

CARACTERIZAÇÃO DO INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO DE TRÊS
SOLOS DA REGIÃO NORTE FLUMINENSE

MARCELO SOBREIRA DE SOUZA

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY
RIBEIRO – UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ
ABRIL – 2004

**CARACTERIZAÇÃO DO INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO DE TRÊS
SOLOS DA REGIÃO NORTE FLUMINENSE**

MARCELO SOBREIRA DE SOUZA

Tese apresentada ao Centro de Ciências e
Tecnologias Agropecuárias da Universidade
Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro,
como parte das exigências para obtenção do
título de Mestre em Produção Vegetal.

Orientador: Prof. Cláudio Roberto Marciano

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ
ABRIL – 2004

FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca do CCTA / UENF 0039/2004

Souza, Marcelo Sobreira de

Caracterização do intervalo hídrico ótimo de três solos da Região Norte Fluminense / Marcelo Sobreira de Souza. – 2004.

72 f. : il.

Orientador: Cláudio Roberto Marciano

Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias. Campos dos Goytacazes, RJ, 2004.

Bibliografia: f. 68 – 72.

1. Intervalo hídrico ótimo 2. Água disponível 3. Aeração do solo
4. Resistência à penetração 5. Densidade do solo 6. Retenção de
água. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro.
Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias. II. Título.

CDD – 631.4

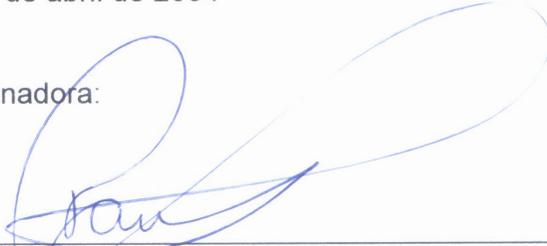
CARACTERIZAÇÃO DO INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO DE TRÊS SOLOS DA REGIÃO NORTE FLUMINENSE

MARCELO SOBREIRA DE SOUZA

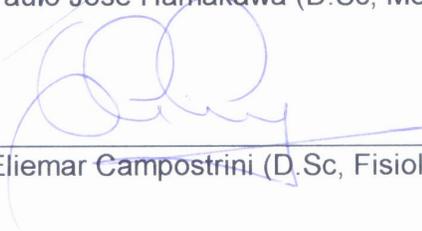
Tese apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal.

Aprovada em 20 de abril de 2004

Comissão Examinadora:



Prof. Dr. Paulo José Hamakawa (D.Sc, Meteorologia Agrícola) – UFV



Prof. Dr. Eliemar Campostrini (D.Sc, Fisiologia Vegetal) - UENF



Prof. Dr. Elias Fernandes de Souza (D.Sc, Engenharia Agrícola) - UENF



Prof. Dr. Cláudio Roberto Marciano (D.Sc, Solos e Nutrição de plantas) - UENF

Orientador

Este trabalho eu dedico às pessoas de grande importância na minha vida. Aos meus Pais, Manoel e Rosiane, pelo apoio e incentivo, e à minha irmã, Juliana, pelo companheirismo e amizade.

“Toda honra e toda glória seja dada ao senhor”

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela oportunidade de realização de um sonho.

Aos meus Pais, Manoel e Rosiane.

À minha irmã Juliana.

Aos meus Tios e Padrinhos Aderides e Rosilene e aos meus primos Francis e Flávia que sempre me apoiaram e ampararam.

Ao meu Avô Arinel (Neném) e as minhas Avós Maria (Bilica) e Aurora (Mãe Veia).

Ao Professor orientador Cláudio Roberto Marciano, pelos ensinamentos, sugestões, compreensão e amizade.

Aos professores Elias e Mazinho pela contribuição no trabalho.

Aos professores Eduardo Atem e Sérgio Tibana (CCT/UENF) pelo apoio na realização das análises.

Às técnicas do Laboratório de Solos, Kátia e Vanilda pela boa vontade demonstrada.

Aos amigos Giovani e Diego Firmino, pela ajuda nas análises.

À Edna, pelo apoio e incentivo.

Aos amigos do Laboratório de Solos.

Aos amigos de república Máskio e Marlon.

Ao Sr. Gonçalo de La Riva, proprietário da Fazenda Taí.

À Pesagro, pelo seção da área experimental para coleta de amostras.

À Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro.

À FAPERJ pela concessão da bolsa.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE SÍMBOLOS.....	vi
RESUMO.....	viii
ABSTRACT.....	x
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 Solos do Norte Fluminense.....	3
2.1.1 Caracterização dos solos de Tabuleiros Costeiros.....	3
2.1.2 Caracterização dos solos da Baixada Campista.....	5
2.1.3 Solos da Serra.....	5
2.2 Atributos físicos do solo e crescimento de plantas.....	6
2.2.1 Disponibilidade de água.....	7
2.2.1.1 Capacidade de campo (CC).....	7
2.2.1.2 Ponto de murcha permanente (PMP).....	8
2.2.1.3 Capacidade de água disponível (CAD).....	10
2.2.2 Aeração do solo.....	11
2.2.3 Resistência mecânica do solo à penetração.....	14
2.3 O intervalo hídrico ótimo (IHO).....	17
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	20

3.1 Caracterização das áreas experimentais.....	20
3.2 Amostragem.....	21
3.3 Determinações.....	22
3.3.1 Atributos químicos.....	22
3.3.2 Atributos físicos.....	22
3.4 Apresentação dos dados.....	31
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	32
4.1 Atributos morfológicos, químicos e físicos dos solos e sua classificação pelo Sistema Brasileiro (Embrapa, 1999).....	32
4.2 Densidade, porosidade total, curva de retenção de água no solo e atributos físicos relacionados.....	37
4.3 Resistência à penetração.....	45
4.4 Intervalo hídrico ótimo (IHO).....	50
5. RESUMO E CONCLUSÕES.....	66
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	68

LISTA DE SÍMBOLOS

θ = umidade volumétrica

θ_S = umidade volumétrica do solo saturado

θ_r = umidade volumétrica residual

θ_{CC} = umidade na capacidade de campo

θ_{PMP} = umidade no ponto de murcha permanente

θ_{AR} = umidade na qual a porosidade de aeração atinge um valor crítico a oxigenação do sistema radicular

θ_{RP} = umidade na qual a resistência mecânica do solo à penetração assume um valor limitante ao desenvolvimento do sistema radicular das plantas

$\theta_{50\% AD}$ = umidade na qual 50% da água disponível é consumida

ϕ_m = potencial mátrico da água no solo

$\phi_{m50\% AD}$ = potencial mátrico correspondente ao consumo de 50% da água disponível

ρ = densidade do solo

ρ_a = densidade da água

ρ_S = densidade das partículas

ρ_{AR} = valor de densidade onde θ_{AR} substitui θ_{CC} no IHO

ρ_{RP} = valor de densidade onde θ_{RP} substitui θ_{PMP} no IHO

ρ_C = valor crítico de densidade do solo onde o IHO se iguala a zero

α = parâmetro de ajuste do modelo de Van Genuchten (1980)

τ = tensão da água no solo

a = parâmetro de ajuste do modelo de Busscher (1990)
AD = água disponível
b = parâmetro de ajuste do modelo de Busscher (1990)
c = parâmetro de ajuste do modelo de Busscher (1990)
CC = capacidade de campo
IHO = intervalo hídrico ótimo
m = parâmetro de ajuste do modelo de Van Genuchten (1980)
 m_a = massa de água da amostra
 $\text{máx}(\theta_{\text{PMP}}; \theta_{\text{RP}})$ = maior valor entre θ_{PMP} e θ_{RP}
 $\text{mín}(\theta_{\text{CC}}; \theta_{\text{AR}})$ = menor valor entre θ_{CC} e θ_{AR}
MS = massa das partículas (massa do solo seco em estufa)
n = parâmetro de ajuste do modelo de Van Genuchten (1980)
PMP = ponto de murcha permanente
PT = porosidade total
 PT_{AR} = valor de porosidade total onde θ_{AR} substitui θ_{CC} no IHO
 PT_{RP} = valor de porosidade total onde θ_{RP} substitui θ_{PMP} no IHO
 PT_{C} = valor crítico de porosidade total onde o IHO se iguala a zero
VS = volume ocupado pelas partículas do solo
 $V_{\text{álcool}}$ = volume de álcool gasto na determinação da densidade de partículas
V = volume do anel volumétrico
 V_a = volume de água

RESUMO

SOUZA, Marcelo Sobreira de; Eng^o Agrônomo; M.Sc.; Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro; Abril de 2004. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de três solos da Região Norte Fluminense. Orientador: Cláudio Roberto Marciano.

As condições físicas do solo favoráveis para o crescimento de plantas têm sido associadas a uma porosidade de aeração mínima necessária para a adequada difusão de oxigênio no solo, a uma faixa de resistência mecânica não limitante à penetração de raízes e a uma ampla disponibilidade de água no solo entre a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP). O intervalo hídrico ótimo (IHO) integra três dos principais fatores físicos relacionados com o crescimento de plantas: a água, a aeração e a resistência do solo à penetração. O objetivo desse estudo foi fazer a caracterização física de três solos da Região Norte Fluminense, particularmente através da determinação da densidade do solo, da porosidade total, da retenção de água e da resistência à penetração, atributos estes necessários à obtenção do intervalo hídrico ótimo. O trabalho foi realizado a partir de amostras coletadas em perfis de solo de três áreas na Região Norte Fluminense. Duas dessas áreas estão inseridas na Baixada Campista, sendo que a área 1, com solo de textura areia, está localizada na Fazenda Taí (estrada Barcelos-Paineiras, Município de São João da Barra, RJ), e a área 2, com solo de textura argila, na Estação Experimental da PESAGRO-Rio (área urbana de Campos dos Goytacazes, RJ). A área 3 está

inserida no ecossistema dos Tabuleiros Costeiros, localizando-se no Colégio Estadual Agrícola Antonio Sarlo, em Campos dos Goytacazes, RJ, e apresentando textura argila. As amostras foram retiradas em camadas de 0,10 m de espessura até a profundidade de 1,50 m, sendo as deformadas utilizadas para a determinação da densidade de partículas, da composição granulométrica e para a caracterização química do solo. As amostras indeformadas foram utilizadas para a determinação da densidade do solo e das curvas de retenção de água e resistência do solo à penetração em função do potencial mátrico. A porosidade total foi calculada a partir da densidade de partículas e da densidade do solo, enquanto o IHO foi estimado tendo como limite superior a umidade na CC ou aquela na qual a porosidade de aeração assume o valor crítico 10% (a que for menor) e como limite inferior a umidade no PMP ou aquela na qual a resistência à penetração atinja 3 MPa (a que for maior). Os resultados foram expressos segundo os horizontes identificados na descrição morfológica dos perfis do solo. O solo da área 1, devido à sua textura arenosa, apresentou baixa capacidade de armazenamento de água, enquanto os solos das áreas 2 e 3, em função da sua textura mais pesada, mostraram altas taxas de retenção e armazenamento de água. Os solos das três áreas apresentaram, no entanto, baixa quantidade de água disponível. Para o solo da área 1 o IHO foi igual à água disponível (AD), ou seja, correspondeu ao intervalo da umidade entre CC e o PMP, de modo que esse solo não apresentou problemas de porosidade de aeração e resistência à penetração. Para os solos das áreas 2 e 3 o IHO correlacionou-se negativamente com a densidade do solo, mostrando o efeito da estrutura nas propriedades físicas do solo. No solo da área 2, 65% das amostras apresentaram problemas de resistência à penetração mesmo em valores de umidade acima do PMP, enquanto 45,5% das amostras tiveram porosidade de aeração menor que 10% na umidade correspondente à CC. No solo da área 3, nenhuma amostra apresentou problemas de aeração, mas todas apresentaram valores de resistência à penetração maiores que 3 MPa em umidades acima do PMP (ou seja, θ_{RP} sempre substituiu θ_{PMP} como limite inferior de umidade do IHO).

