O grau de flocculação (GF) foi calculado utilizando-se a equação 1, conforme EMBRAPA (1997).

$$GF = (\text{argila} - \text{ADA}) \cdot 100 / \text{argila} \quad (1)$$

Quadro 2. Composição granulométrica, argila dispersa em água (ADA), grau de flocculação (GF), densidade de partículas do solo (Dp) e classe textural de um Latossolo Amarelo Coeso dos Tabuleiros Costeiros do Recôncavo da Bahia submetido à diferentes manejos.

Uso	Horiz.	AG*	AF**	Silte	Argila	ADA	GF	Dp	Classe Textural
		-----g dag ⁻¹ -----					%	kg dm ⁻³	
Mata	A	58,25	18,25	1,73	20,00	4,57	77,15	2,66	Franco argiloarenoso
Mata	AB	55,28	19,91	1,38	23,40	8,86	62,13	2,66	Franco argiloarenoso
Pasto	Ap	59,94	20,32	1,77	17,97	5,78	67,83	2,69	Franco-arenoso
Pasto	AB	51,13	21,33	1,64	25,91	10,31	60,20	2,73	Franco argiloarenoso
Cana	Ap	47,76	17,86	2,67	25,69	8,70	59,35	2,74	Franco argiloarenoso
Cana	AB	44,28	18,52	2,84	29,82	11,25	62,27	2,69	Franco argiloarenoso

*AG = areia grossa; **AF areia fina.

2.3 Análises físicas e físico-hídricas do solo

Após devidamente preparadas, as amostras com estrutura indeformada foram saturadas durante 48 horas por meio da elevação gradual de uma lâmina de água numa bandeja, até atingir cerca de 2/3 da altura da amostra.

A determinação da densidade do solo foi feita em quarenta amostras de solo por horizonte, nas três áreas estudadas, pelo método do anel volumétrico (EMBRAPA, 1997).

A porosidade total (Pt) foi calculada por meio da relação existente entre a densidade do solo (Ds) e a densidade de partículas (Dp), conforme método descrito em EMBRAPA (1997).

A quantificação dos valores de macroporosidade e microporosidade foi obtida submetendo quatro amostras saturadas (por horizonte de cada uso do solo) ao potencial de -6 kPa (EMBRAPA, 1997), utilizando a mesa de tensão. A macroporosidade foi estimada pela diferença entre porosidade total e o conteúdo de água no solo após a aplicação do potencial de -6 kPa. O volume de microporos foi estimado como sendo o conteúdo de água retido no potencial de -6 kPa.

Para fins de cálculo da capacidade de água disponível (CAD) considerou-se como capacidade de campo a umidade do solo correspondente à tensão de -10 kPa e, como ponto de murcha permanente, a umidade do solo correspondente à tensão de -1500 kPa. A capacidade de água disponível (CAD) foi determinada pela diferença entre a umidade à capacidade de campo e no ponto de murcha permanente.

Para obtenção das curvas de retenção de água no solo (CRA), as amostras indeformadas, em quatro repetições, foram submetidas aos seguintes potenciais mátricos: na mesa de tensão, -0,004, -0,006, -0,008 e -0,01 MPa ; nas câmaras de Richards, -0,03, -0,05, -0,07, -0,1, -0,5 e -1,5 MPa, de acordo com o que recomenda Silva et al. (1994). Todas as CRAs foram posteriormente ajustadas pelo modelo proposto por van Genuchten (1980), indicado na equação 2:

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) / [1 + (\alpha \psi)^n]^m \quad (2)$$

onde:

θ = Umidade do solo (g g^{-1});

θ_r = Umidade residual do solo (na tensão de 1,5 MPa), (g g^{-1});

θ_s = Umidade do solo saturado (g g^{-1});

ψ = Potencial da água no solo (kPa);

α , m e n = parâmetros empíricos da equação obtidos pelo ajuste do modelo;

Os parâmetros α , m , n e os valores de θ_s e θ_r foram estimados utilizando o software Soil Water Retention Curve (SWRC versão 3.00), desenvolvido por Dourado Neto et al. (2001).

Para determinar o IHO é necessário, além das curvas de retenção de água, os valores da resistência mecânica do solo à penetração (RP), densidade do solo e porosidade de aeração, a diferentes teores de água. Assim, utilizaram-se as mesmas amostras indeformadas selecionadas para a determinação das curvas características de retenção da água no solo, submetidas aos mesmos potenciais mátricos indicados anteriormente. Logo após o equilíbrio da umidade com tais potenciais, as amostras foram pesadas e submetidas à determinação da RP com um penetrógrafo eletrônico de bancada, modelo MA 933 da marca Marconi, com velocidade de penetração constante de 1 cm min^{-1} , até a profundidade de 5 cm; sendo a determinação realizada no centro geométrico de cada amostra.

As medidas de resistência mecânica do solo à penetração obtidas nas camadas compreendidas entre 0 e 1,0 cm e entre 4 e 5 cm de profundidade foram descartadas, uma vez que tal resistência aumenta até determinada profundidade e depois tende a tornar-se constante. Bradford (1986) define-a como profundidade crítica de penetração. Sendo assim, considerou-se a média dos valores de resistência à penetração observada na camada de 1 a 4 cm de cada amostra.

Após os ensaios de RP, as amostras foram colocadas em estufa a 105°C , por 48 h, e em seguida pesadas para a obtenção da massa seca utilizada no cálculo da densidade do solo (D_s), de acordo com EMBRAPA, (1997).

A resistência à penetração é influenciada pela densidade do solo e pelo conteúdo de água do solo (θ), de forma que uma relação funcional entre estes atributos pode ser identificada como curva de resistência do solo (CRS). A CRS foi ajustada por meio de um modelo não linear proposto por Busscher (1990), conforme equação 4.

$$RP = a\theta^b \cdot Ds^c \quad (4)$$

Os valores de θ foram ajustados em relação à densidade do solo (Ds) e ao potencial da água no solo (ψ) utilizando-se um modelo de regressão não linear proposto por Tormena et al. (1998), conforme equação 05.

$$\theta = \exp(d + e \cdot Ds) \cdot (\psi)^f \quad (5)$$

onde:

a, b, c, d, e, f = parâmetros de ajuste.

θ = é a umidade do solo;

Ds = é a densidade do solo

ψ = é o potencial da água no solo

Para a construção do diagrama do IHO a partir das equações 6, 7, 8 e 9, geradas com base nas equações 4 e 5, utilizou-se um algoritmo desenvolvido em EXCEL (LEÃO & SILVA, 2004).

$$\theta = \exp(e \cdot Ds) \cdot 0,01^f \quad (6)$$

$$\theta = \exp(e \cdot Ds) \cdot 0,15^f \quad (7)$$

$$\theta_{RP} = (2/a \cdot Ds^c)^{1/2} \quad (8)$$

$$\theta_{AP} = (1 - Ds / Dp) - 0,1 \quad (9)$$

Nesse diagrama, relacionam-se densidade do solo (Ds) com a umidade na capacidade de campo (θ_{CC}) - ou conteúdo de água no potencial de -0,01 MPa (HAISE et al., 1955); com o ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) - ou conteúdo de água no potencial de -1,5 MPa (RICHARDS & WEAVER, 1944; SAVAGE et al., 1996); com o conteúdo de água no solo (θ_{PA}) em que a porosidade de aeração é de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (GRABLE & SIEMER, 1968) e com o conteúdo de água no solo (θ_{RP}) em que a resistência mecânica do solo à penetração atinge o limite crítico de 2,0 MPa (TAYLOR et al., 1966). Os valores de θ_{RP} foram obtidos por meio do modelo matemático ajustado aos dados de resistência. O valor de θ_{PA} , em que a porosidade de aeração é de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$,

foi obtido por meio da expressão $[(1-D_s/ D_p) - 0,1]$. Foi considerado um valor de D_p médio por horizonte, em $kg\ dm^{-3}$, como sendo a densidade média de partículas (D_p) neste solo, conforme determinações da EMBRAPA (1997).

O IHO foi calculado como a diferença entre o limite superior e inferior dos conteúdos de água em que ocorrem os parâmetros físicos considerados limitantes. O limite superior é o menor valor de θ considerado na capacidade de campo ou na porosidade com aeração mínima de 10 %, e o limite inferior é o maior valor de θ para resistência à penetração máxima de 2,0 MPa ou no ponto de murcha permanente.

As comparações dos atributos físicos entre os horizontes e usos do solo foram feitas utilizando o intervalo de confiança de Student a 85 % de probabilidade da média ($p < 0,05$), conforme Payton et al. (2000). Quando não há sobreposição dos limites superior e inferior do intervalo de confiança, considera-se que há diferença significativa.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Densidade do Solo

A análise descritiva para densidade do solo relacionados com uso do solo nos horizontes A, Ap e AB é apresentada no Quadro 3. Ressalta-se que o horizonte denominado A refere-se à mata e o horizonte Ap à cana e ao pasto. É possível observar que na mata o horizonte de transição AB apresentou maior valor de densidade do solo, seguramente devido a sua maior compacidade natural. Quanto aos usos avaliados, o solo sob pastagem degradada apresentou valor de densidade do solo maior do que os demais devido ao efeito, provavelmente, do pisoteio do gado.

Quadro 3. Densidade do solo (kg dm^{-3}) das amostras com estrutura preservada obtidas nos horizontes A/Ap e AB.

Uso	Média	Máx	Mín	CV(%)	N	IC.T(85%)
Horizonte A / Ap						
Mata	1,43	1,55	1,28	4,24	40	0,01
Cana	1,51	1,70	1,34	5,32	40	0,01
Pasto	1,70	1,88	1,51	4,79	40	0,01
Horizonte AB						
Mata	1,52	1,60	1,30	3,80	40	0,01
Cana	1,46	1,65	1,21	8,66	40	0,029
Pasto	1,71	1,87	1,48	4,90	40	0,01

CV: coeficiente de variação (%); IC.T: intervalo de confiança de Student; N:tamanho da amostra; Máx: valor máximo observado; Mín: valor mínimo observado.