ABSTRACT

SOUZA, Marcelo Sobreira de; Agronomy Engineer, M.Sc., Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, April 2004. Characterization of least limiting water range of three soils from the North Fluminense Region. Adviser: Cláudio Roberto Marciano.

The optimal physical soil conditions to the vegetables growth has been associated to: (i) a minimum aeration porosity to an adequate soil oxygen diffusion; (ii) a range of mechanic resistance non-restrictive to root penetration; and, (iii) a wide water availability in soil, between field capacity (FC) and the wilting permanent point (WP). The least limiting water range (LLWR) integrates three main physical factors related to the plant growth: the water, the aeration, and the soil penetration resistance. The aim of this work was to characterize physically three soils from the North Fluminense Region, by determining soil density, soil porosity, water retention, and the resistance to penetration. These physical soil characteristics are essential to determine the LLWR. Soil samples were collected in different layers from three areas in the North Fluminense Region: area 1 – sandy texture soil, localized at the Taí Farm (Barcelos-Paineiras road, São João da Barra City, RJ); area 2 – clay texture soil, localized at the PESAGRO–Rio Experimental Station (Campos dos Goytacazes/RJ urban area); and, area 3 –clay texture soil, localized at the Antônio Sarlo State Agricultural College, in Campos dos Goytacazes, RJ. The areas 1 and 2 are inserted in the Baixada Campista

Ecosystem, while the area 3 is inserted in Tabuleiros Costeiros Ecosystem. The soil samples were taken from surface until to 1.50 m depth, in layers of 0.10 m. The deformed soil samples were used to determine the particle density, the granulometric composition, and the soil chemical properties. On the other hand, the undeformed soil samples were used to determine the soil density and the water retention and the soil penetration resistance curves (both based in the matric potential). The total porosity was calculated from the particles density and the soil density. The LLWR was estimated with the upper limit being the water content at FC or that in which the aeration porosity assumes a critic value of 10% (the smallest); and the lower limit being the water content at WP or that in which the penetration resistance reaches 3 MPa (the highest). The results were expressed according to the identified horizons during soil profile morphological description. The area 1 soil, due its sandy texture, had lower water storage capacity, while areas 2 and 3 soils, due their texture, had higher water storage rates. The soils of areas 1, 2 and 3, however, presented low amount of available water. The LLWR in the area 1 soil was equal to the available water (AW), i.e., corresponded to the water content interval between FC and WP. Thus, this soil doesn't have problems on its aeration porosity and penetration resistance. The LLWR in the areas 2 and 3 soils had a negative correlation with the soil density, showing the effects of soil structure on the soil physical properties. In area 2, 65% of the soil samples presented penetration resistance problems even at soil water content values upper than WP, while 45.5% of the soil samples had its aeration porosity lower than 10% at soil water content corresponding to FC. In area 3, the soil samples did not present any aeration problems, however all of them showed penetration resistance bigger than 3 MPa at soil water content values upper than WP (that is, θ_{RP} always change θ_{WP} as the LLWR humidity lower limit).

1 INTRODUÇÃO

A diversificação da agricultura na Região Norte Fluminense tem sido considerada uma opção para gerar emprego, aumentar a renda familiar e diminuir o êxodo rural, auxiliando, desta forma, na solução dos problemas causados pela decadência do setor sucro-alcooleiro. De acordo com esta tendência, o Governo do Estado do Rio de Janeiro implantou em 2000 um programa para financiar a expansão da fruticultura irrigada na região, particularmente as culturas do coqueiro, maracujá, goiaba e abacaxi.

A Região Norte Fluminense apresenta boas condições climáticas para a implantação dessas culturas. Dentre as principais limitações a serem vencidas, pode-se destacar a inadequada quantidade (em torno de 800 mm por ano) e a má distribuição da precipitação pluviométrica ao longo do ano que caracteriza a região. Nesta região, portanto, a fruticultura obrigatoriamente deve vir acompanhada da irrigação, o que torna possível corrigir o problema do fornecimento de água às culturas. O fator que viabiliza a implementação da irrigação é a abundância de recursos hídricos, que inclui as bacias hidrográficas dos rios Paraíba do Sul e Macaé e as águas dos aquíferos não confinados da Baixada dos Goytacazes, área esta recortada por uma vasta rede de canais de drenagem e/ou irrigação.

Do ponto de vista geomorfológico, o Norte Fluminense apresenta basicamente 3 ambientes distintos: a serra, o tabuleiro e a baixada. Isso resulta numa grande diversidade de solos e, conseqüentemente, de condições edafoclimáticas a que as culturas podem estar submetidas. Portanto, o sucesso

dessas culturas está ainda na dependência da adequação de algumas técnicas culturais, dentre elas a irrigação.

A capacidade do solo em promover ao sistema radicular condições físicas adequadas para o crescimento e desenvolvimento das plantas é denominada qualidade física do solo. As condições físicas do solo favoráveis para o crescimento de plantas têm sido associadas a uma porosidade de aeração mínima necessária para a adequada difusão de oxigênio no solo, a uma faixa de resistência mecânica não limitante à penetração das raízes e a uma ampla disponibilidade de água no solo entre a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP). No entanto, esses fatores atuam simultaneamente por meio de interações complexas, de modo que uma modificação da umidade do solo promove modificações não só na disponibilidade de água, mas também na aeração e na resistência do solo à penetração das raízes.

A complexidade dessas interações exige que a condição física do solo seja avaliada através de um conjunto de parâmetros que integrem as ações de diversos fatores, permitindo quantificar, de maneira apropriada, o ambiente físico na zona radicular dos solos. O intervalo hídrico ótimo (IHO) integra três dos fatores físicos relacionados com o crescimento de plantas: a água, a aeração e a resistência do solo à penetração. É portanto, um parâmetro promissor tanto para a avaliação da qualidade física do solo quanto para ser utilizado na definição do manejo da irrigação.

A manutenção da umidade do solo dentro de limites adequados ao crescimento e ao desenvolvimento da cultura carece ainda da definição de critérios que possibilitem maximizar a produtividade das culturas e evitar o desperdício de água de irrigação.

O objetivo desse estudo foi caracterizar fisicamente três solos da Região Norte Fluminense, particularmente através da determinação da densidade do solo, da porosidade total, da retenção de água e da resistência à penetração, atributos estes necessários à obtenção do intervalo hídrico ótimo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Solos do Norte Fluminense

Do ponto de vista geomorfológico, o Norte Fluminense apresenta, basicamente, 3 ambientes distintos (a serra, o tabuleiro e a baixada), o que resulta numa grande diversidade de solos. A seguir, serão apresentadas as caracterizações desses solos.

2.1.1 Caracterização dos solos de Tabuleiros Costeiros

Os solos de tabuleiro estão distribuídos por quase toda a faixa costeira do Brasil, desde o Estado do Amapá até o Estado do Rio de Janeiro, com extensão até o vale do Rio Paraíba do Sul, no Estado de São Paulo. Estima-se que no Brasil, as áreas de latossolos, argissolos e outros solos provenientes de sedimentos Barreiras ou similares atinjam extensão de 20000 km².

O termo “Tabuleiros Costeiros” é utilizado para designar uma forma de superfície do tipo tabular, dissecada por vales profundos e encostas com forte declividade. De um modo geral, os tabuleiros costeiros têm topografia plana e com menor freqüência suavemente ondulada. Estão relacionados com os sedimentos da Formação Barreiras do Terciário (Jacomine, 2001).

Desde o litoral do Nordeste até a Região de Campos, no Estado do Rio de Janeiro, tradicionalmente os tabuleiros são cultivados com cana-de-açúcar, mas a fruticultura tropical atualmente é praticada em todas as áreas dos tabuleiros costeiros.

Nos tabuleiros prevalecem duas classes de solos, a dos latossolos amarelos e a dos argissolos amarelos. Dentre os latossolos, os amarelos de tabuleiros são os que apresentam, em condições naturais, o caráter coeso, ou seja, presença de horizonte(s) de consistência dura ou muito dura quando seco, e geralmente friável quando úmido. Em geral, a parte coesa coincide com uma faixa compreendida entre 0,2 e 0,6 m, podendo atingir até maiores profundidades. Essa parte endurecida corresponde normalmente aos horizontes AB (A3) e/ou BA (B1), podendo chegar ao topo do Bw. Os latossolos amarelos são os que apresentam maior densidade do solo, com valores variando de 1,30 a 1,60 Mg m⁻³ (nos horizontes AB, BA e Bw), e, conseqüentemente, menor porosidade total, cujos valores estão, em geral, compreendidos entre 40 e 50% (Jacomine, 2001).

Quanto às propriedades químicas, os latossolos amarelos são solos ácidos a fortemente ácidos, com pH em água normalmente com valores entre 4,0 e 5,0. Em geral, contêm alumínio trocável e são álicos. A CTC (valor T) é muito baixa e, normalmente, está abaixo de 6,5 cmol_c kg⁻¹ de argila, descontada a contribuição do carbono. A mineralogia das frações areia (grossa e fina), registra predomínio quase absoluto do quartzo, com valores entre 95 e 100 %, e quanto a mineralogia da fração argila, há o predomínio da caulinita, com percentagem entre 70 e 90%.

Os argissolos amarelos são distintos dos latossolos amarelos pelo gradiente textural mais alto nos argissolos, indicando que nestes há maior concentração de argila no Bt, muitas vezes, com mudança textural abrupta. O caráter coeso dos argissolos, além de estar presente logo abaixo do horizonte A, atinge maior profundidade do horizonte B em comparação aos latossolos.

Com relação às principais limitações ao uso agrícola dos tabuleiros, Souza (1996) afirma que, apesar desses solos serem considerados profundos, possuem uma pequena profundidade efetiva, resultante da presença de horizontes coesos e adensados, prejudicando a dinâmica de água no perfil e, principalmente, o aprofundamento do sistema radicular, agravando suas limitações ao desenvolvimento vegetal.

2.1.2 Caracterização dos solos da Baixada Campista

A Baixada dos Goitacazes ou Baixada Campista compõe uma das três macropaisagens da Região Norte Fluminense. É geograficamente definida entre as coordenadas 21° 25' e 22° 15' S e 40° 55' e 41° 40' W. As cotas mais elevadas com referência ao nível do mar são de 12 metros.

É uma bacia sedimentar deltaica do Rio Paraíba do Sul, que se inicia no seu curso inferior, nas proximidades de Itaocara, em trecho com declividade média de 0,20 m km⁻¹.

O trabalho mais completo da área em estudo foi realizado pelo antigo Instituto do Açúcar e do Alcool do Ministério da Indústria e Comércio, constando de uma pesquisa multidisciplinar na qual se incluiu um levantamento de solos em nível semi-detalhado, abrangendo uma área aproximada de 245000 ha (IAA/MIC, 1985, citado por Ravelli Neto, 1989). Neste levantamento foram descritas 62 classes de solos desenvolvidos na Baixada dos Goitacazes, utilizando-se as normas do Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. As principais classes de solo encontradas na área são (Ravelli Neto, 1989): Aluvial com argilas de atividades média, alta e baixa, caráter eutrófico, distrófico e álico, caráter salino, sódico e solódico, em diversas classes de textura; Areia quartzosa distrófica; Cambissolo com argila de atividade média, alta e baixa, caráter eutrófico, distrófico e álico, caráter sódico e solódico, em diversas classes de textura; Podzol hidromórfico; Glei húmico com argilas de atividades média, alta e baixa, caráter distrófico, álico e eutrófico, caráter salino e solódico, em diversas classes de textura; Glei pouco húmico com argilas de atividades alta, média e baixa, caráter eutrófico, distrófico e álico, caráter solódico e ligeiramente salino, em diversas classes de textura; Glei salino sem e com caráter solódico e diferentes classes de textura; Glei tiomórfico salino com argilas de atividades alta, textura argilosa; Solos orgânicos com caráter distrófico, salino, ligeiramente salino e tiomórfico.