Em estudo realizado por Araujo et al. (2004), áreas sob cultivo, comparadas com área sob mata, apresentaram maiores valores de densidade do solo. Em outro estudo, Klein & Libardi (2002), ao avaliarem possíveis alterações que o manejo do solo provoca em atributos físicos de um Latossolo Vermelho, concluíram que o manejo do solo irrigado, comparado aos do solo de mata e sequeiro, aumentou a densidade do solo até a profundidade de 40 cm, alterando, conseqüentemente, a distribuição do diâmetro dos poros, com diminuição da porosidade de aeração.

No presente estudo não foi observada diferença de densidade do solo entre os horizontes A/Ap e AB nas áreas cultivadas (Quadro 3), o que dificulta a utilização desse atributo para identificar a coesão. Porém, os valores de densidade do solo foram diferentes quando se compara o pasto com os outros dois sistemas de uso. Os valores de densidade do solo para o pasto foram claramente maiores que os valores para os demais usos, tanto no horizonte Ap quanto no AB.

Embora a amplitude de variação tenha sido de 1,21 a 1,88 kg dm^{-3} , o coeficiente de variação é baixo ($< 10\%$), considerando todos os horizontes e todos os usos estudados. O uso da densidade do solo para identificar a coesão também tem como dificuldade a relação existente entre a densidade e a granulometria, da qual podem resultar valores elevados de densidade do solo que, se utilizados de forma isolada, podem levar a interpretações enganosas da presença de coesão. Como exemplo, Santana et al. (2006) encontraram valores elevados de densidade do solo (1,65 e 1,81 kg dm^{-3}), para os

horizontes Ap1 e Ap2, respectivamente, sendo ambos arenosos. Esses valores foram semelhantes aos observados para os horizontes coesos BA e Bt. Paiva (1997) também observou maiores valores de densidade do solo em um Argissolo Acinzentado (PAC) de tabuleiro costeiro da Bahia, não coeso, de textura areia franca a franco-arenosa, em comparação com um Latossolo Amarelo argissólico e um Argissolo Amarelo, ambos coesos e de textura média a argilosa.

A amplitude de variação da densidade do solo encontrada (1,21 a 1,88 kg dm⁻³) está situada entre os limites de densidade do solo de textura arenosa, que variam de 1,20 a 1,80 kg dm⁻³ (BRADY,1989) e está de acordo com a variação descrita por outros autores (EMBRAPA, 1999; RIBEIRO, 2001; ARAUJO FILHO et al., 2001; MOREAU, 2001; REICHERT et al., 2007).

3.2. Porosidade Total, Micro e Macroporosidade

A porosidade total - PT (Quadro 4) e a macroporosidade (Quadro 5) da mata são semelhantes à da cana, mas diferem da pastagem. Considerando-se a mata como referência, pode-se inferir que o manejo da pastagem diminuiu a porosidade total e a macroporosidade do solo, enquanto no caso da cana isto não aconteceu, ou seja, o manejo utilizado no cultivo da cana (subsolagem) além de tornar os horizontes Ap e AB mais parecidos fisicamente (PT e macroporosidade) fez com que os valores se aproximassem aos do solo sob mata. O menor valor da macroporosidade e a redução do volume total de poros no horizonte AB da mata resulta do caráter coeso desses horizontes nos Tabuleiros Costeiros.

Quadro 4. Porosidade total ($m^3 m^{-3}$) do horizonte A/Ap e AB para os diferentes usos do solo.

Uso	Média	Máx	Mín	CV(%)	N	IC.T(85%)
Horizonte A / Ap						
Mata	0,46	0,51	0,41	4,95	40	0,005
Cana	0,45	0,51	0,38	6,50	40	0,006
Pasto	0,37	0,44	0,31	8,08	40	0,006
Horizonte AB						
Mata	0,43	0,51	0,4	5,11	40	0,005
Cana	0,46	0,55	0,39	10,30	40	0,01
Pasto	0,37	0,46	0,31	8,32	40	0,007

CV: coeficiente de variação (%); IC.T: intervalo de confiança de Student; N: tamanho da amostra; Máx: valor máximo observado; Mín: valor mínimo observado.

Os resultados apresentados no Quadro 5 evidenciam que houve redução da macroporosidade nos horizontes Ap e AB do solo cultivado sob pastagem em relação ao solo sob mata. Já no horizonte AB do solo cultivado com cana-de-açúcar houve acréscimo da macroporosidade. Estas alterações refletem as mudanças na distribuição do diâmetro de poros do solo decorrente do uso e manejo.

Quadro 5. Macroporosidade ($m^3 m^{-3}$) do horizonte Ap e AB do solo sob diferentes usos.

Uso	Média	Máx	Mín	CV(%)	N	IC.T(85%)
Horizonte A / Ap						
Mata	0,31	0,33	0,31	3,28	4	0,010
Cana	0,26	0,29	0,22	12,70	4	0,030
Pasto	0,15	0,17	0,13	12,32	4	0,018
Horizonte AB						
Mata	0,23	0,30	0,20	21,70	4	0,040
Cana	0,22	0,29	0,17	22,96	4	0,050
Pasto	0,20	0,25	0,16	17,34	4	0,030

CV: coeficiente de variação (%); IC.T: intervalo de confiança de Student; N: tamanho de amostra; Máx: valor máximo observado; Mín: valor mínimo observado.

Portela et al. (2001) avaliaram as alterações na quantidade e qualidade dos poros de um Latossolo Amarelo álico coeso, do ecossistema Tabuleiros Costeiros, em função do uso (citros, mandioca e mata) e observaram que a 0,10 m de profundidade, a porosidade total na mata foi igual à área de mandioca, sendo ambas maiores que na área de citros. Considerando-se a mata como referência, o uso com citros reduziu a porosidade do solo.

Com a redução dos poros de maior diâmetro, verificou-se conseqüente acréscimo dos microporos no horizonte Ap nas áreas cultivadas com cana-de-açúcar e pastagem, em relação ao solo da mata (Quadro 6).

Quadro 6. Microporosidade ($m^3 m^{-3}$) do horizonte A/Ap e AB do solo sob diferentes usos.

Uso	Média	Máx	Mín	CV(%)	N	IC.T(85%)
Horizonte A / Ap						
Mata	0,16	0,17	0,15	6,06	4	0,01
Cana	0,20	0,21	0,19	5,01	4	0,009
Pasto	0,22	0,25	0,2	10,04	4	0,02
Horizonte AB						
Mata	0,20	0,21	0,18	4,56	4	0,008
Cana	0,22	0,23	0,21	4,98	4	0,010
Pasto	0,18	0,18	0,17	3,89	4	0,006

CV: coeficiente de variação (%); IC.T: intervalo de confiança de Student; N: tamanho da amostra; Máx: valor máximo observado; Mín: valor mínimo observado.

3.3 Resistência mecânica do solo à penetração

Os Quadros 7, 8 e 9 apresentam os resultados dos valores de resistência mecânica do solo à penetração, relacionadas com os potenciais da água no solo (kPa) no horizonte A (mata) e Ap (cana e pastagem).

Quadro 7. Resistência mecânica do solo à penetração (MPa) relacionadas com potenciais da água no solo (kPa) no horizonte A, sob mata.

Potenciais	Média	CV	Mín	Máx	N	IC.T(85%)
-4	0,89	13,56	0,70	0,95	4	0,11
-6	0,77	9,03	0,64	0,78	4	0,06
-8	0,88	16,82	0,68	1,00	4	0,13
-10	1,00	39,23	0,57	1,33	4	0,35
-30	1,53	40,99	0,91	2,17	4	0,57
-50	1,55	25,24	0,91	1,82	4	0,35
-70	1,70	16,75	1,45	2,02	4	0,26
-100	2,10	35,36	1,48	2,97	4	0,68
-500	3,44	16,64	2,45	3,72	4	0,52
-1500	3,72	33,25	2,80	5,29	4	1,13

CV: coeficiente de variação (%); IC.T: intervalo de confiança de Student; N: tamanho da amostra; Máx: valor máximo observado; Mín: valor mínimo observado.

Quadro 8. Resistência mecânica do solo à penetração (MPa) relacionadas com potenciais da água no solo (kPa) no horizonte Ap, cultivado com cana-de-açúcar (subsolagem na linha de plantio).

Potenciais	Média	CV	Mín	Máx	N	IC.T(85%)
-4	0,83	22,87	0,58	0,96	4	0,17
-6	0,85	25,26	0,68	1,13	4	0,20
-8	1,20	16,96	0,97	1,40	4	0,18
-10	1,17	23,35	0,74	1,32	4	0,25
-30	1,43	27,85	0,84	1,68	4	0,36
-50	1,69	17,68	1,22	1,88	4	0,27
-70	1,72	22,68	1,23	2,01	4	0,35
-100	1,73	26,29	1,08	2,08	4	0,41
-500	4,18	27,24	2,63	5,29	4	1,04
-1500	5,33	22,54	3,66	6,42	4	1,10

CV: coeficiente de variação (%); IC.T: intervalo de confiança de Student; N: tamanho da amostra; Máx: valor máximo observado; Mín: valor mínimo observado.

Quadro 9. Resistência mecânica do solo à penetração (MPa) relacionadas com potenciais da água no solo (kPa) no horizonte Ap, sob pastagem.

	Média	CV	Mín	Máx	N	IC.T(85%)
-4	2,27	23,96	1,62	2,78	4	0,49
-6	2,34	9,85	2,03	2,54	4	0,21
-8	2,74	7,66	2,44	2,87	4	0,19
-10	2,47	23,39	1,66	2,86	4	0,52
-30	3,70	17,87	2,72	4,25	4	0,60
-50	3,56	28,83	2,37	4,68	4	0,94
-70	3,51	28,76	2,08	4,39	4	0,92
-100	3,63	26,29	2,59	4,66	4	0,87
-500	6,62	29,32	4,25	7,95	4	1,78
-1500	8,06	38,45	3,41	10,19	4	2,84

CV: coeficiente de variação (%); IC.T: intervalo de confiança de Student; N: tamanho da amostra; Máx: valor máximo observado; Mín: valor mínimo observado.

No horizonte A e Ap o solo sob mata e cana-de-açúcar apresentaram valores de resistência à penetração (RP) semelhantes e menores que sob pastagem. No caso da cana-de-açúcar, esta semelhança pode ser atribuída à subsolagem, que reduziu a RP do solo. Em condições de solo mais seco (-500 e -1500 kPa) o efeito da subsolagem não foi percebido, pois o baixo conteúdo de água no solo foi o ponto mais preponderante para dificultar a penetração da haste.

De maneira geral, os dados obtidos nas três áreas confirmam o esperado, que os valores de RP aumentam com a redução do potencial mátrico (Ψ) e, conseqüentemente, com a diminuição da umidade do solo. Considerando o limite crítico de 2,0 MPa ao desenvolvimento do sistema radicular da maioria das culturas (SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 1998; LAPEN et al., 2004; COLLARES et al., 2006; BLAINSKI et al., 2008), se verifica que no horizonte Ap a subsolagem feita há 3 anos (2009) consegue evitar que a RP supere este limite até -100 kPa, mantendo-se semelhante à mata. Em outras palavras, nesse horizonte, até -100 kPa não há restrições para o crescimento das culturas.

Nos Quadros 10, 11 e 12 são apresentados os resultados de resistência mecânica do solo à penetração, relacionadas com os potenciais da água no solo (kPa) para o horizonte AB do solo sob mata, cana-de-açúcar (subsolagem na linha de plantio) e pastagem.

Quadro 10. Resistência mecânica do solo à penetração (MPa) relacionadas com potenciais da água no solo (kPa) no horizonte AB, sob mata.

Potenciais	Média	CV	Mín	Máx	N	IC.T(85%)
-4	0,84	34,22	0,55	1,16	4	0,26
-6	0,97	40,57	0,36	1,13	4	0,36
-8	0,94	30,74	0,62	1,20	4	0,26
-10	1,30	13,48	1,02	1,42	4	0,16
-30	1,40	44,76	0,56	2,00	4	0,57
-50	2,53	36,49	1,23	3,34	4	0,84
-70	2,52	45,77	1,07	3,64	4	1,04
-100	2,88	23,00	2,19	3,63	4	0,60
-500	4,73	15,26	3,66	5,09	4	0,66
-1500	7,40	29,84	5,74	10,16	4	2,02

CV: coeficiente de variação (%); IC.T: intervalo de confiança de Student; N: tamanho da amostra; Máx: valor máximo observado; Mín: valor mínimo observado.

Quadro 11. Resistência mecânica do solo à penetração (MPa) relacionadas com potenciais da água no solo (kPa) no horizonte AB, cultivado com cana-de-açúcar (subsolagem na linha de plantio).

Potenciais	Média	CV	Mín	Máx	N	IC.T(85%)
-4	1,08	30,70	0,76	1,36	4	0,30
-6	1,25	34,35	0,84	1,61	4	0,39
-8	0,94	31,31	0,62	1,21	4	0,27
-10	1,14	54,41	0,48	1,83	4	0,57
-30	2,57	50,71	0,64	3,44	4	1,19
-50	2,70	52,09	1,38	3,96	4	1,28
-70	3,34	30,75	1,75	3,91	4	0,94
-100	3,24	22,83	2,08	3,65	4	0,67
-500	4,48	36,01	2,60	5,63	4	1,47
-1500	5,05	33,73	2,50	6,30	4	1,56

CV:coeficiente de variação (%);IC.T: intervalo de confiança de Student; N: tamanho da amostra; Máx: valor máximo observado; Mín: valor mínimo observado.

Quadro 12. Resistência mecânica do solo à penetração (MPa) relacionadas com potenciais da água no solo (kPa) no horizonte AB, sob pastagem.

Potenciais	Média	CV	Mín	Máx	N	IC.T(85%)
-4	1,67	9,63	1,36	1,72	4	0,11
-6	1,76	36,67	0,82	2,22	4	0,44
-8	1,81	21,07	1,22	2,09	4	0,26
-10	2,78	32,77	1,55	3,63	4	0,62
-30	3,39	24,86	2,33	4,17	4	0,57
-50	5,74	39,34	3,59	8,14	4	1,55
-70	5,70	6,40	4,94	5,74	4	0,25
-100	6,15	62,23	1,91	9,81	4	2,62
-500	6,24	51,20	3,16	8,85	4	2,19
-1500	6,22	32,83	4,61	8,80	4	1,40

CV:coeficiente de variação (%);IC.T: intervalo de confiança de Student; Máx: valor máximo observado; Mín: valor mínimo observado.

No horizonte AB o solo sob mata e sob cana-de-açúcar (subsolagem) apresentou maiores valores de RP que no horizonte A, principalmente quando o solo apresentava umidade mais baixa. No solo de pastagem, os maiores valores de RP, nos potenciais de -4kPa, -6kPa -8kPa e -10kPa, do horizonte Ap comparado ao horizonte AB está relacionado com o aumento da densidade do solo e a redução da macroporosidade do solo (Quadro 5), o pode ser atribuído ao efeito do pisoteio do gado.

Essa variação do comportamento mecânico entre os horizontes A e AB é uma característica dos solos do ecossistema Tabuleiro Costeiro por

apresentarem camada coesa de origem pedogenética nos horizontes de transição AB e BA (REZENDE, 2000).

A elevada resistência do solo à penetração, quando seco, é um dos principais problemas relacionados aos solos dos Tabuleiros Costeiros que apresentam horizontes coesos, interferindo no desenvolvimento do sistema radicular das plantas (CINTRA et al., 1997; REZENDE, 2000). Souza (1996) afirma que, apesar de serem considerados profundos, tais solos possuem uma profundidade efetiva reduzida pela presença desses horizontes, prejudicando a dinâmica da água no perfil e, principalmente, o aprofundamento das raízes, agravando assim as suas limitações. Logo, o desenvolvimento do sistema radicular pode ser influenciado pelo tempo que os horizontes coesos permanecem úmidos, quando diminui a resistência a penetração, possibilitando o aparecimento comum de raízes. Isso sugere a busca por opções de manejo de solo para aumentar e manter a umidade no solo, de modo a não acentuar a restrição física imposta pela resistência do solo à penetração radicular das plantas.

De acordo com Tormena et al. (2002), a resistência do solo à penetração integra os efeitos da densidade e da umidade nas condições físicas do solo necessárias para o crescimento das raízes. Como neste trabalho a medida da RP foi realizada em uma mesma escala de potencial mátrico para os diferentes usos, a densidade do solo foi o fator que contribuiu para os maiores valores de RP observados no solo sob pastagem, tendo em vista que este sistema apresentou maiores valores de densidade.

No horizonte AB do solo sob mata, cana-de-açúcar e pastagem, a RP atinge o limite de 2 Mpa, considerado crítico, nos potenciais entre -30 e -50 kPa, entre -10 e -30 kPa e entre -8 e -10 kPa, respectivamente (Quadros 10, 11 e 12). No entanto, em condições de solo mais secos (potenciais de -70, -100, -500 e -1500 kPa), os valores de RP, nesse horizonte, são superiores a 2,0 MPa em todos os usos estudados. Ou seja, na presença de horizonte coeso deve-se manter o solo com a umidade próximo à capacidade de campo para evitar que a RP supere este limite. Considerando-se a distribuição de chuvas para a região, com inverno chuvoso e verão seco, o manejo de água para as culturas

agrícolas torna-se importante, bem como o manejo do solo. Observa-se que o solo cultivado com pastagem apresenta limite crítico de RP com umidade do solo mais elevada que os demais usos.

3.4 Umidade volumétrica em que a RP atinge o limite crítico (UvRPc)

No Quadro 13 são apresentados os resultados da umidade volumétrica (θ) correspondente à RP crítica (θ RPc), nos horizontes A/Ap e AB.

Quadro 13. Umidade volumétrica ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) em que a resistência à penetração atinge o limite crítico (2,0 MPa).

Uso	Média	Máx	Min	CV	N	IC.T
Horizonte A / Ap						
Mata	0,12	0,12	0,11	3,83	4	0,004
Cana	0,16	0,17	0,16	4,57	4	0,007
Pasto	0,28	0,34	0,24	16,66	4	0,040
Horizonte AB						
Mata	0,15	0,15	0,14	2,05	4	0,003
Cana	0,18	0,20	0,16	8,67	4	0,010
Pasto	0,20	0,23	0,19	8,99	4	0,029

CV: coeficiente de variação (%); IC.T: intervalo de confiança de Student; N:tamanho da amostra; Máx: valor máximo observado; Mín: valor mínimo observado.

Tais resultados evidenciam que no horizonte A, nas áreas de mata e de cana-de-açúcar (subsolada) poderá ocorrer maior secamento do solo sem que haja valores restritivos de resistência à penetração (RP), comparados aos resultados do horizonte AB. No solo sob pastagem, entretanto, ocorreu o inverso, o efeito do pisoteio do gado proporcionando maior compactação do solo. Significa dizer que, aumentando a densidade do solo, há necessidade de se manter sempre um elevado teor de água no meio (maiores valores de θ) com o objetivo de evitar a restrição imposta pela resistência do solo ao crescimento radicular das plantas.

No solo sob mata nativa (horizonte AB), um valor igual ou maior que $0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de água foi suficiente para garantir $RP \leq 2,0 \text{ MPa}$; entretanto, no solo cultivado com pastagem e, ou cana-de-açúcar (subsolada), a umidade do solo não deverá ser inferior a $0,28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $0,18 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente, para manter $RP \leq 2,0 \text{ MPa}$.

Em estudo comparando-se mata nativa com outros usos do solo, Blainski et al. (2008) observaram que em solo sob mata nativa somente valor de θ igual a $0,09 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ foi suficiente para garantir a $RP \leq 2,0 \text{ MPa}$, enquanto nos solos cultivados com pastagem, citros e culturas anuais, respectivamente, a umidade volumétrica não deveria ser inferior a $0,17$; $0,21$ e $0,22 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para manter $RP \leq 2,0 \text{ MPa}$. Os resultados de Cotching & Belbin (2007) mostraram que o manejo da água no solo é importante no controle da RP e que, em solos com estrutura degradada, a taxa de aumento da RP com o secamento do solo é maior do que em solos bem estruturados. Com isso, solos bem estruturados suportam maior secamento sem que a RP atinja valores restritivos para o crescimento radicular das plantas.