2.1.3 Solos da Serra

Na Serra do Mar, onde se expõe o embasamento cristalino (chamado Complexo Cristalino Brasileiro), predomina os solos como

Latossolos Vermelhos, Latossolos Vermelho-Amarelos, Argissolos Vermelhos, Argissolos Vermelho-Amarelos, Nitossolos, Alissolos, Chernossolos, Cambissolos e Neossolos Litólicos.

2.2 Atributos físicos do solo e crescimento de plantas

Dos atributos físicos do solo, alguns podem ser definidos apenas em função do tamanho, da forma e/ou da natureza das suas partículas. A densidade de partículas por exemplo, depende apenas da natureza química/mineralógica dessas partículas. Já sua composição granulométrica, classe textural e superfície específica, dependem do tamanho e a forma das partículas.

A maioria dos atributos físicos do solo, no entanto, depende não só das características das partículas, mas também, de como estas estão arranjas espacialmente. Nesse conjunto podem ser citados, dentre outros: (i) a densidade do solo; (ii) a porosidade total e atributos a ela associadas, como macroporosidade, microporosidade e distribuição de poros por tamanho; (iii) a retenção de água e, por associação, a capacidade de campo, o ponto de murcha permanente e a capacidade de água disponível; (iv) a infiltração, a condutividade e a difusividade da água no solo, ou outro atributo relativo à dinâmica da água; (v) a porosidade de aeração e outros atributos relativos ao conteúdo e dinâmica do ar do solo, ou de um de seus componentes; (vi) a resistência mecânica do solo à penetração, ruptura, cisalhamento, compressão, entre outros; (vii) as propriedades térmicas do solo, relativas ao armazenamento e transferência de calor.

Usando o crescimento de plantas como referência, Letey (1985) classifica os atributos físicos do solo em dois grupos: os que afetam diretamente o crescimento e os que afetam indiretamente. Segundo Letey (1985), no primeiro grupo estariam inclusas a disponibilidade de água, a aeração, a temperatura e a resistência mecânica, enquanto os demais atributos físicos estariam no segundo grupo. Num segundo momento de seu trabalho, após a constatação da interdependência entre os atributos do solo e, especialmente, da dependência de todos em relação à umidade do solo, Letey (1985) propõe o estabelecimento de uma faixa de umidade não limitante ao crescimento das plantas (NLWR – non limiting water range). Alguns anos depois, diversos trabalhos buscaram viabilizar

a determinação da faixa de umidade sugerida por Letey, adotando valores críticos para a resistência mecânica, aeração e energia de água (Silva et al., 1994; Silva e Kay, 1997a; Silva e Kay, 1997b). Sugerem ainda, que a faixa de umidade passe a ser chamada de LLWR (least limiting water range). Em português, Tormena et al. (1998), utilizaram o termo **intervalo hídrico ótimo (IHO)**.

2.2.1 Disponibilidade de água

2.2.1.1 Capacidade de campo (CC)

O estudo da água no solo vem evoluindo com o tempo. Em 1897, Briggs classificou a água do solo, segundo a sua natureza, em água gravitacional, capilar e higroscópica. A idéia de quantificar a capacidade do solo em termos de retenção de água foi lançada no início do século passado por Alway e Mcdole (1917). As principais contribuições foram de Viehmeyer e Hendrickson (1931, 1949), que introduziram definitivamente o conceito hoje conhecido como capacidade de campo. Segundo a definição desses autores, apresentada em Reichardt (1988), é a quantidade de água retida pelo solo depois que o excesso tenha drenado e a taxa de movimento descendente tenha decrescido acentuadamente, o que geralmente ocorre dois a três dias depois de uma chuva ou irrigação em solos permeáveis de estrutura e textura uniformes. Essa definição, sugere que a determinação direta da capacidade de campo deva ser feita saturando-se o perfil do solo e acompanhando sua umidade, mostrando claramente que este conceito se refere a um comportamento dinâmico do perfil do solo no que concerne à distribuição de água, e não a uma característica intrínseca.

A definição de Viehmeyer e Hendrickson (1949), apesar de dinâmica, é imprecisa, empregando termos como “excesso de água”, “decréscimo acentuado”, “geralmente”, “solos permeáveis de estrutura e textura uniformes”. Talvez, em virtude desta definição imprecisa, a capacidade de campo é, às vezes, mal entendida como o teor de água que o solo pode reter contra a força da gravidade, enquanto se comprova fisicamente que uma coluna semi-infinita de solo perderá toda a sua água por drenagem, não retendo nada contra a gravidade (Reichardt, 1988).

A dificuldade de se estabelecer um bom parâmetro para o limite superior de umidade de um solo verifica-se pelas limitações na retenção de água pelo solo, que fazem com que uma parte da porosidade total, quando saturada com água, venha a perder essa água rapidamente por drenagem. Foi o reconhecimento da importância desse processo resultou na conceituação de capacidade de campo (Veihmeyer e Hendrickson, 1931, 1949).

Vários métodos de laboratório foram desenvolvidos para a determinação da capacidade de campo, pressupondo que esta é uma característica intrínseca do solo independente do método de medida. Eles incluem o teor de água em equilíbrio de amostras de solo pré-saturado e sujeitas a uma aceleração centrífuga de 1000 vezes a gravidade (umidade equivalente correspondente à sucção de 1/3 atm) ou equilíbrio em câmaras de pressão de Richards com placas porosas com pressões de 6, 10, 33 kPa (aproximadamente 0,06, 0,10, 0,33 atm, respectivamente).

A tensão comumente utilizada como equivalente a capacidade de campo é de 10 kPa para solos arenosos e de 33 kPa para solos argilosos. Dessa forma, devido à grande quantidade de água normalmente retida entre 33 kPa e 10 kPa, é necessário definir com precisão a tensão na qual a capacidade de campo será estipulada para cada tipo de solo. Em solos de textura grossa (arenosos), geralmente a redução da intensidade de movimento com a diminuição da umidade do solo, abaixo de certos valores, apresenta uma faixa de transição nítida, tornando a capacidade de campo bem definida nestes tipos de solos; porém em alguns solos de textura fina (argilosos), não há nítida faixa de transição na redução da intensidade de movimento de água, tornando o conceito de capacidade de campo pouco preciso.

2.2.1.2 Ponto de murcha permanente (PMP)

A definição do ponto de murcha permanente surgiu também no início do século passado em trabalhos de Briggs e Shants (1912), sendo considerado como o conteúdo de água no solo quando as plantas que nele se desenvolvem adquirem um estado de murchamento permanente, ou seja, não voltando à turgidez mesmo quando colocadas em atmosfera saturada de umidade (ex: estufa com umidade relativa do ar igual a 100%).

O ponto de murcha permanente é usado para representar o teor de umidade no solo em que, abaixo dele, a planta não conseguirá retirar a água do solo para recuperar a sua turgidez. Este conceito é muito útil, mas, deve-se lembrar que o seu valor depende do tipo de solo e que diferentes plantas têm a capacidade de extrair água em diferentes limites de umidade (Bernardo, 1995).

De modo geral, os vegetais cultiváveis não diferem muito no que diz respeito ao ponto de murcha permanente, mas existem plantas que podem sobreviver com déficit de água no solo muito intenso, enquanto outras, cessam de crescer bem antes de apresentar sinais de murchamento. Desde que os sintomas de deficiência hídrica podem variar em diferentes plantas, normalmente utiliza-se o girassol como planta indicadora do ponto de murcha permanente, em casa-de-vegetação (Bernardo, 1995).

A umidade do solo sob tensão de 1500 kPa é aceita por muitos pesquisadores como sendo correspondente ao PMP. Pouco se questiona esse valor, pelo fato do PMP ser considerado de menor importância por estar fora da faixa de umidade que ocorre, normalmente, em solos agrícolas. Seu valor é utilizado apenas para caracterizar o solo em termos da sua capacidade de água disponível, ocorrendo erros na estimativa com muito maior facilidade no limite superior (capacidade de campo) do que no limite inferior (ponto de murcha permanente). Isso ocorre, porque para a maioria dos solos, a inclinação da curva de retenção ($d\theta/d\phi$) é, para as altas tensões, muito próximo a zero, fazendo com que grandes variações de potencial matricial causem pequenas variações na umidade (Jong van Lier, 2000). Portanto, para variações fixas da tensão da água acima de 500 kPa, para solos arenosos, ou acima de 1000 kPa em solos argilosos, as alterações no teor de água são geralmente muito pequenas.

Sendo assim, o PMP ocorre em uma faixa de umidade tal que, para um grande acréscimo de tensão, será pequena a variação no teor de umidade. Isto explica a existência do ponto de murcha e porque ele é considerado, na prática, uma característica do tipo de solo e não do tipo de planta.

Para a determinação do PMP são utilizados métodos de laboratório – como o equilíbrio em câmaras de pressão com placas porosas ou em centrífuga (1500 kPa), métodos teóricos – como o do ponto inflexão da curva de retenção, e o método direto, através do cultivo do girassol em vasos na estufa. As

dificuldades advindas da aplicação dessas metodologias são, de fato, outro fator responsável pelo PMP não ser determinado mais criteriosamente.

2.2.1.3 Capacidade de água disponível (CAD)

As umidades do solo na CC e no PMP são utilizadas para calcular a capacidade de água disponível para as plantas. Segundo critérios estabelecidos classicamente, a expressão “água disponível” (AD), foi definida como sendo o intervalo de umidade entre a CC e o PMP, respectivamente os limites superior e inferior de disponibilidade hídrica.

De acordo com Hillel (1982), o conceito de disponibilidade de água no solo foi, durante muitos anos, motivo de controvérsias entre os seguidores de diferentes escolas. Viehmeyer e Hendrickson (1927), afirmavam que a umidade do solo é igualmente disponível desde a correspondente à CC até a correspondente ao PMP, e que as funções da planta prosseguem normalmente, enquanto a umidade do solo permanece acima do PMP. Segundo tal ponto de vista, somente quando o PMP é alcançado é que a atividade da planta decresce, em geral, abruptamente.

Richards e Wadleigh, citados por Hillel (1982), discordaram desse ponto de vista e afirmaram que a disponibilidade de água diminuiria gradualmente com o decréscimo do teor de água no solo, podendo as plantas sofrerem estresse muito antes de começarem a murchar. Outros autores procuraram uma posição intermediária, apresentando uma faixa de umidade prontamente disponível que se separa, por um ponto crítico, da faixa de umidade decrescentemente disponível.

Entretanto, os conceitos acima mencionados não foram baseados em estruturas teoricamente compreensíveis, que pudessem levar em consideração o conjunto de fatores que afetam o regime hidráulico do sistema solo-planta-atmosfera como um todo.

Atualmente, a disponibilidade de água do solo às plantas é vista de maneira dinâmica, podendo variar de situação para situação, para o mesmo solo e a mesma planta. Dentro do contexto atual, Reichardt (1978), define a disponibilidade de água da seguinte maneira: “toda vez que o fluxo de água do solo para a raiz for de uma intensidade tal que supere a demanda de água da planta e da atmosfera, a água é disponível”.