Os resultados deste trabalho indicam que, em solos coesos, o controle da qualidade física é dependente da conservação da água ao longo do perfil, e que a redução da RP por métodos que incrementem a macroporosidade via redução da D_s é uma alternativa para manter a RP em níveis não impeditivos às plantas.

3.5 Retenção da água no solo

Analisando visualmente a curva de retenção de água no solo (Figura 1) percebe-se que no solo sob mata e sob cana-de-açúcar a retenção da água no solo foi maior no horizonte AB, um pouco mais argiloso que o horizonte A. No solo sob pastagem, entretanto, ocorreu o inverso.

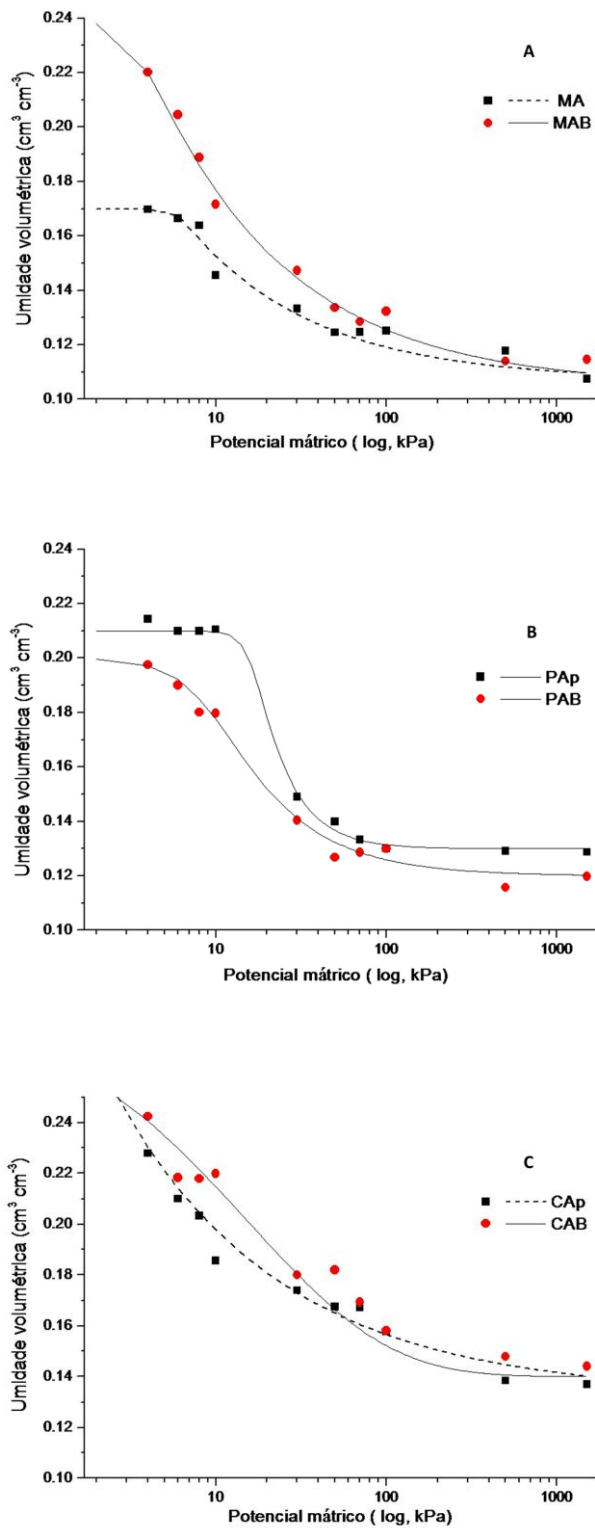


Figura 1. Curvas de retenção de água (CRA) do Latossolo Amarelo Distrófico coeso em diferentes usos: A-mata; B-pastagem e C-cana-de-açúcar (área subsolada) nos horizontes A/Ap e AB.

Essas modificações nas características de retenção de água do solo sob pastagem resultam de mudanças na qualidade física dos solos, conforme teorizado por Dexter (2004). No horizonte coeso (AB), as argilas se atraem e os microporos presentes retêm fortemente as moléculas de água, retendo uma grande quantidade de água mesmo em elevadas tensões. Isso demonstra a importância da granulometria e da estrutura na retenção da água no solo.

No uso com cana-de-açúcar o efeito da subsolagem reduziu a diferença entre os horizontes. Este uso apresentou maior retenção de água em relação aos solos sob mata e sob pastagem devido ao seu maior conteúdo de argila. Beutler et al. (2002) demonstraram maior retenção de água em solos com maiores conteúdos de argila.

No caso da área de pastagem, o aumento na densidade do solo - possivelmente devido à compactação do horizonte A - promoveu modificações na estrutura do solo, aumentando a microporosidade (Quadro 6). Predominantemente, os microporos retêm água em potenciais maiores que - 100 kPa.

Segundo Reichert et al. (2009), o aumento da retenção de água no solo com aumento da D_s pode ser explicado pela redistribuição da porosidade promovido pelo manejo do solo, incluindo o aumento da microporosidade. Klein & Libardi (2002) verificaram diferenças nas curvas de retenção de água em sistemas de sequeiro e irrigado em comparação com a mata, observando-se a redução da porosidade e a alteração do diâmetro dos poros causada pelo manejo.

Marques et al. (2004) constataram que em um Latossolo Amarelo na região amazônica, cultivado com sistema agroflorestal, apresentou elevada capacidade de retenção de água, mesmo quando submetido a altas tensões. Segundo Oliveira et al. (2004), a distribuição de poros por tamanho em Latossolos é caracterizada por apresentar predominantemente duas classes de poros distintos: a primeira, relacionada àqueles muito grandes, que promovem rápida drenagem interna do solo; e a segunda, a poros muito pequenos, nos

quais a água é retida com energia muito alta, caracterizando-a como água higroscópica.

3.6 Capacidade de água disponível (CAD)

O horizonte AB, de uma maneira geral, apresentou maiores valores de CAD (Quadro 14) em relação ao horizonte A, tendo uma relação direta com os maiores teores de argila (Quadro 02) encontrados neste horizonte. Soares Neto & Rezende (2000) estudando a retenção e disponibilidade de água em solos coesos de Tabuleiros Costeiros do Estado da Bahia, encontraram na profundidade de 0 a 0,60 m os maiores teores de argila e água disponível. Resultados semelhantes foram encontrados por Portela (2001), trabalhando com retenção de água em um Latossolo coeso de Tabuleiro Costeiro de Cruz das Almas – BA.

Quadro 14. Capacidade de água disponível ($m^3 m^{-3}$) para o solo em estudo nos diferentes usos.

Uso	Média	Máx	Mín	CV(%)	N	IC.T(85%)
Horizonte A/Ap						
Mata	0,04	0,06	0,02	37,78	4	0,010
Cana	0,05	0,05	0,04	13,23	4	0,006
Pasto	0,07	0,08	0,06	11,01	4	0,007
Horizonte AB						
Mata	0,06	0,06	0,05	8,49	4	0,004
Cana	0,08	0,10	0,07	21,22	4	0,010
Pasto	0,07	0,08	0,06	12,00	4	0,008

CV: coeficiente de variação (%); IC.T: intervalo de confiança de Student; N:tamanho da amostra; Máx: valor máximo observado; Mín: valor mínimo observado.

3.7 Intervalo Hídrico Ótimo (IHO)

3.7.1 Horizonte A (mata) e Ap (solos cultivados):

O IHO para o horizonte A e Ap do solo sob os diferentes usos (Figura 2), representado pela área hachurada, mostra a grande amplitude de umidade do solo em que são mínimas as limitações ao desenvolvimento das plantas .

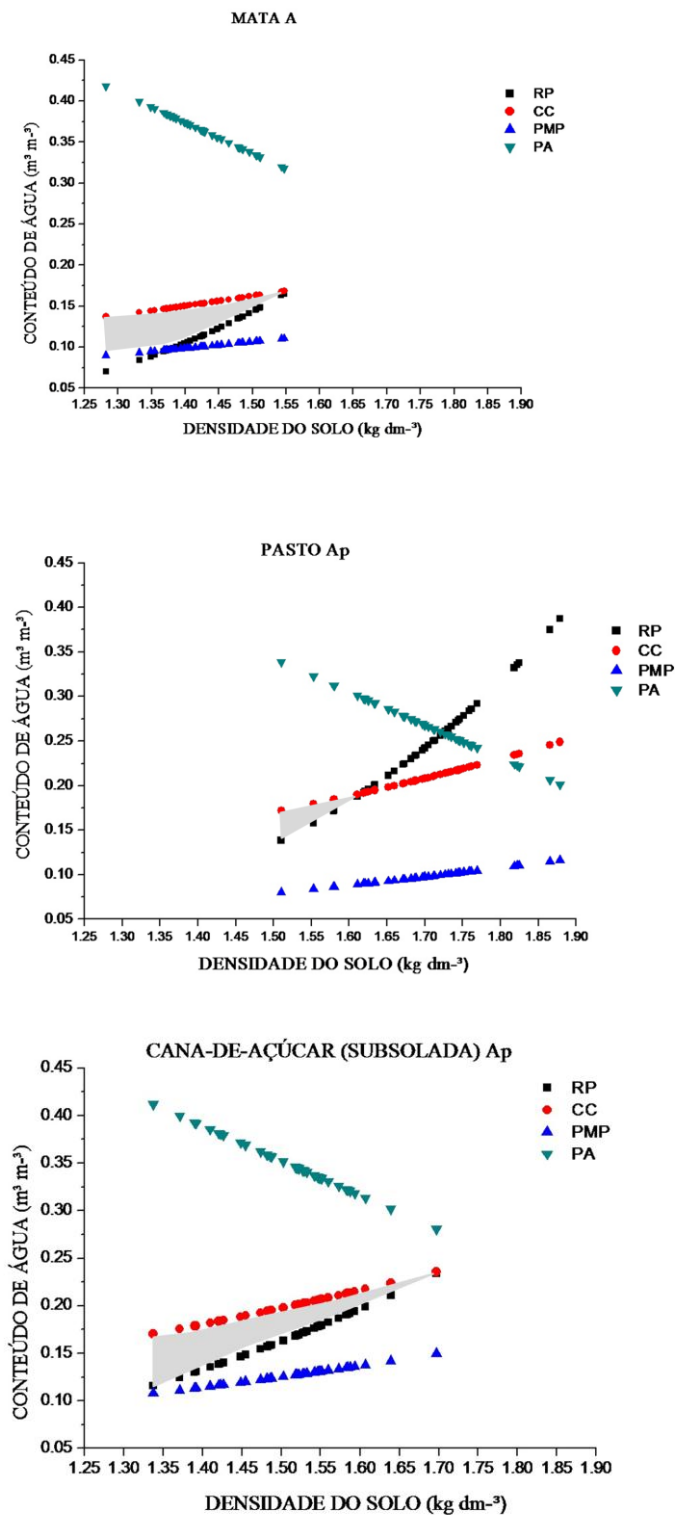


Figura 2. Variação do conteúdo de água com a Ds nos níveis críticos da capacidade de campo ($\psi = -0,01$ MPa), ponto de murcha permanente ($\psi = -1,5$ MPa), porosidade de aeração de 10% e resistência à penetração de 2 MPa no Latossolo Amarelo coeso sob diferentes usos no horizonte Ap . A área hachurada representa o IHO do solo.

No horizonte A, para os três usos avaliados, o limite superior do IHO foi a umidade na capacidade de campo (θ_{CC}), mostrando que a aeração não é a condição física limitante para o crescimento de plantas. Resultados similares foram obtidos por Tormena et al. (1999, 2007), Blainski et al. (2009) e Betioli Júnior et al. (2012).

De acordo com Tormena et al. (1999) e Silva et al. (2011) quando a $\theta_{PA} > \theta_{CC}$ (o limite superior do IHO é a θ_{CC}) em solos com altos valores de densidade, ocorre uma microestrutura estável do solo que preserva o espaço poroso necessário para a troca de gases.

A resistência à penetração para os solos estudados foi o fator que limitou o IHO para os usos com cana e pastagem. Na mata, a RP foi limitante para valores de densidade do solo maiores que $1,36 \text{ kg dm}^{-3}$. Tais resultados estão de acordo com os obtidos por Topp et al. (1994) e Silva et al. (1994), nos quais a resistência foi o fator que mais reduziu o IHO em solos sob diferentes condições de textura e manejo. A constatação da RP como principal fator físico limitante às plantas também é respaldada por Silva et al. (2009) e Bengough et al. (2011), visto que a variação de RP é dependente da variação de θ e influenciada pelo aumento de D_s .

Os resultados de IHO do horizonte Ap obtidos no solo sob mata foram similares ao do solo sob cana-de-açúcar (subsolada), e ambos apresentaram maiores valores de IHO em relação ao solo sob pastagem. Estes resultados evidenciam que a degradação da estrutura do solo pelo cultivo de pastagem impõe limitações ao crescimento das plantas pela elevada densidade do solo e pela elevada resistência do solo à penetração, que pode atingir valores altos, principalmente em condições de solo com baixa umidade. Essas constatações têm um significado especial para o manejo dos solos coesos, pois, além de a RP atuar mais frequentemente como fator limitante ao crescimento do sistema radicular, ela supera o valor de $2,0 \text{ MPa}$ mesmo em altos valores de umidade volumétrica.

Também vale ressaltar que nos três usos avaliados (com exceção ao da mata para valores de D_s menores que $1,36 \text{ kg dm}^{-3}$), o IHO foi menor que a capacidade de água disponível ($CAD = \theta_{CC} - \theta_{PMP}$), o que caracteriza os solos

como fisicamente limitantes (Letey, 1985). Por esse motivo, Silva et al. (1994) apontam o IHO como uma ferramenta de análise da estrutura do solo mais sensível que o conceito de capacidade de água disponível.

3.7.2 Horizonte AB

Assim como no horizonte A e Ap - para os três usos avaliados - o limite superior do IHO no horizonte AB foi a umidade na capacidade de campo (θ_{CC}), indicando que as plantas não terão seu desenvolvimento limitado pela reduzida difusão de oxigênio no solo (Figura 3). Os limites inferiores do IHO para a mata e cana foram a umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) e a resistência do solo à penetração (θ_{RP}). A θ_{PMP} passa a ser limitante no solo sob mata e sob cana-de açúcar (subsolada) para valores de densidades abaixo de $1,40 \text{ kg dm}^{-3}$ e $1,45 \text{ kg dm}^{-3}$ respectivamente.

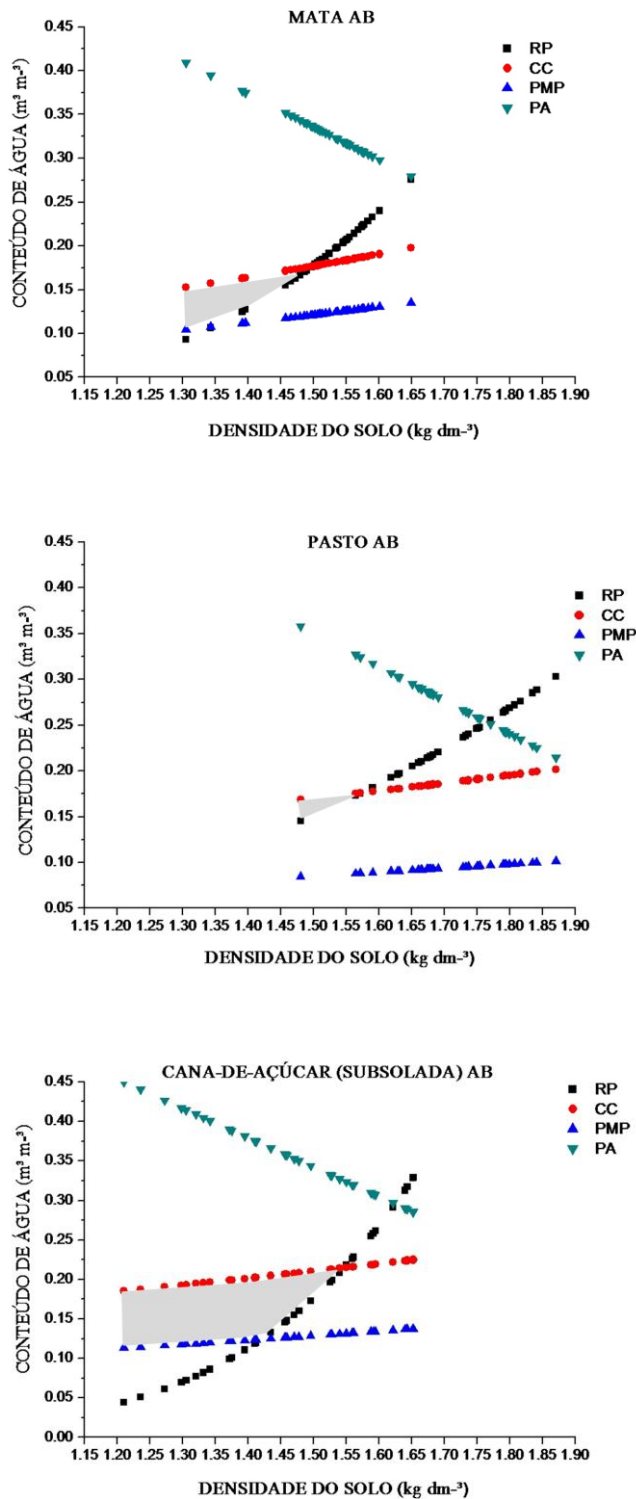


Figura 3. Variação do conteúdo de água com a Ds nos níveis críticos da capacidade de campo ($\psi = -0,01$ MPa), ponto de murcha permanente ($\psi = -1,5$ MPa), porosidade de aeração de 10% e resistência à penetração de 2 MPa no Latossolo Amarelo coeso sob diferentes usos no horizonte AB . A área hachurada representa o IHO do solo.

O IHO do horizonte AB do solo sob pastagem foi limitado pela θ_{RP} em 100% das amostras, ou seja, este solo apresenta limitações físicas ao desenvolvimento radicular.

Nesta área o impacto da RP sobre o limite inferior do IHO foi maior, em decorrência da forte relação da densidade do solo sobre a resistência à penetração. Esse resultado é típico de solos adensados ou compactados, que necessitam estar com umidade elevada para que a RP não atinja o valor limitante. Vários autores também verificaram a influência da θ_{RP} para o IHO do solo sob diferentes sistemas de manejo (Leão et al. 2004; Beutler et al. 2006; Silva 2008; Pereira 2010; Pereira et al. 2012), e para solos com diferentes texturas (Silva et al. 1994; Tormena et al. 1998).

Para o solo em estudo, em todos os usos avaliados, à medida que aumenta a densidade do solo o IHO reduz, pois ocorre aumento acentuado da resistência à penetração com a menor variação da umidade do solo. Este efeito, não comum em outras classes de solos, decorre devido ao caráter coeso desse solo.

No horizonte coeso (AB) a amplitude do IHO (Quadro 15) do solo nos diferentes usos apresentaram a seguinte ordem: cana-de-açúcar (subsolada) > mata > pastagem. O rompimento da camada coesa através da prática da subsolagem no solo sob cana-de-açúcar modificou o comportamento físico do solo em função da mudança na distribuição dos poros do solo. Farias (2012) verificou que a desestruturação mecânica subsuperficial aumentou o IHO nos horizontes AB e BA de um Argissolo Amarelo coeso dos Tabuleiros Costeiros.

O crescimento de culturas sobre solos que têm uma estreita faixa de IHO é mais vulnerável à seca e ao excesso de umidade do que solos que têm um amplo IHO (Silva et al., 1994). Os resultados deste trabalho sugerem que o IHO é um parâmetro importante no monitoramento da qualidade física do solo e que a subsolagem pode ser uma alternativa de manejo para os solos que apresentam horizonte coeso, minimizando as adversidades da elevada resistência à penetração a que as culturas são impostas principalmente nos períodos de veranicos.

Os valores de IHO, em função da densidade do solo são apresentadas na Figura 4. Os resultados mostram a influência negativa da densidade do solo, o que está de acordo com os resultados de Silva et al. (1994), Leão et al. (2005), Medeiros et al. (2011), Silva et al. (2011).