2.2.2 Aeração do solo

A aeração do solo é o processo das trocas dos gases consumidos e produzidos abaixo da superfície do solo com os gases da atmosfera (Gavande, 1972).

O espaço poroso entre as partículas do solo é preenchido por quantidades de água e ar (Libardi, 1995). Por hipótese, poder-se-ia admitir que a composição do ar atmosférico é constante/inalterável ao longo do tempo, e que não há produção ou consumo de gases pela atividade biológica abaixo da superfície do solo. Nesse caso, havendo a continuidade entre a atmosfera e o ar do solo, a difusão dos gases regida pela Lei de Fick, levaria a que as composições desses dois ambientes se equilibrassem.

No entanto, as duas hipóteses levantadas no parágrafo anterior não resistiriam a qualquer tentativa de comprovação. Particularmente, com relação ao ar do solo, mesmos nas condições mais adversas pode-se verificar reações biológicas que, em sua maioria, consomem oxigênio (O_2) e produzem, como subproduto, dióxido de carbono (CO_2). Este processo, conhecido como respiração aeróbica, leva a diferenças significativas entre a composição do ar atmosférico e o do solo, apresentando este último, teores mais baixos de oxigênio e mais elevados de CO_2 e vapor d'água. Enquanto na atmosfera a concentração de CO_2 é de 0,03%, no ar do solo pode ascender a 1% e, em casos extremos, até 3%.

Estes gradientes de pressão parcial estabelecem o sentido do movimento, sendo o do O_2 da atmosfera para o ar do solo e o do CO_2 do solo para a atmosfera. O fluxo, no entanto, é determinado não só pelo gradiente, mas também pela condutividade gasosa do solo.

Esta condutividade, por outro lado, depende da quantidade e da configuração geométrica dos poros livres de água. Em última análise, a condutividade gasosa é determinada pela composição granulométrica, pela condição de compactação e pelo conteúdo de água do solo.

Quanto maior a umidade do solo, menor a sua condutividade gasosa e maiores gradientes de pressão são requeridos para manter um determinado fluxo. O mesmo raciocínio pode ser empregado para solos de textura fina ou compactados que apresentam baixa macroporosidade. Maiores gradientes resultam em mais acentuado decréscimo da pressão parcial de O_2 e acréscimo na

de CO₂ com a profundidade, é por essa razão, que condições de alta umidade, textura fina e compactação do solo geralmente são associadas à aeração deficiente, fazendo com que parte do sistema radicular, em maior profundidade, possa experimentar deficiência de oxigênio.

Para um adequado manejo agrícola do solo as limitações na aeração devem ser consideradas quando se define o limite superior de umidade, pois elas podem prejudicar o desenvolvimento das plantas (Jong van Lier, 2001). O efeito da aeração do solo no crescimento das plantas superiores pode dividir-se, em geral, em duas categorias:

- a) efeito sobre os constituintes do solo que, por sua vez, influenciam no crescimento; e
- b) efeito direto nas condições fisiológicas das plantas.

A aeração dos solos é de grande importância para o desenvolvimento dos vegetais e microrganismos do solo, condicionando-lhes diretamente a vida neste ambiente, mediante adequado balanceamento e suprimento da relação oxigênio / gás carbônico. Camargo (1983) cita que a formação de substâncias tóxicas aos vegetais (nitrito, ácido sulfídrico, etileno, Fe⁺⁺, etc.), alterações de pH e disponibilidade de nutrientes são aspectos muito influenciados pela aeração do solo. Como essa aeração é muito dependente da porosidade do mesmo, a compactação, ao alterá-la, modifica também o ambiente próximo das raízes (Reichardt, 1975).

Um solo produtivo deve estar suficientemente aerado, livre de substâncias tóxicas e providos adequadamente de água e nutrientes. A raiz absorve o oxigênio (O₂) e elimina gás carbônico (CO₂). Também os microrganismos que vivem na rizosfera, aproveitando-se das excreções radiculares, produzem CO₂, de modo que, o ambiente logo estaria saturado de gás carbônico se não houvessem trocas gasosas permanentes. Para isso, necessita-se que a circulação do ar remova o gás carbônico para fora do solo e substitua-o por oxigênio.

Quando um solo for bem agregado e grumoso, existe um número suficiente de poros de ventilação para garantir a oxigenação da raiz. Quando, porém, o solo se tornar compacto (com a diminuição da porosidade total, em virtude da diminuição dos macroporos, sempre mais atingidos e, conseqüentemente, de um pequeno aumento do número de pequenos poros), o CO₂ se acumula no solo e a raiz sofre seu efeito desfavorável. Em solos

anaeróbios as plantas aumentam a respiração fermentativa por falta de oxigênio no solo. E, como este processo se produz muito pouca energia, a respiração é acelerada de modo a mobilizar mais energia. O gasto de produtos fotossintetizados é elevado e o desenvolvimento vegetal é reduzido, por ter poucos produtos fotossintetizados a metabolizar e todos os processos de síntese são lentos, de modo que, raramente, chega-se à formação de proteínas e carboidratos mais complexos, promovendo assim, a diminuição no desenvolvimento do vegetal (Primavesi,1984).

Em condições de aeração deficiente, a produção de cultivos em campo é restringida. O valor crítico para cada planta depende, especialmente, das propriedades físicas: temperatura, quantidade de água e compactação do solo, mas também, há que considerar alguns fatores químicos e biológicos.

Tentando estabelecer as taxas de difusão de oxigênio no solo para várias culturas, Winter e Simonson (1978) observaram que as culturas possuem exigências diferentes entre si, mas, de modo geral, aceita-se que uma taxa de difusão de oxigênio da ordem de $20 \times 10^{-8} \text{ g cm}^{-3} \text{ min}^{-1}$ seja adequada. Abaixo deste valor não ocorre crescimento normal de raízes.

A aeração é indispensável para a absorção ativa de água, caso contrário, não haverá oxigênio para uma respiração radicular normal, faltará energia (ATP) para a absorção de minerais e, conseqüentemente, para a absorção osmótica de água. A absorção passiva de água se relaciona, também, com o metabolismo ativo das raízes. As raízes bem aeradas parecem ser mais permeáveis que as raízes pouco aeradas, afetando a absorção de água.

Em condições de ausência de oxigênio, as raízes da maioria das plantas diminuem a acumulação de sais em suas células praticamente a zero. Este efeito foi descoberto por Labanauskas et al. (1965), citados por Gavande (1972), que encontraram que as quantidades de N, P, K, Ca, Mg, Zn, Cu, Mn, B e Fe nas raízes de plântulas de citros (*Citrus sinensis* var. Bessie) decresceram com a diminuição do teor de oxigênio na atmosfera do solo. Uma possível explicação para isso seria que o baixo nível de oxigênio no ar do solo afeta a permeabilidade da membrana celular. Outra explicação seria o efeito de um decréscimo da atividade fisiológica das células da raiz. As concentrações de N, P e K aumentam quando a concentração de O_2 no solo aumenta de 4% a 20%; no entanto, o Na se acumula em concentrações muito altas à medida que, o nível de oxigênio diminui

a níveis muito baixos. Também encontraram que a absorção de fósforo pelas raízes das árvores foi de 7 a 20 vezes menor em condições anaeróbicas comparado a condições aeróbicas.

As condições anaeróbicas do solo favorecem os processos de redução. Um desses processos de importância econômica no solo é a redução de nitratos por meio das bactérias e a consequente perda de nitrogênio para a atmosfera como N_2 (desnitrificação).

A presença de oxigênio no solo produz a oxidação de seus componentes, com efeitos nas condições físicas e na composição química. Em condições anaeróbicas, muitos constituintes do solo se encontram em estado reduzido; isto pode interferir diretamente na atividade biológica, e se manifesta ao apresentarem-se condições químicas não favoráveis para o crescimento da maioria das plantas superiores. A decomposição completa de substâncias orgânicas no solo, a oxidação de sais de amônio ($N - NH_4^+$) a nitritos ($N - NO_2^-$) e estes a nitratos ($N - NO_3^-$), a oxidação do enxofre e compostos de enxofre a sulfatos, a oxidação de hidrogênio, metano e outras substâncias produzidas por oxidação incompleta ou redução, são exemplos importantes de oxidação no solo. Estes processos de oxidação são, em geral, benéficos ao solo. Por outro lado, os processos de redução são, ao menos em parte, danosos para o desenvolvimento das plantas (Gavande, 1972).

2.2.3 Resistência mecânica do solo à penetração

A resistência mecânica do solo à penetração aumenta, mediante a diminuição de volume do mesmo, quando são submetidos a uma força de compressão. Essas forças podem ser externas, proveniente da pressão de qualquer objeto sobre a superfície, ou internas, quando provenientes de ciclos de umedecimento e secagem, dispersão de argilas e outros fatores pedológicos derivados da evolução do solo.

A resistência mecânica é maior em solos compactados ou adensados, onde ocorrem alterações na estrutura, densidade do solo, porosidade total e no tamanho e continuidade dos poros. Decorrente disso, o movimento e o armazenamento da água, ar e calor também são alterados, ocorrendo a redução

da capacidade de infiltração de água do solo – o que causa aumento do deflúvio superficial e da erosão, e diminuição do fornecimento de água para as plantas.

A resistência mecânica do solo pode ser avaliada por meio de diversos parâmetros físicos, entre eles:

- resistência ao cisalhamento, que em termos práticos, permite identificar a resistência dos agregados e da massa do solo, que é importante para a mecanização agrícola, ruptura de barragens, etc.
- resistência a compressão, que é utilizada para compreender o processo de compactação do solo através da capacidade de carga desses solos. Assim, em muitos trabalhos, busca-se avaliar a pressão máxima que poderá ser aplicada ao solo sem provocar condições restritivas ao crescimento radicular e sem promover deformação adicional ao solo (Imhoff et al., 2001).
- resistência à penetração, que está relacionado com as dificuldades encontradas pelas raízes durante o seu crescimento na matriz do solo.

Esses três tipos de resistência se interrelacionam, pois são diretamente dependentes da densidade e da umidade do solo, principalmente. Desse modo, a capacidade de suporte de carga do solo decresce rapidamente com o aumento da umidade e diminuição da densidade. Sendo a densidade uma característica dinâmica, pois varia de acordo com a classe, o tempo de uso e características intrínsecas, cada solo responde diferentemente aos efeitos do uso agrícola e manejo (Fernandes et al., 1983). Segundo Veihmeyer e Hendrickson (1948), quase sempre o valor-limite de densidade do solo em que as raízes são capazes de penetrar solo compactado situa-se em torno de $1,75 \text{ Mg m}^{-3}$ para solos arenosos e $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$ para solos argilosos.

Os níveis críticos de resistência do solo à penetração para o crescimento das plantas, variam com o tipo de solo e com a espécie cultivada (Taylor et al., 1966). Num latossolo roxo, Petter (1990), verificou que a resistência de 2800 kPa foi limitante ao crescimento radicular da cultura da soja. Taylor e Gardner (1963), Taylor et al. (1966) e Nesmith (1987), adotaram o valor de 2000 kPa como o limite crítico de resistência para a penetração das raízes. Segundo Unger e Kaspar (1994), após fazer uma revisão de vários trabalhos sobre compactação do solo e crescimento de raiz, sugeriram o limite de 3000 kPa como limitante ao crescimento radicular das culturas.

Gill e Bolt (1955), encontraram que plantas cultivadas em sua maioria possuem raízes capazes de exercer pressões axiais entre 700 e 2500 kPa e pressões radiais de 400 a 700 kPa. Obviamente, o tipo de raiz dependendo da espécie vegetal tem papel considerável no processo de penetração em solos compactados. Paradoxalmente, raízes pivotantes de grande diâmetro são menos eficientes na penetração de solos com alta densidade do solo que raízes finas fasciculadas.