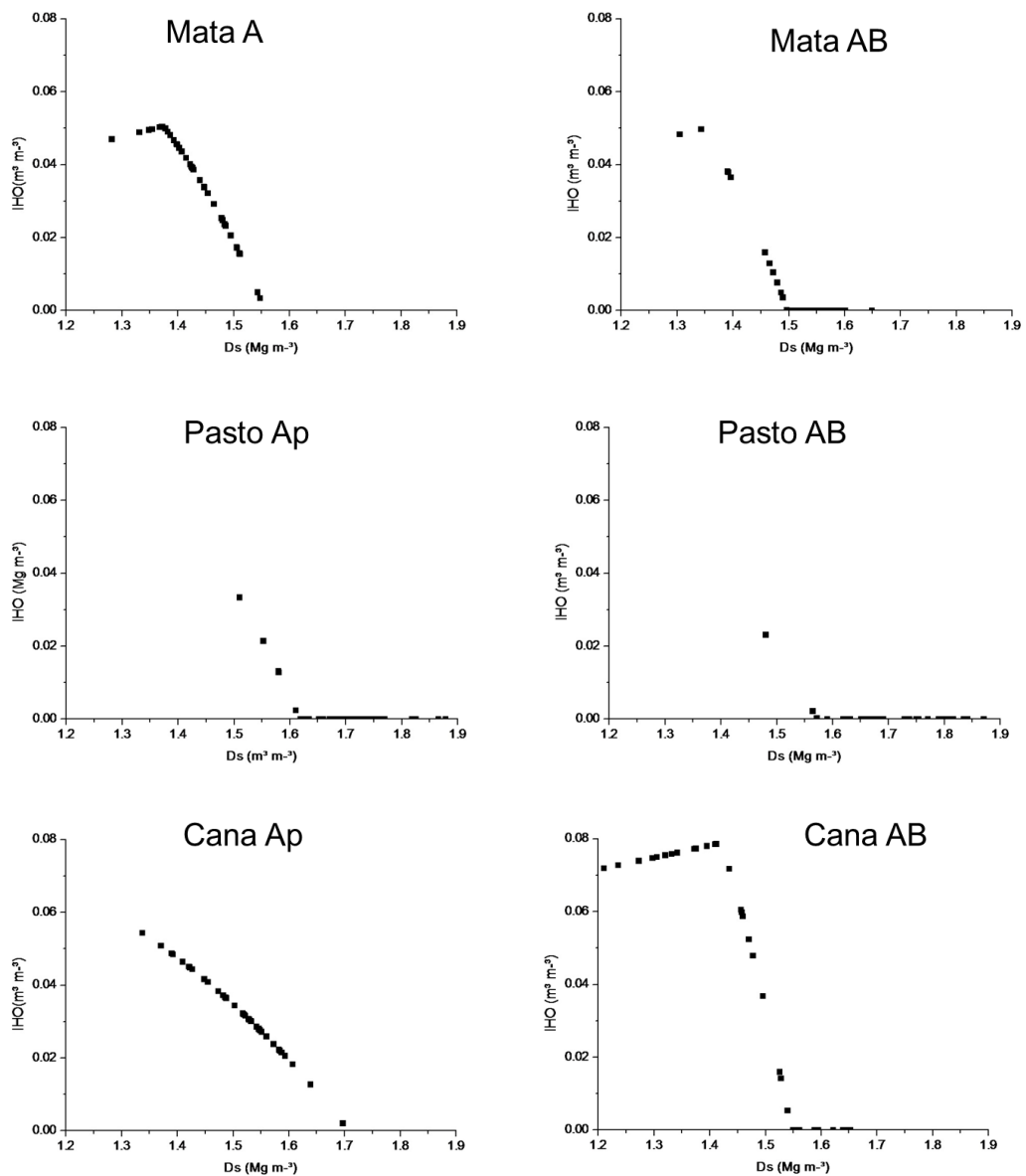


Figura 4. Variação do IHO em função da densidade do solo (Ds) para os horizontes A, Ap e AB no Latossolo coeso sob mata, cana-de-açúcar (subsolada) e pastagem .

Os resultados também evidenciam que, comparativamente ao horizonte A / Ap, o horizonte AB impõe maiores limitações ao crescimento das plantas sob elevada Ds e ainda, pela elevação da resistência do solo à penetração, devido a natureza coesa – o que é reduzida com a subsolagem.

De acordo com Kay (1989), o decréscimo do IHO caracteriza a perda da qualidade física do solo, considerando a probabilidade das culturas serem expostas a estresses físicos, o que foi constatado por Silva & Kay (1996).

Alguns trabalhos desenvolvidos em Latossolos com diferentes formas de manejo mostram que, até um certo valor de Ds, ocorre um incremento do IHO. Tormena et al. (1998) encontraram uma correlação positiva entre IHO e a Ds até o valor de 1,10 kg dm⁻³. A mesma correlação foi observada por Tormena et al. (1999) até Ds = 1,02 kg dm⁻³, em sistemas de plantio direto e cultivo convencional.

A amplitude do IHO nos horizontes A / Ap e AB sob diferentes usos é apresentada no Quadro 15.

Quadro 15. Amplitude de variação dos valores de IHO (m³ m⁻³) observados para o solo em estudo sob diferentes usos.

Uso	Horizonte A / Ap	Horizonte AB
Mata	0 - 0,05	0 - 0,05
Pasto	0 - 0,03	0 - 0,02
Cana	0 - 0,05	0 - 0,08

Considerando a área de mata como referência, é possível afirmar que o uso do solo com a pastagem provocou alteração nos atributos físicos do solo, resultando na menor amplitude do IHO, pois os estreitos valores do IHO, tanto para o horizonte Ap quanto para o horizonte AB, indicam que a pastagem está submetida a restrições por excessiva impedância mecânica (elevada RP), principalmente no período de estiagem, conforme teorizado por Kay (1990).

A amplitude dos dados de IHO do solo sob cana-de-açúcar em relação ao da mata e da pastagem mostra o efeito positivo da subsolagem, que ao romper a camada coesa promoveu maior amplitude do IHO para o solo, principalmente no horizonte AB (mesmo após três anos de sua realização), o

que pode ser explicado pela redução da RP e redistribuição da porosidade. Ressalta-se, assim, a vantagem do uso do IHO, pois este possibilita a integração de fatores físicos diretamente relacionados ao crescimento das plantas, assim como a indicação da necessidade de práticas de manejo que modifiquem a estrutura do solo para a ampliação do IHO.

3.7.3 Densidade Crítica (Dsc)

A Dsc é a densidade do solo em que o IHO iguala-se a zero, ou seja, em que o limite inferior de água no solo iguala-se ao limite superior (Silva et al., 1994). O Quadro 16 mostra os valores de Dsc para as diferentes áreas e horizontes estudados.

Quadro 16. Valores de densidade crítica do solo relacionado com as áreas e os horizontes estudados.

Uso	Dsc (kg dm ⁻³)	
	Horizonte A e Ap	Horizonte AB
Mata	1,54	1,50
Pasto	1,61	1,56
Cana	1,70	1,55

Com o aumento da densidade do solo, para as três áreas, houve diminuição do IHO, até que este atingisse sua densidade crítica. Neste estudo, os horizontes superficiais (A e Ap) apresentaram maiores valores de Dsc em relação ao AB, tendência associada ao adensamento natural que o horizonte subsuperficial apresenta.

Entre os usos do solo avaliados verifica-se que o solo sob pastagem foi o que mais apresentou valores de $D_s > D_{sc}$. No solo sob mata e o sob cana-de-açúcar o número de amostras do solo com $D_s < D_{sc}$ foram semelhantes para o horizonte A/Ap, respectivamente (Figura 5). Estes resultados indicam que a maior parte da área de pastagem encontrava-se com condições físicas desfavoráveis ao crescimento das plantas, ao contrário do solo sob mata e sob cana-de-açúcar subsolada.