A penetração de raízes em solos compactados pode ocorrer sempre que o diâmetro dos poros for maior que o diâmetro das raízes, ou menor, se esses não se apresentarem rígidos (Grohmann e Queiroz Neto, 1966). Estudos sobre a influência do tamanho e rigidez dos poros na penetração de raízes foram também realizados por Aubertin e Kardos (1965a, 1965b) com plantas de milho. O tamanho dos poros neste estudo variava de 36 a 412 μm . Quando o solo não era compactado, as raízes cresciam igualmente bem, tanto nos poros de 36 μm quanto nos de 412 μm . Quando houve certa compactação, verificou-se que poros com diâmetro abaixo de 138 μm já afetavam o crescimento de raízes.

Para avaliar a resistência do solo à penetração de raízes, comumente, utiliza-se o penetrômetro. Taylor (1971) afirma que a resistência do solo à penetração de raízes difere muito da resistência obtida com o penetrômetro. Segundo este autor, as raízes podem crescer através dos poros ou das linhas de fraqueza, que são pontos de menor resistência à penetração, enquanto o penetrômetro, avalia uma resistência média oferecida pelo solo. No entanto, pode-se ter alguma correlação se o objetivo for testar plantas com capacidade de vencer alta resistência oferecida pelo solo. Por outro lado, Benghough e Mullins (1990), citado por Klein et al. (1998), afirmam que a penetrometria é um método apropriado para avaliar a resistência à penetração de raízes no solo. Idealmente, a quantificação da resistência real encontrada pelas raízes deveria ser feita por métodos diretos (Stolzy e Barley, 1968), mas dificuldades práticas têm levado os pesquisadores a utilizarem o penetrômetro. A facilidade e a rapidez na obtenção dos resultados, além da possibilidade de um maior número de repetições, são as principais vantagens do uso desse instrumento. No entanto, a dependência dos resultados em relação ao teor de água e à densidade do solo dificulta a sua interpretação (Cassel et al., 1978). Além disso, os penetrômetros utilizados no campo apresentam problemas operacionais relacionados com a dificuldade em

manter uma velocidade de penetração constante (Camargo, 1983) e com a variação do teor de água nas diversas camadas do solo (Chancellor, 1977). Outra limitação refere-se ao fato de que esses equipamentos não permitem a obtenção da resistência sob baixos teores de água no solo.

2.3 O intervalo hídrico ótimo (IHO)

O ambiente físico do solo ao redor das raízes é caracterizado pela aeração, temperatura, umidade e resistência mecânica, sendo todas essas propriedades físicas do solo modificadas, em grau variável, pela compactação do solo (Boone e Veen, 1994).

A disponibilidade de água é freqüentemente utilizada como indicador da qualidade física do solo, mas adiciona apenas o efeito do potencial da água no solo como limitação ao crescimento radicular. Num solo compactado, a taxa de difusão de oxigênio pode limitar o crescimento radicular em potenciais maiores ou iguais a capacidade de campo (Eavis, 1972), enquanto que a excessiva resistência à penetração pode limitar o crescimento de raízes sob condições mais secas. Considerando que a compactação leva ao aumento da densidade e da resistência mecânica do solo e à diminuição da porosidade total e do tamanho e continuidade dos poros, Boone et al. (1987), demonstraram que a compactação do solo, em conjunto com as variações da umidade, determinaram as variações na difusão de oxigênio no solo e na resistência à penetração das raízes durante o crescimento da cultura do milho. O reconhecimento da ocorrência destas interações e de que as culturas estão sujeitas às suas interferências implica a necessidade de quantificá-las quando da avaliação da qualidade física do solo para o crescimento das plantas.

Conforme já exposto, para Letey (1985), na ausência de limitações térmicas, as condições físicas do solo na interface solo-raiz são controladas pela disponibilidade de água, aeração e resistência à penetração. Valores-limite dessas propriedades em relação ao crescimento das plantas têm sido documentados na literatura científica. Grable e Siemer (1968) definiram uma porosidade de aeração mínima de 10% para que a difusão de oxigênio atenda à demanda do sistema radicular. Taylor et al. (1966) consideraram que valores de resistência à penetração acima de 2 MPa são impeditivos ao crescimento e funcionamento do sistema radicular.

O conceito de AD entre os potenciais de $-0,01$ MPa (CC) e $-1,5$ MPa (PMP), na zona radicular do solo, tem sido utilizado no desenvolvimento de estratégias de manejo do solo para a agricultura irrigada. Entretanto, conforme discutido anteriormente, seu emprego isolado apresenta limitações, pois deixa de incluir outros importantes aspectos físicos do solo, como suas relações gasosas, térmicas e de resistência mecânica. Estes aspectos, dependem dos níveis de umidade e podem estar restringindo o desempenho das culturas mesmo dentro da faixa da água disponível. Por ser baseado unicamente nas condições da energia da água no solo, a água disponível não leva em consideração as condições de suprimento de oxigênio ou as limitações mecânicas impostas pela matriz do solo ao crescimento do sistema radicular (Letey, 1985; Silva et al., 1994). Além disso, existe a dificuldade de se assumir valores consensuais para as umidades na CC e no PMP. No entanto, o controle da umidade do solo parece ser a maneira mais adequada para se conseguir o equilíbrio entre estes três aspectos físicos (disponibilidade de água, aeração e resistência mecânica), possibilitando mantê-los dentro de limites adequados ao desenvolvimento da cultura. Assim, estabelecer os limites de umidade do solo para áreas irrigadas é uma questão atual que carece de respostas com maior embasamento técnico.

O conceito de “non limiting water range” (NLWR), proposto por Letey (1985), associa parâmetros relativos à aeração e à impedância mecânica do solo (respectivamente, porosidade de aeração e resistência à penetração) aos parâmetros que definem a água disponível (capacidade de campo e o ponto de murchamento permanente). Na definição deste conceito, Letey (1985), considerou que a resposta das plantas às modificações físicas do solo é ótima dentro dos limites do NLWR e impedida fora dos seus limites. Silva et al. (1994), aprimoraram a metodologia para a obtenção desse parâmetro, redefinindo-o como “least limiting water range” (LLWR). Estes autores consideram que o novo termo parece ser mais adequado por levar em conta que, mesmo dentro da faixa de umidade considerada por Letey (1985) como não limitante, a intensidade do crescimento das plantas varia continuamente com os fatores considerados. Pesquisas têm mostrado que o LLWR, traduzido por Tormena et al. (1998) como intervalo hídrico ótimo (IHO), é alterado pelo grau de compactação do solo (Silva et al., 1994; Silva e Kay, 1997a).

O IHO mostra-se promissor para ser utilizado como alternativa à água disponível para manejo da irrigação, pois complementa o conceito de AD

incluindo limitações ao crescimento de plantas até então ignoradas ou avaliadas de forma independente do conceito de água disponível. Conforme sugerem Silva et al. (1994), o IHO poderia ser utilizado como um índice de grande sensibilidade para a avaliação da qualidade estrutural dos solos. O limite superior do IHO é a umidade do solo na CC ou, se esta for menor, a umidade na qual a difusão de oxigênio assuma um valor restritivo ao crescimento. O seu limite inferior é a umidade no PMP ou, se esta for maior, a umidade na qual a resistência à penetração assume um valor restritivo ao crescimento.

Os resultados obtidos por Silva e Kay (1997a) e Kay et al. (1997) demonstram que o IHO é correlacionado positivamente com o conteúdo de matéria orgânica e negativamente com o teor de argila e a densidade dos solos. A degradação da estrutura do solo resulta numa redução do IHO (Letey, 1985), aumentando a probabilidade das raízes das culturas serem expostas a condições de insuficiente aeração ou excessiva resistência do solo (Kay, 1990).

Nos trabalhos de Topp et al. (1994) e Silva et al. (1994), a resistência à penetração foi o fator que, mais freqüentemente, impôs limitações ou o estreitamento do IHO, em relação à aeração do solo. Também Silva e Kay (1997b) demonstram a maior freqüência com que o conteúdo de água ultrapassa o limite crítico imposto pela resistência à penetração, sendo dependente da magnitude da faixa de água disponível no solo.

Silva e Kay (1996) encontraram que o crescimento do milho foi diretamente correlacionado com a amplitude do IHO e com o número de dias em que o conteúdo de água do solo permaneceu dentro desta faixa. Silva e Kay (1997a, b), comparando sistemas de manejo de solo, observaram que o solo sob plantio direto apresentou IHO mais amplo que o preparo convencional e, portanto, o conteúdo de água permaneceu mais tempo dentro desta faixa. Portanto, o IHO é um parâmetro de grande valia para a interpretação da qualidade física do solo, pois abrange num único atributo, três fatores relacionados com o crescimento das plantas e determinados pelas propriedades intrínsecas e pela estrutura do solo: aeração, resistência à penetração e umidade do solo. Tais particularidades tornam o IHO um atributo útil para avaliar a qualidade estrutural do solo e o impacto das práticas de manejo sobre a degradação do solo, com vantagem de relacionar as limitações do solo diretamente com os fatores de crescimento das plantas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Caracterização das áreas experimentais

Este trabalho foi realizado a partir de amostras de solo coletadas em três áreas cultivadas com coqueiro (*Cocos nucifera L.*) na Região Norte Fluminense. Duas dessas áreas experimentais selecionadas estão inseridas na Baixada Campista, sendo que, a área 1 está localizada na Fazenda Taí (estrada Barcelos-Paineiras, Município de São João da Barra, RJ), com latitude de 21° 45' 18" S, longitude de 41° 17' 00" W e altitude de aproximadamente 05 metros. O solo desta área é um Neossolo Quartzarênico Órtico gleico com teores médios de 32,3 g kg⁻¹ de argila, 52,4 g kg⁻¹ de silte e 915,3 g kg⁻¹ de areia, sendo definido quanto à classe textural como "areia". A área 2 está localizada na Estação Experimental da PESAGRO-Rio (área urbana de Campos dos Goytacazes, RJ), com coordenadas geográficas de 21° 44' 47" S e 41° 18' 24" W e altitude aproximada de 10 metros acima do nível do mar. O solo utilizado foi um Cambissolo Háplico Tb Distrófico gleico com teores médios de 481,3 g kg⁻¹ de argila, 317,4 g kg⁻¹ de silte e 201,3 g kg⁻¹ de areia, sendo definido quanto à classe textural como "argila". A terceira área (área 3), que está inserida no ecossistema dos Tabuleiros Costeiros, localizando-se no Colégio Estadual Agrícola Antonio Sarlo, em Campos dos Goytacazes (RJ), com altitude de aproximadamente 15 metros do nível do mar e coordenadas 21° 45' 15" S e 41° 19' 28" W. Este solo é classificado como um Argissolo Amarelo Distrófico fragipânico latossólico, com teores médios de 525,3 g kg⁻¹ de argila, 79,7 g kg⁻¹ de silte e 395,0 g kg⁻¹ de areia, sendo sua classe textural "argila".

O sistema de irrigação utilizado para a área 1 e 3 é do tipo microaspersão com dois emissores por planta, sendo as idades da cultura 3,5 e 9 anos, respectivamente. A área 2 não possui sistema de irrigação, sendo que a idade do pomar é de 10 anos.

A abertura das trincheiras e coletas de amostras foram feitas em novembro de 2001, para a área 1; em junho de 2002 e dezembro de 2003, para a área 2; e em julho de 2003 e janeiro de 2004, para área 3.

Segundo a classificação de Köppen, o clima da região Norte Fluminense é classificado como Aw, isto é, clima tropical úmido, com verão chuvoso, inverno seco e temperatura do mês mais frio superior a 18° C. A temperatura média anual está em torno de 24° C.