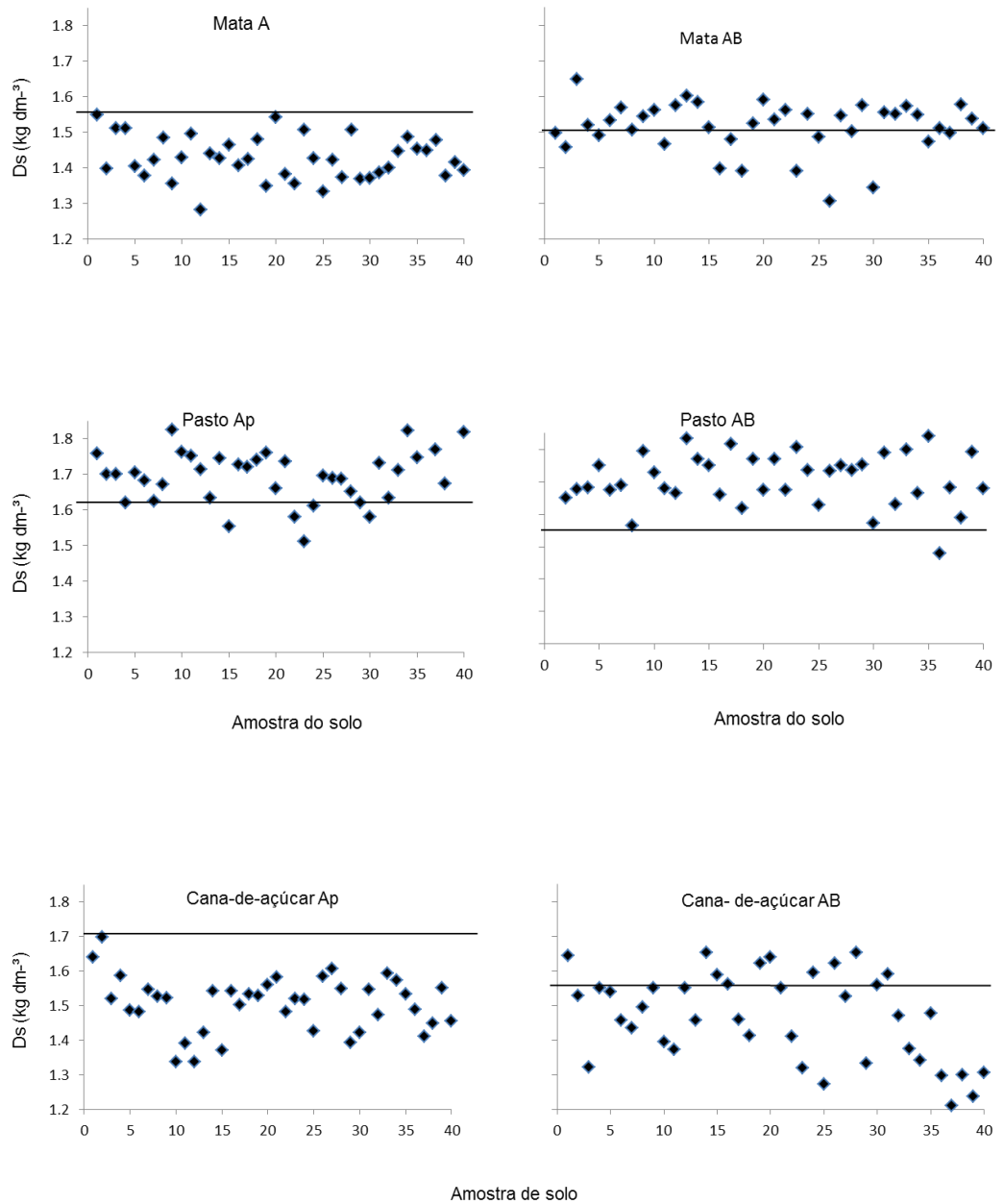


Figura 5. Densidade do solo de amostras coletadas nos horizontes A, Ap e AB, em relação a densidade crítica do solo (D_{sc}) para um Latossolo Amarelo Distrófico coeso sob diferentes usos. A linha horizontal indica a D_{sc} .

Segundo Silva & Kay (1997) e Leão et al. (2004), limitações ao crescimento radicular podem ocorrer com valores de $D_s < D_{sc}$ quando o IHO é muito estreito. Este é o caso do solo sob pastagem, no qual a resistência do solo à penetração tem aumento acentuado à medida que a umidade do solo fica abaixo da capacidade de campo. Isso indica que, mesmo o solo apresentando $D_s < D_{sc}$, sua RP pode restringir o crescimento radicular das plantas, inclusive antes da umidade do solo ficar próxima ao ponto de murcha permanente.

Os valores altos de D_{sc} observados neste estudo podem ser explicados pelos elevados valores de D_s devido à textura e a camada coesa que o solo apresenta. É comum observar valores de $D_s > D_{sc}$, porém existe uma tendência nos trabalhos de IHO de que solos sob sistemas de manejo intensivos apresentem, com mais frequência, valores de $D_s > D_{sc}$ (ARAUJO et al., 2004; LEÃO et al., 2006; TORMENA et al., 2008). Utilizando o conteúdo de argila como referência, Reinert et al. (2001) propuseram valores críticos de densidade do solo, sendo de $1,45 \text{ g cm}^{-3}$ para solos com mais de 55 % de argila, $1,55 \text{ g cm}^{-3}$ para solos com teor de argila entre 20 e 55 % e $1,65 \text{ g cm}^{-3}$ para solos com menos de 20 % de argila.

Araujo et al (2004) observaram valores de $D_s > D_{sc}$ para um solo sob cultivos anuais e nenhum valor de $D_s > D_{sc}$ foi observado para o mesmo solo sob vegetação natural. Já Tormena et al. (1998) obtiveram D_{sc} de $1,28 \text{ g cm}^{-3}$ em Latossolo Vermelho, com 800 g cm^{-3} de argila na camada de 0 a 10 cm. Cavalieri et al. (2006) também observaram maior D_{sc} em tratamentos envolvendo solos manejados mecanicamente, reduzindo a probabilidade de ocorrência de amostras com densidades superiores à D_{sc} .

4. CONCLUSÕES

A resistência do solo à penetração foi influenciada positivamente pela densidade e negativamente pela umidade do solo, com maior magnitude no horizonte AB, e principalmente, no solo sob pastagem.

O intervalo hídrico ótimo no horizonte A da mata e Ap na cana-de-açúcar foram semelhantes, e ambos maiores que na pastagem, já no horizonte AB o IHO para a cana-de-açúcar foi maior que para a mata e esta maior que para a pastagem.

Os horizontes A / Ap apresentaram maiores valores de densidade crítica em relação ao horizonte AB para todos os usos avaliados. O uso que mais apresentou valores de densidade do solo maiores que a densidade crítica foi a pastagem.

Em solos coesos o controle da qualidade física é dependente da conservação da água ao longo do perfil, e a redução da RP por métodos que incrementem a macroporosidade via redução da Ds é uma alternativa para manter a RP em níveis não impeditivos às plantas.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO FILHO, J. C de; CARVALHO, A.; SILVA, F. B. R. Investigações preliminares sobre a pedogênese de horizontes coesos em solos dos tabuleiros costeiros do Nordeste de Brasil. In: CINTRA, F. L. D; ANJOS, J. L. dos; IVO, W. P. de M. **Workshop coesão em solos dos tabuleiros costeiros**. Aracaju, SE: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2001. 339p.

ARAÚJO, M.A.; TORMENA, C.A.; INOUE, T.T.; COSTA, A.C.S. Efeitos da escarificação na qualidade física de um Latossolo Vermelho distroférico após treze anos de semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 459-504, 2004.

BENGOUGH, A.G.; MCKENZIE, B.M.; HALLETT, P.D. & VALENTINE, T.A. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: A review of limiting stresses and beneficial root tip traits. **J. Exper. Bot.**, v.62, p. 59-68, 2011.

BETIOLI JÚNIOR, E.; MOREIRA, W.H.; TORMENA, C. A.; FERREIRA, C.J.; SILVA, A.P. da. & GIAROLA, N.F.B. Intervalo Hídrico Ótimo e Grau de Compactação de um Latossolo Vermelho Após 30 Anos Sob Plantio Direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 971-982, 2012.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SILVA, A.P. & BARBOSA, J.C. Intervalo hídrico ótimo e produtividade de cultivares de soja. **R. Bras. Eng. Agr. Amb.**, v.10, p. 639- 645, 2006.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SOUZA, Z.M.; ANDRIOLI, I. & ROQUE, C.G. Retenção de água em dois tipos de Latossolos sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 829-834, 2002.

BEUTLER, A.N.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; FERREIRA, M.M.; CRUZ, J. C. & PEREIRA FILHO, I. A. Resistência à penetração e permeabilidade de Latossolo Vermelho distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p.167-177, 2001.

BLAINSKI, E. ; TORMENA, C.T.; FIDALKI, 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.

BLAINSKI, E.; GONÇALVES, A.C.A.; TORMENA, C.A.; FOLEGATTI, M.V. & GUIMARÃES, R.M.L. Intervalo hídrico ótimo num Nitossolo Vermelho distroférrico irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 273-281, 2009.

BRADFORD, J.M. Penetrability. In: KLUTE, A., ed. **Methods of soil analysis - physical and mineralogical methods**. 2 ed. Madison, ASA - SSSA. 1986. p.463-478.

BRADY, N.C. **Natureza e propriedades dos solos**. Rio de Janeiro, Livraria Freitas Bastos, 1989. 878p.

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

CAVALIERI, K.M.V.; TORMENA, C.A.; VIDIGAL FILHO, P.S.; GONÇALVES, A.C.A. & COSTA, A.C.S. Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p.137- 147, 2006.

CINTRA, F.L.D.; Disponibilidade de água no solo para porta-enxertos de citros em ecossistema de Tabuleiro Costeiro, 1997, 89 p. Tese **Doutorado** em Física do Solo pela Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1997.

CINTRA, F.L.D.; MELLO IVO, W.M.P. de; SILVA, L.V. da; LEAL, M. de, L. da. S. **Distribuição das raízes de cana-de-açúcar em sistemas e cultivo com adubação orgânica e *Crotalaria spectabilis***, Aracaju, 20 p. 2006. (Embrapa - Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 12).

COLLARES, G.L.; REINERT, D.J.; REICHERT, J. M. & KAISER, D.R. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. **Pesq. Agropec. Bras.**, v. 41, p. 1663-1674, 2006.

CORRÊA, M.M.; KER, J.C.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; CURI, N. & TORRES, T.C.P. Caracterização física, química, mineralógica e micromorfológica de horizontes coesos e fragipãs de solos vermelhos e amarelos do ambiente tabuleiros costeiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 32:297-313, 2008.

COTCHING, W.E. & BELBIN, K.C. Assessment of the influence of soil structure on soil strength/soil wetness relationships on Red Ferrosols in North-West Tasmania. **Aust. J. Soil Res.**, v. 45, p.147-152, 2007.

DE MARIA, I.C.; CASTRO, O.M. & SOUZA DIAS, H. Atributos físicos do solo e crescimento radicular da soja em Latossolo Roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 23, p.703-709, 1999.

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, 2004.

DOURADO NETO, D.; NIELSEN, D.R.; HOPMANS, J.W.; REICHARDT, K.; BACCHI, O.O.S.; LOPES, P.P. **Soil Water Retention Curve**. SWRC, version 3.00 beta. Piracicaba: Universidade de São Paulo, 2001.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro, RJ: 1997. 212p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Centro Nacional de Pesquisas de Solo. Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro, 1999. 412p.

FARIAS, L.I. Comportamento mecânico e hídrico de um argissolo amarelo de tabuleiros costeiros cultivado com cana-de-açúcar. 2012, 41f. Dissertação (Mestrado em Agroecossistemas) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE, 2012.

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 Sci. Soc. Am. Proc.**, v. 32, p. 180-186, 1968.

HAISE, H.R.; HAAS, H.J. & JENSEN, L.R. Soil mixture studies of some great plains soils. II. Field capacity as related to 1/ 3-atmosphere percentage, and “minimum point” as related to 15- and 26- atmosphere percentage. **Soil Sci. Soc. Proc.**, v. 34, p. 20-25, 1955.

HAMBLIN, A.P. The influence of soil structure on water movement, crop root growth and water uptake. **Adv. Av. Agron.**, v. 38, p. 95-158, 1985.