3.2 Amostragem

Em cada área foi aberta uma trincheira para a caracterização morfológica do perfil do solo e para a coleta de amostras. Estas amostras foram retiradas a cada 0,10 m até a profundidade de 1,50 m e utilizadas para a caracterização física e química das camadas/horizontes do solo. As amostras com estrutura deformada foram utilizadas para a determinação da densidade das partículas, da composição granulométrica e para a caracterização química do solo. Estas determinações permitiram identificar a classe de cada solo até o 4º nível categórico (sub-grupo) do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 1999).

As amostras indeformadas foram coletadas em anéis volumétricos com dimensões aproximadas de 50 mm de altura e 50 mm de diâmetro interno, sendo seis por profundidade para a área 1, totalizando 90 amostras, e 7 amostras por profundidade para as áreas 2 e 3, totalizando 105 amostras por área, as quais foram utilizadas para a determinação da curva de retenção de água, da curva de resistência à penetração e da densidade do solo.

3.3 Determinações

3.3.1 Atributos químicos

O carbono orgânico foi determinado com dicromato de potássio por colorimetria, pelo método descrito por Anderson e Ingran (1996).

O nitrogênio total (determinado pelo método Kjeldahl por câmara de difusão), o pH em água (determinado por potenciometria em solução solo-água, proporção 1:2,5), o fósforo disponível (extraído usando a solução extratora de Mehlich-1 determinado por espectrofotometria), o alumínio extraível (determinado com solução de KCl 1 mol L⁻¹, na proporção solo solução de 1:10 e determinado por titulação com NaOH 0,025 mol L⁻¹, usando-se o azul de bromotimol como indicador), o cálcio e magnésio trocáveis (extraídos com solução KCl 1 mol L⁻¹ e determinados por espectrofotometria de absorção atômica), e o potássio e sódio trocáveis (extraídos pelo extrator de Mehlich-1 e determinados por fotometria de chama) foram determinados segundo as marchas analíticas apresentadas em Embrapa (1997).

3.3.2 Atributos físicos

a) Composição granulométrica

Para a determinação da composição granulométrica, 20 g de terra de cada amostra foram dispersas com NaOH 1 N, procedendo-se à agitação mecânica com agitador “Stirrer” de alta rotação, durante 5 minutos para as amostras de textura arenosa (área 1) e 15 minutos para as demais amostras (áreas 2 e 3). Após a agitação, a areia foi separada por tamisamento da suspensão em peneira de 0,053 mm de diâmetro. A suspensão contendo argila e silte foi coletada em proveta de 1 L, sendo submetida ao processo de sedimentação para determinação da fração argila pelo método da pipeta. O silte foi determinado pela diferença das outras frações em relação à amostra original, segundo Embrapa (1997).

Na área 1, após a secagem da areia separada por tamisamento, esta foi passada através de um jogo de peneiras colocado num agitador mecânico

durante 05 minutos, obtendo-se as frações: areia muito grossa (1-2 mm), areia grossa (0,5-1,0 mm), areia média (0,25-0,5 mm), areia fina (0,1-0,25 mm) e areia muito fina (0,05-0,1 mm).

b) Densidade de partículas

A densidade de partículas foi determinada, em triplicata, medindo-se o volume ocupado por 20 g de terra fina seca em estufa (TFSE), com o emprego do álcool etílico como líquido penetrante e balão volumétrico aferido de 50 mL, segundo o método descrito pela Embrapa (1997), usando-se a fórmula:

$$\rho_S = MS / (50 - V_{\text{álcool}}) = MS / VS \quad (1)$$

onde: ρ_S = densidade de partículas ($\text{g mL}^{-1} = \text{Mg m}^{-3}$), MS = massa de solo (g), $V_{\text{álcool}}$ = volume de álcool gasto (mL), e VS = volume ocupado pelas partículas do solo (mL).

c) Densidade do solo

A densidade do solo foi determinada a partir das amostras indeformadas, coletadas em anéis volumétricos, após a obtenção da retenção de água e resistência à penetração das mesmas, sendo estas amostras secas em estufa a 110°C por 48 horas e, em seguida, pesadas. A densidade do solo foi obtida aplicando-se a equação 2:

$$\rho = MS / V \quad (2)$$

onde: ρ = densidade do solo (Mg m^{-3}), MS = massa solo seco em estufa (Mg) e V = volume do anel (m^3).

d) Porosidade total

A porosidade total foi determinada a partir dos valores de densidade do solo e densidade de partículas, aplicando-se a seguinte equação (Embrapa, 1997):

$$PT = 1 - \rho / \rho_s \quad (3)$$

onde: PT = porosidade total ($m^3 m^{-3}$), ρ = densidade do solo ($Mg m^{-3}$) e ρ_s = densidade de partículas ($Mg m^{-3}$).

e) Curva de retenção de água

Para a determinação da curva de retenção de água, as amostras indeformadas de cada área foram devidamente preparadas e divididas em grupos de 15 amostras, cada grupo contendo 1 amostra de cada camada de 0,1 m (15 camadas da superfície até 1,5 m). No procedimento analítico, estas amostras foram saturadas através da elevação gradual de uma lâmina de água numa bandeja, atingindo-se cerca de 2/3 de sua altura. Após a saturação, estas amostras foram utilizadas para a determinação das umidades de equilíbrio em pontos de “baixa tensão” ($\tau = 1, 3, 6, 10$ kPa), em funis de placa porosa, e em pontos de “alta tensão” ($\tau = 30, 100, 500$ e 1500 kPa), em câmaras de pressão de Richards, segundo o procedimento descrito em Silva et al. (1994). Estes valores de umidade ($\theta, m^3 m^{-3}$) foram obtidas pela equação:

$$\theta = V_a / V \quad (4)$$

onde: V_a (m^3) é o volume de água retido na amostra e V (m^3) é o volume da amostra, que corresponde ao volume do anel. O valor de V_a foi obtido pela equação 5:

$$V_a = m_a / \rho_a \quad (5)$$

onde: m_a (m^3) é a massa de água da amostra e ρ_a ($Mg\ m^{-3}$) é a densidade da água, assumida como sendo $1\ Mg\ m^{-3}$.

Como o número de conjuntos de 15 amostras de cada área (6 para a área 1 e 7 para as áreas 2 e 3) foi inferior ao número de determinações de retenção de água, alguns desses conjuntos foram submetidos a 2 tensões (1 ponto de baixa e 1 ponto de alta). Para as amostras submetidas as altas tensões (30, 100, 500 e 1500 kPa), nas três áreas e para as submetidas a 10 kPa, nas áreas 2 e 3, determinou-se ainda, no momento do equilíbrio, a sua resistência à penetração (descrita em tópico adiante). Somente após terem sido submetidas a esses procedimentos, as amostras foram secas em estufa a $105-110\ ^\circ C$ para a determinação do conteúdo de água e da densidade do solo. A perda de dados armazenados em computador referentes a alguns ensaios de resistência à penetração levou à necessidade de se refazer alguns pontos da curva de retenção, de modo que a umidade à tensão de 1500 kPa, na área 1, às tensões de 10 e 100 kPa, na área 2, e às tensões 10 e 1500 kPa, na área 3, passaram a ter 2 repetições.

A curva de retenção foi estimada pelo modelo de Van Genuchten (1980), que associa os valores de umidade (θ) obtidos no equilíbrio aos respectivos potenciais mátricos (ϕ_m). Lembramos que o valor do potencial mátrico é igual ao da tensão com sinal trocado ($\phi_m = -\tau$). A umidade de saturação (θ_s , $m^3\ m^{-3}$) que consta no modelo foi tratada como variável independente, sendo assumida, para cada amostra, como correspondente à porosidade total.

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left(1 + |\alpha \phi_m|^n\right)^m} \quad (6)$$

onde: θ_r ($m^3\ m^{-3}$), α (kPa^{-1}) e n e m (adimensionais) são os parâmetros empíricos do modelo. O valor de θ_r representa a umidade residual, enquanto m foi considerado dependente de n , segundo a equação $m = 1 - 1/n$.

f) Microporosidade

A microporosidade foi estimada a partir da curva de retenção de água, sendo considerada como correspondente ao valor da umidade ao ϕ_m de -6 kPa.

Este ϕ_m corresponde à sucção proporcionada por uma coluna de água de 0,6 m de altura nos funis de placa porosa, a qual retira a água dos macroporos (poros com diâmetros > 0,05 mm).

$$\text{microporosidade} = \theta = \theta_r + \frac{\bar{\theta}_s - \theta_r}{(1 + |\alpha \cdot 6|^n)^m} \quad (7)$$

onde: $\bar{\theta}_s$ foi considerado como correspondente à média dos valores de porosidade total (\bar{PT}) de todas as amostras indeformadas de cada ajuste da curva de retenção.

g) Macroporosidade

A macroporosidade também foi obtida para cada conjunto de amostras indeformadas utilizadas nos ajustes da curva de retenção, pela diferença entre a porosidade total média (\bar{PT}) e a microporosidade:

$$\text{Macroporosidade} = \bar{PT} - \text{microporosidade} \quad (8)$$

h) Umidade na capacidade de campo

Da mesma maneira que a microporosidade, a umidade na capacidade de campo (θ_{CC}) foi estimada por meio da curva de retenção, sendo assumida como correspondente ao ϕ_m de -10 kPa (sucção de 1 m de coluna de água nos funis de placa porosa):

$$\theta_{CC} = \theta_r + \frac{\bar{\theta}_s - \theta_r}{(1 + |\alpha \cdot 10|^n)^m} \quad (9)$$

i) Porosidade de aeração

Similarmente à macroporosidade, a porosidade de aeração (PA) foi obtida pela diferença entre a porosidade total média (\bar{PT}) e a umidade na capacidade de campo:

$$PA = \overline{PT} - \theta_{CC} \quad (10)$$

j) Umidade no ponto de murcha permanente

Como a microporosidade e a θ_{CC} , a umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) foi obtida da curva de retenção, sendo considerada ao ϕ_m de -1500 kPa (correspondente à 150 m de coluna de água nas câmaras de pressão de Richards):

$$\theta_{PMP} = \theta_r + \frac{\bar{\theta}_s \theta_r}{\left(1 + |\alpha \cdot 1500|^n\right)^m} \quad (11)$$

k) Água disponível

A capacidade de água disponível às plantas, ou simplesmente, água disponível (AD), foi calculada pela diferença entre as umidades na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente:

$$AD = \theta_{CC} - \theta_{PMP} \quad (12)$$

l) Resistência à penetração

A determinação da resistência do solo à penetração (RP) foi realizada em cada um dos grupos de amostras submetidas às altas tensões (todas as áreas) e à tensão de 10 kPa (áreas 2 e 3), com o que se estabeleceu um gradiente de umidade entre as amostras. Para tal finalidade, utilizou-se um aparelho universal para ensaios de compressão (Instron 5582), no Laboratório de Materiais Avançados (LAMAV) do CCT/UENF, com coleta automática de dados, permitindo ajuste para uma velocidade de penetração constante de 10 mm min⁻¹ até a profundidade de 40 mm. Na base de uma célula de carga de capacidade de força de 1kN foi afixado um cone metálico com semi-ângulo de 30° e base de 6,35 mm de diâmetro e 31,8 mm² de área. As resistências foram identificadas pelo conjunto célula de carga-cone metálico, cujos sinais foram armazenados no

microcomputador com interface (uma leitura por segundo). A resistência à penetração foi obtida como uma força (N) e transformada para pressão (MPa), dividindo-se o valor da força aplicada pela área da base do cone. Calculou-se a média aritmética dos valores entre 10 e 40 mm, valor este considerado representativo da RP da amostra na tensão avaliada. Após este ensaio, as amostras foram colocadas em estufa a 105-110 °C por um período de 48 horas para a determinação da umidade volumétrica (θ) e da densidade do solo (ρ), conforme já descrito anteriormente.

Para a construção da curva de resistência à penetração (RP) em função da umidade (θ) foram utilizados os mesmos conjuntos de amostras dos ajustes da curva de retenção de água, excetuando-se as amostras submetidas às baixas tensões que não tiveram determinadas sua RP. Como a RP varia também em função da densidade da amostra (ρ), adotou-se o modelo proposto por Busscher (1990):

$$RP = a \theta^b \rho^c \quad (13a)$$

onde: a, b e c são constantes do ajuste.

Em alguns casos, porém, dada à falta de ajuste dos dados em relação à densidade ou à umidade do solo, o modelo foi simplificado, de acordo com as seguintes equações:

$$RP = a \theta^b \quad (13b)$$

$$RP = a \rho^c \quad (13c)$$

m) Intervalo hídrico ótimo

O intervalo hídrico ótimo (IHO) é obtido pela diferença entre dois valores de umidade considerados críticos. Como limite superior desse intervalo, assume-se o menor valor entre a umidade na capacidade de campo (θ_{CC}) e a umidade na qual a porosidade de aeração atinge um valor considerado restritivo à oxigenação do sistema radicular (θ_{AR}). Admitindo-se essa porosidade de aeração crítica como

10% (Letey, 1985; Silva et al., 1994 e Tormena et al., 1998), ou seja, $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, temos:

$$\theta_{AR} = \overline{PT} - 0,1 = \theta_S - 0,1 \quad (14)$$

Como limite inferior do IHO, considera-se o maior valor entre a umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) e a umidade, na qual a resistência mecânica à penetração assume um valor limitante ao desenvolvimento do sistema radicular das plantas (θ_{RP}). Assumindo o valor de 3 MPa (Unger e Kaspar, 1994) como resistência à penetração crítica e rearranjando a equação 13a, tem-se:

$$\theta_{RP} = (3,0/(a\rho^c))^{1/b} \quad (15a)$$

Para os casos em que os dados de RP foram ajustados à equação 13c não foi possível a obtenção de θ_{RP} . Por outro lado, quando a equação 13b foi utilizada, a obtenção de θ_{RP} pôde ser feito pela equação:

$$\theta_{RP} = (3,0/a)^{1/b} \quad (15b)$$

Utilizando-se os valores médios de PT, θ_S e ρ de cada camada/horizonte nas equações 9, 11, 14 e 15 (a ou b) obteve-se, respectivamente, valores inequívocos de θ_{CC} , θ_{PMP} , θ_{AR} e θ_{RP} . De posse desses valores, pôde-se calcular o IHO pela seguinte equação:

$$IHO = \text{mín}(\theta_{CC}; \theta_{AR}) - \text{máx}(\theta_{PMP}; \theta_{RP}) \quad (16)$$

onde: $\text{mín}(\theta_{CC}; \theta_{AR})$ é o menor valor entre θ_{CC} e θ_{AR} ; e $\text{máx}(\theta_{PMP}; \theta_{RP})$ é o maior valor entre θ_{PMP} e θ_{RP} .

Se, ao invés dos valores médios, fossem utilizados nas equações 9, 11, 14 e 15 os valores de PT, θ_S e ρ obtidos de cada uma das amostras, ter-se-ia não valores inequívocos de θ_{CC} , θ_{PMP} , θ_{AR} e θ_{RP} , mas sim funções representativas de cada camada/horizonte, pelas quais o IHO poderia ser determinado graficamente. Como utilizou-se a densidade como variável independente dessas funções, e

considerando que $\theta_s = PT = 1 - \rho / \rho_s$, as equações 9, 11, 14 e 15a foram reescritas como:

$$\theta_{CC} = \theta_r + \frac{[(1 - \rho / \rho_s) \theta_r]}{(1 + |\alpha \cdot 10|^n)^m} \quad (17)$$

$$\theta_{PMP} = \theta_r + \frac{[(1 - \rho / \rho_s) \theta_r]}{(1 + |\alpha \cdot 1500|^n)^m} \quad (18)$$

$$\theta_{AR} = 0,9 - \rho / \rho_s \quad (19)$$

$$\theta_{RP} = (3,0 / (a \rho^c))^{1/b} \quad (20)$$

Ainda por meio destas funções é possível obter o valor da densidade do solo em que o IHO se reduz a zero, denominado nesse trabalho de densidade crítica (ρ_c). Este valor é obtido quando os limites superior e inferior do IHO se igualam, em um dos seguintes casos (o que resultar no menor valor de densidade): (i) $\theta_{CC} = \theta_{PMP}$; (ii) $\theta_{AR} = \theta_{PMP}$; (iii) $\theta_{CC} = \theta_{RP}$; ou (iv) $\theta_{AR} = \theta_{RP}$. Salientamos que o modelo da curva de retenção adotado não admite o caso (i), e que o caso (ii), na prática, não foi considerado, pois jamais resultou em valores de densidade menores que os dos casos (iii) e (iv). Salientamos ainda, que no presente trabalho, a densidade crítica foi obtida em planilha eletrônica pelo método iterativo, buscando-se as igualdades das funções nos casos (i), (ii), (iii) e (iv), apresentados anteriormente. Fez-se essa opção dada a dificuldade da obtenção dessas igualdades de forma analítica pelas equações 17, 18, 19 e 20. Também em planilha eletrônica pelo método iterativo estimou-se os valores de densidade ρ_{AR} , acima do qual θ_{AR} substitui θ_{CC} como limite superior do IHO, e ρ_{RP} , acima do qual θ_{RP} substitui θ_{PMP} como limite inferior do IHO. Por meio da equação 3, valores de porosidade total PT_C , PT_{AR} e PT_{RP} (correspondentes, respectivamente, a ρ_c , ρ_{AR} e ρ_{RP}) foram também estimados como porosidades abaixo das quais o IHO passa a ser zero ou limitado por θ_{AR} e θ_{RP} , respectivamente.

3.4 Apresentação dos dados

Embora as amostras de solo tenham sido coletadas a cada camada de 0,1 m de espessura, os resultados foram apresentados de acordo com os horizontes identificados na descrição morfológica dos perfis do solo.

Para cada atributo avaliado, o valor representativo de um determinado horizonte foi obtido pela média das camadas que compunham o referido horizonte. Como, na maioria dos casos, a profundidade limítrofe entre dois horizontes subseqüentes não coincide com os limites entre duas camadas de 0,1 m de espessura, as médias mencionadas acima foram ponderadas pela fração da espessura da camada pertencente a um dado horizonte. No caso destas camadas limítrofes os valores obtidos para as variáveis estudadas foram utilizadas na obtenção da média ponderada dos dois horizontes que a incluem.

Como exemplo, para a determinação da ρ do horizonte A_p da área 1, com profundidade 0-16 cm, utilizou-se a equação $\rho_{A_p} = (\rho_{0-10} * 1 + \rho_{10-20} * 0,6) / 1,6$. Para o horizonte A_3 , de 16-30 cm, utilizou-se $\rho_{A_3} = (\rho_{10-20} * 0,4 + \rho_{20-30} * 1) / 1,4$.

Os ajustes dos modelos de retenção de água (equação 9) e de resistência à penetração (equação 13), também foram feitos para cada horizonte identificado na descrição morfológica do perfil, de modo que foi adotado o mesmo procedimento de ponderação acima descrito. Assim, para o ajuste do horizonte A_p da área 1 (utilizado no exemplo anterior), os pares ou trios de dados utilizados no ajuste entram com peso 1 se provenientes da camada de 0-10 cm e com peso 0,6 se proveniente da camada 10-20 cm. Para o horizonte A_3 , os pesos são 0,4 para os dados da camada 10-20 cm e 1 para a 20-30 cm.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Atributos morfológicos, químicos e físicos dos solos e sua classificação pelo Sistema Brasileiro (Embrapa, 1999).

Os Quadros 1, 2 e 3 apresentam a descrição geral da área, a descrição morfológica do perfil e a classificação do solo das três áreas estudadas de acordo com os critérios do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 1999).

A Tabela 1 mostra os valores dos atributos químicos e as Tabelas 2 e 3 mostram a composição granulométrica dos horizontes do solo das três áreas estudadas, que juntamente com a descrição morfológica foram utilizados para a classificação do solo.

De acordo com os dados apresentados nas Tabelas 2 e 3, cada solo é de uma classe textural distinta, sendo o solo da área 1 muito arenoso, o da área 2 com altos teores de argila e silte, e o solo da área 3 apresenta teores elevados de argila e areia. Com relação à estrutura, o solo da área 1, devido a alta quantidade de areia na sua composição, não possui estrutura definida, formado por grãos simples. As exceções são os horizontes Ap e A31, em que a presença de matéria orgânica confere a essas camadas maior agregação. Já o solo da área 2, devido a maior presença de silte na sua composição, possui estrutura compacta, visto que o silte não é um agente cimentante e acaba preenchendo os macroporos desse solo. O solo da área 3 apresenta a estrutura mais uniforme com relação aos outros solos estudados, porém com caráter coeso, o que torna esse solo friável ou muito friável quando úmido e ligeiramente duro ou duro quando seco.

Quadro 1- Descrição morfológica do perfil do solo da área 1.

Descrição Geral	
Data	– 07/11/2001
Classificação	– Neossolo Quartzarênico Órtico gleico.
Localização	– Fazenda Taí, estrada Barcelos-Paineiras, São João da Barra/RJ.
Situação e declividade	– Trincheira na parte alta do cordão litorâneo.
Formação geológica e litologia	- Terciário. Quartzo inconsolidado.
Material originário	– Areias marinhas.
Relevo local	– Plano (cordões litorâneos).
Relevo regional	- Plano.
Altitude	– 3-5 metros.
Drenagem	– Imperfeitamente drenado.
Pedregosidade	– ausente.
Erosão	– Não perceptível.
Vegetação local	– restinga com presença de cajueiros.
Vegetação regional	– restinga com presença de cajueiros.
Uso atual	– Cultivo com coqueiro, com 3 a 4 anos de idade.
Descrito por – Cláudio Roberto Marciano	
Descrição Morfológica do Perfil	
Ap	0 - 16 cm, bruno acinzentado muito escuro (10YR 3/2, úmido) e bruno acinzentado (10YR 5/2, seco); areia franca; grãos simples; solta, solta, não plástico, não pegajoso; transição clara e plana.
A31	16 - 30 cm, bruno muito escuro (10YR 2/2, úmido) e bruno acinzentado escuro (10YR 4/2, seco); areia franca; grãos simples; solta, solta, não plástico, não pegajoso; transição clara e plana.
A32	30 - 50 cm, preto (10YR 2/1, úmido) e bruno acinzentado muito escuro (10YR 3/2, seco); areia; grãos simples; solta, solta, não plástico, não pegajoso; transição gradual e plana.
AC	50 - 66 cm, bruno acinzentado muito escuro (10YR 3/2, úmido) e bruno acinzentado (10YR 5/2, seco); areia; grãos simples; solta, solta, não plástico, não pegajoso; transição clara e plana.
C1	66 - 84 cm, bruno oliváceo claro (2,5Y 5/3, úmido) e bruno amarelado claro (2,5Y 6/4, seco); areia; grãos simples; solta, solta, não plástico, não pegajoso; transição gradual e plana.
C2	84 - 104 cm, amarelo oliváceo (2,5Y 6/6, úmido) e amarelo (2,5Y 7/6, seco); areia; grãos simples; solta, solta, não plástico, não pegajoso; transição gradual e plana.
C3	104 - 150 cm, amarelo claro acinzentado (2,5Y 7/3, úmido) e cinza claro (2,5Y 7/2, seco); areia; grãos simples; solta, solta, não plástico, não pegajoso.
Raízes - Ap abundantes (fasciculares horizontais), A31 e A32 comuns, AC poucas, C1 a C3 raras.	