JACOMINE, P.K.T. Distribuição geográfica, características e classificação dos solos coesos dos Tabuleiros Costeiros. In: REUNIÃO TÉCNICA SOBRE SOLOS COESOS DOS TABULEIROS COSTEIROS – pesquisa e desenvolvimento para os Tabuleiros Costeiros. 1996. Cruz das Almas, BA. **Anais...** Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros. 80p. 1996.

KAISER, D. R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J. M.; COLLARES, G.L. & KUNZ, M. Intervalo hídrico ótimo no perfil explorado pelas raízes de feijoeiro em um

Latossolo sob diferentes níveis de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 845-855, 2009.

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

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.

LAPEN, D.R.; TOPP, G.C.; GREGORICH, E.G. & CURNOE, W.E. Least limiting water range indicators of soil quality and corn production, Eastern Ontario, Canada. **Soil Till. Res.**, v. 78, p. 151-170, 2004.

LEÃO, T.P. & SILVA, A.P. A simplified excel algorithm for estimating the least limiting water range of soils. **Sci. Agric.**, v. 61, p. 649-654, 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 & Till. Res.**, v. 88, p. 279-285, 2006.

LEÃO, T.P.; SILVA, A.P.; PERFECT, E. & TORMENA, C.A. An algorithm for calculating the least limiting water range of soils. **Agron. J.**, v. 97, p. 1210-1215, 2005.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop productions. **Adv. Soil Sci.**, v.1, p. 277-294, 1985.

LIMA NETO, J de A.; RIBEIRO, M. R.; CORRÊA, M.M.; SOUZA-JÚNIOR, V. S. de; ARAÚJO FILHO, J.C. de & LIMA, J.F.W.F. Atributos químicos, mineralógicos e micromorfológicos de horizontes coesos de latossolos e argissolos dos tabuleiros costeiros do estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol.34 no.2 Viçosa Mar./Apr. 2010.

MARQUES, J.D.O.; LIBARDI, P.L.; TEIXEIRA, W. G. & REIS, A.M. Estudo de parâmetros físicos, químicos e hídricos de um Latossolo Amarelo na região amazônica. **Acta Amazônica**, v. 34, p.145-154, 2004.

MEDEIROS, J.C.; SILVA, A.P.da.; CERRI, C.E.P., GIAROLA, N.F.B., FIGUEIREDO, G.C., e FRACETO, F.J.C. Linking physical quality and CO₂ emissions under long-term no till and conventional-till in a subtropical soil in Brazil. **Plant and soil**, v. 338, p. 5-15, 2011.

MELO FILHO, J. F.; DEMATTÊ, J. A. M.; LIBARDI, P. L. & PORTELA, J. C. Comportamento espectral de um latossolo amarelo coeso argissólico em função de seu uso e manejo. **Magistra**, v.16, n.2, p.105-112, 2004.

MOREAU, A.M.S.S. **Gênese, mineralogia e micromorfologia de horizontes coeso, fragipã e duripã em solos do tabuleiro costeiro no sul da Bahia.**

Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 2001. 138p. (Tese de Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas)

MOREAU, A.M.S.S.; KER, J.C.; COSTA, L.M. & GOMES, F.H. Caracterização de solos de duas topossequências em tabuleiros costeiros do sul da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 30:1007-1019, 2006.

MUALEM, Y. Hydraulic conductivity of unsaturated soils: prediction and formulas. In: KLUTE, A. (ed.). **Methods of Soil analysis I. Physical and mineralogical methods**. 2 ed. Madison: American Society of Agronomy; Soil Science Society of American, 1976, p.799-823.

OLIVEIRA, G.C.; DIAS JUNIOR, M.S.; RESCK, D.V.S. & CURI, N. Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 327-336, 2004.

OLIVEIRA, J.O.A.P.; VIDIGAL FILHO, P.S.; TORMENA, C.A.; PEQUENO, M.G.; SCAPIM, C. A.; MUNIZ, A. S. & SAGRILO, E. Influência do preparo do solo na produtividade da mandioca (*Manihot esculenta*, Crantz). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 443-450, 2001.

PAIVA, A.Q. **Dinâmica da água em uma topossequência de solos de tabuleiros do Estado da Bahia e sua implicação no crescimento da laranja**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1997. 74p. (Tese de Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas)

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

PEREIRA, P. V.; ORTIZ-ESCOBAR, M. E.; ROCHA, G. C.; ASSIS JUNIOR, R. N. e OLIVEIRA, T. S. Evaluation of soil physical quality of irrigated agroecosystems in a semi-arid region of North-eastern Brazil. **Soil Research**, v. 50, p. 455-464, 2012.

PEREIRA, P.V. **Avaliação da qualidade física de solos em áreas irrigadas na Chapada do Apodi**, Ceará. MSc Thesis, Universidade Federal do Ceará, Brazil, 2010.

PORTELA, C. J. Retenção da água em solo sob diferentes usos no ecossistema tabuleiros costeiros. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v.5. n.1, p. 49–54, 2001.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. (Orgs.) **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. v. 5, p. 49-134.

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

REICHERT, J.M.; REINET D.J. BRAIDA, J.A. Manejo, qualidade do solo e sustentabilidade: condições físicas do solo agrícola. **CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO**, 29, 2003. Ribeirão Preto. Palestras. Ribeirão Preto, SBCS, 2003 (CD-ROM).

REINERT, D. J., REICHERT, J. M. e SILVA, V. R. Propriedades físicas de solos em sistema de plantio direto irrigado. In: CARLESSO, R.; PETRY, M. T.; ROSA, G. M. e CERETTA, C. A. eds. **Irrigação por aspersão no Rio Grande do Sul**. Santa Maria, RS, 2001, 165 p.

REZENDE, J.O. **Solos coesos dos tabuleiros costeiros: limitações agrícolas e manejo**. Salvador: SEAGRI/SPA, 2000. (Série Estudos Agrícolas, 1)

REZENDE, J.O.; MAGALHÃES, A.F.J.; SHIBATA, R.T.; ROCHA, E.S.; FERNANDES, J.C.; BRANDÃO, F.J.C.; REZENDE, V.J.R.P. **Citricultura nos solos coesos dos tabuleiros costeiros: análise e sugestões**, Salvador : SEAGRI, SPA, 2002, 94p, (Série estudos agrícolas, 3).

RIBEIRO, L.P. Evolução da cobertura pedológica dos tabuleiros costeiros e a gênese dos horizontes coesos. In: WORKSHOP COESÃO EM SOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS, Aracaju, 2001. **Anais...** Aracaju, EMBRAPA Tabuleiros Costeiros, 2001. p.93-121.

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

RUIZ, H. A. Incremento da exatidão da análise granulométrica do solo por meio da coleta da suspensão (silte + argila). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 297-300, 2005.

SANTANA, M. B.; SOUZA, L. da S.; SOUZA, L.D. & FONTES, L.E.F. Atributos físicos do solo e distribuição do sistema radicular de citros como indicadores de horizontes coesos em dois solos de Tabuleiros Costeiros do estado da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 1-12, 2006.

SAVAGE, M.J.; RITCHIE, J.T.; BLAND, W.L. & DUGAS, W.A. Lower limit of soil water availability. **Agron. J.**, v. 88, p. 844-651, 1996.

SEI - **Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia**. Disponível em: www.sei.ba.gov.br. Acesso em 15 out. 2012.

SILVA, A. P.; TORMENA, C.A.; FIDALSKI, J.; IMHOFF, S. Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1-10, 2008.

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

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

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

SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; IMHOFF, S.C.; FIDALSKI, J. & NEVES JÚNIOR, A. Intervalo hídrico ótimo e sua importância para as plantas. In: RIBEIRO, M.R.; NASCIMENTO, C.W.; RIBEIRO FILHO, M.R. & CANTALICE, J.R.B., eds. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. v.6. p.1-30.

SILVA, F. B. R. et al. **Zoneamento Agroecológico do Nordeste: Diagnóstico do quadro natural e agrossocioeconômico**. Petrolina, PE: EMBRAPA CPATSA / Recife: EMBRAPA - CNPS. Coordenadoria Regional Nordeste, 1993. v2.il.

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, n. 168, 61-70, 2011.

SOARES NETO, J. P. & REZENDE, J. de O. **Determinação e disponibilidade de água em solos coesos dos tabuleiros costeiros do Estado da Bahia**. 2000. Disponível em: <<http://www.magistra.ufba.br>>. Acesso em 06 de agosto 2011.

SOUZA, A. L. V. **Avaliação da qualidade de um LATOSSOLO AMARELO Coeso argissólico dos Tabuleiros Costeiros, sob floresta natural**. 2005. 95f. Dissertação (Mestrado em Uso, Manejo e Conservação dos Recursos Naturais Solo e Água) – Escola de Agronomia, Universidade Federal da Bahia, Cruz das Almas, 2005.

SOUZA, L. S. Uso e manejo dos solos coesos dos tabuleiros costeiros. In: REUNIÃO TÉCNICA SOBRE SOLOS COESOS DOS TABULEIROS. Cruz das Almas, 1996. **Anais...** Cruz das Almas: EAUFBA/GVFBA, EMBRAPA/CNPMF, 1996, p. 36-75.

STONE, L.F. & SILVEIRA, P.M. Efeitos do sistema de prepare e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v, 25, p. 395-40, 2001.

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

TOPP, G.C.; GALGANOV, Y.T.; WIRES, K.C. & CULLEY, J.L.B. **Non limiting water range (NLWR): an approach for assessing soil structure.** - **Soil Quality Evaluation Program.** Agriculture and Agri-Food Canada, Ottawa, 1994. 36p.

TORMENA, C.A. & ROLLOF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 20, p. 333-339, 1996.

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**, Viçosa, v. 22, p. 573-581, 1998.

TORMENA, C.A.; ARAÚJO, M.A.; FIDALSKI, J. & COSTA, J.M. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférico sob sistemas de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 211-219, 2007.

TORMENA, C.A.; BARBOSA, C.M.; COSTA, A. C.S da; GONÇALVES, C.A. Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Sci. agric.**, Piracicaba, v. 59, n.4, 2002.

TORMENA, C.A.; 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 Till. Res.**, 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. **Sci. Agri.**, v. 65, p. 56-60, 2008.

VAN GENUCHTEN, M.T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 44, p. 892-898, 1980.