Quadro 2- Descrição morfológica do perfil do solo da área 2.

Descrição Geral	
Data	– 12/06/2002
Classificação	– Cambissolo Háplico Tb Distrófico gleico.
Localização	– PESAGRO-Rio, área urbana de Campos dos Goytacazes/RJ.
Situação e declividade	– Trincheira 200 m à margem esquerda do Rio Paraíba do Sul, em relevo plano.
Formação geológica e litologia	- Quaternário. Deposição fluvial.
Material originário	– Sedimentos aluviais inconsolidados.
Relevo local	– Plano.
Relevo regional	- Plano.
Altitude	– 5-10 metros.
Drenagem	– Moderadamente drenado.
Pedregosidade	- ausente.
Erosão	– Não perceptível.
Vegetação local	– Mata Ciliar.
Vegetação regional	– Mata Atlântica.
Uso atual	– Cultivo com coqueiro, com 8 a 10 anos de idade.
Descrito por – Cláudio Roberto Marciano	
Descrição Morfológica do Perfil	
Ap	0 - 10 cm, bruno (10YR 4/3, úmido) e bruno (10YR 5/3, seco); argila; blocos subangulares médio a grande forte; dura, firme, plástico, pegajoso; transição clara e ondulada.
A/Bi	10 - 22 cm, bruno (10YR 5/3, úmido) e bruno claro acinzentado (10YR 6/3, seco); franco argilo siltosa; prismática grande forte; dura, firme, plástico, pegajoso; transição clara e plana.
B1i	22 - 70 cm, bruno amarelado escuro (10YR 4/4, úmido) e bruno amarelado (10YR 5/4, seco); franco siltosa; prismática grande forte; cerosidade comum e moderada; dura, firme, não plástico, não pegajoso; transição gradual e plana.
B2ig	70 - 114 cm, bruno amarelado escuro (10YR 4/4, úmido) e bruno amarelado (10YR 5/4, seco); argila siltosa; prismática grande forte; dura, firme, muito plástico, muito pegajoso; transição abrupta e plana. Mosqueado comum médio distinto bruno amarelado (9YR 5/7, úmido; 10YR 5/7, seco).
B3ig	114 - 125 cm, bruno acinzentado muito escuro (10YR 3/2, úmido) e bruno acinzentado escuro (10YR 4/2, seco); franco argilosa; blocos subangulares médio a grande forte; dura, firme, muito plástico, muito pegajoso; transição gradual e plana. Mosqueado comum médio distinto bruno forte (7,5YR 4/6, úmido; 7,5YR 5/6, seco).
IICx	125 - 150 cm ⁺ , bruno acinzentado escuro (10YR 4/2, úmido) e bruno acinzentado (10YR 5/2, seco); franco arenoso; maciça coesa; muito friável, ligeiramente dura, ligeiramente plástico, ligeiramente pegajoso; transição gradual e plana.
Raízes	- Ap comuns (fasciculadas), A/Bi e B1i abundantes, B2ig poucas, B3ig a IICx raras.
Obs.	Presença de fendas desde a superfície até o horizonte B2ig, porém insuficiente para caracterizar horizonte vértico.

Quadro 3- Descrição morfológica do perfil do solo da área 3

Descrição Geral

Data – 27/06/2003

Classificação – Argissolo Amarelo Distrófico fragipânico latossólico.

Localização – Modelo de Fazenda, Escola Agrícola Antônio Sarlo, Campos dos Goytacazes/RJ.

Situação e declividade – Trincheira na encosta do tabuleiro que contacta a baixada.

Formação geológica e litologia – Formação Barreiras.

Material originário – Sedimentos inconsolidados do Quaternário.

Relevo local – Suave ondulado.

Relevo regional – Plano a suave ondulado.

Altitude – 10-15 metros.

Drenagem – bem drenado.

Pedregosidade – ausente.

Erosão – laminar, pouco perceptível.

Vegetação local – restinga com presença de cajueiros.

Vegetação regional – restinga com presença de cajueiros.

Uso atual – Cultivo com coqueiro, com cerca de 9 anos de idade.

Descrito por – **Cláudio Roberto Marciano**

Descrição Morfológica do Perfil

Ap	0 - 10 cm, bruno (7,5YR 4/4, úmido) e bruno (10YR 5/3, seco); argila arenosa; blocos sub-angulares, pequeno a muito pequeno, forte; duro, ligeiramente plástica, pegajoso; transição clara e gradual.
A31	10 - 20 cm, vermelho-amarelado (5YR 4/6, úmido) e vermelho-amarelado (5YR 5/5, seco); argila arenosa; blocos sub-angulares, médio a pequeno, forte; ligeiramente duro, muito friável, plástica, pegajoso ; transição clara e gradual.
A32	20 - 35 cm, bruno-avermelhado (5YR 4/4, úmido) e bruno (7,5YR 5/3, seco); argila arenosa; blocos sub-angulares, médio a pequeno, forte; ligeiramente duro, muito friável, plástica, pegajosa ; transição gradual e abrupta.
Bt1	35 - 80 cm, bruno forte (7,5YR 4/6, úmido) e amarelo-avermelhado (7,5YR 6/6, seco); argila; blocos sub-angulares, médio, forte; duro; muito friável; plástica, pegajosa; transição gradual.
Bt2	80 - 120 cm, vermelho-amarelado (5YR 5/6, úmido) e vermelho-amarelado (5YR 5/6, seco); argila; blocos sub-angulares, grande, forte; ligeiramente duro , muito friável, plástica, pegajosa.
Bw	120 - 150 cm, vermelho-amarelado (5YR 5/6, úmido) e vermelho-amarelado (5YR 5/6, seco); argila; blocos sub-angulares, médios, fracos / maciça porosa.
Raízes - Ap muitas, A31 muitas, A32 muitas, Bt1 poucas/comuns, Bt2 raras, Bw ausentes	

Tabela 1. Análises químicas do solo para os três perfis estudados.

Hori- zonte	Espes- sura (cm)	pH	P	C	N*	Al ⁺³	H ⁺ +Al ^{+3*}	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺
			(mg dm ⁻³)	(%)	(g dm ⁻³)	----- (cmol _c dm ⁻³) -----					
área 1											
Ap	0 - 16	4,75	2,66	1,09	---	0,50	---	0,14	0,06	0,006	0,003
A31	16 - 30	4,72	3,05	1,17	---	0,60	---	0,14	0,05	0,006	0,003
A32	30 - 50	4,83	3,75	0,38	---	0,50	---	0,14	0,05	0,005	0,002
AC	50 - 66	4,84	2,49	0,17	---	0,10	---	0,26	0,08	0,008	0,003
C1	66 - 84	4,78	2,23	0,10	---	0,00	---	0,58	0,17	0,015	0,003
C2	84 - 104	4,96	1,61	0,08	---	0,00	---	0,62	0,18	0,015	0,003
C3	104 - 150	4,88	1,21	0,05	---	0,10	---	0,11	0,03	0,003	0,003
área 2											
Ap	0 - 10	5,85	5,00	1,30	1,1	0,40	0,40	1,20	1,00	0,180	0,620
A/Bi	10 - 22	4,75	2,84	0,90	0,9	0,70	5,80	2,30	1,90	0,180	0,280
B1i	22 - 70	5,13	2,88	0,50	0,6	0,60	6,30	2,50	2,50	0,210	0,060
B2ig	70 - 114	5,39	4,76	0,40	0,4	0,70	6,70	1,80	2,40	0,350	0,050
B3ig	114 - 125	5,35	4,33	0,50	0,7	1,10	8,10	1,50	2,80	0,350	0,030
IICx	125 - 150	5,29	2,83	0,20	0,3	0,60	6,10	0,60	2,20	0,180	0,040
área 3											
Ap	0 - 10	5,32	40,00	1,12	1,9	0,20	5,70	1,23	0,59	0,013	0,151
A31	10 - 20	4,86	14,75	0,91	1,2	0,70	6,30	0,85	0,29	0,026	0,046
A32	20 - 35	4,75	3,92	0,75	1,2	0,90	6,10	0,67	0,27	0,021	0,024
Bt1	35 - 80	4,73	5,25	0,47	1,3	0,90	5,40	0,63	0,32	0,023	0,008
Bt2	80 - 120	4,57	5,75	0,32	0,6	1,25	5,23	0,27	0,19	0,013	0,003
Bw	120 - 150	4,61	5,42	0,23	0,5	1,17	5,03	0,31	0,14	0,009	0,002

* análise não realizada para a área 1.

Tabela 2. Composição granulométrica dos horizontes do solo da área 1

Horizonte	Espessura (cm)	Argila	Silte	Areia	Areia					Classe textural
					Muito Grossa	Areia Grossa	Areia Média	Areia Fina	Areia Muito Fina	
----- (g kg ⁻¹) -----										
Ap	0 - 16	65,6	77,1	857,3	2,2	81,2	453,7	280,9	39,5	Areia franca
A31	16 - 30	99,3	50,4	850,3	1,5	68,9	443,7	294,5	41,6	Areia franca
A32	30 - 50	70,7	29,6	899,8	3,3	80,9	482,5	289,6	43,7	Areia
AC	50 - 66	44,5	27,8	927,9	2,5	82,1	477,3	320,2	45,9	Areia
C1	66 - 84	40,4	25,6	934,0	3,7	97,5	488,0	301,1	43,9	Areia
C2	84 - 104	44,0	21,4	934,6	2,5	76,8	467,1	341,4	47,0	Areia
C3	104 - 150	36,7	21,6	941,7	4,2	92,5	454,6	344,0	46,6	Areia

Tabela 3. Composição granulométrica dos horizontes do solo das áreas 2 e 3.

Horizonte	Espessura (cm)	Frações granulométricas			Classe textural
		Argila	Silte	Areia	
------(g kg ⁻¹)-----					
área 2					
Ap	0 - 10	471,1	435,8	93,0	Argila siltosa
A/Bi	10 - 22	472,0	431,1	96,8	Argila siltosa
B1i	22 - 70	493,9	395,1	110,8	Argila
B2ig	70 - 114	554,9	403,2	41,1	Argila siltosa
B3ig	114 - 125	662,57	297,3	40,0	Muito argilosa
IICx	125 - 150	341,1	89,1	569,7	Franco argilo arenosa
área 3					
Ap	0 - 10	402,4	93,0	504,5	Argila arenosa
A31	10 - 20	386,0	71,6	542,3	Argila arenosa
A32	20 - 35	462,2	76,6	461,1	Argila arenosa
Bt1	35 - 80	575,7	57,2	367,0	Argila
Bt2	80 - 120	573,8	65,5	360,6	Argila
Bw	120 - 150	503,4	132,1	364,4	Argila

4.2 Densidade, porosidade total, curva de retenção de água no solo e atributos físicos relacionados

A Tabela 4 apresenta os valores médios de densidade do solo, densidade de partículas e porosidade total para os horizontes das três áreas estudadas. É importante ressaltar que os dados obtidos para os perfis estudados são oriundos de horizontes de diferentes classes texturais e de amostras distintas num mesmo horizonte, o que contribui para uma grande variação dos resultados apresentados. Com relação à área 1, verifica-se que a densidade do solo e a porosidade total são uniformes em todo o perfil. Para as áreas 2 e 3, observa-se que a densidade do solo diminui em profundidade, variando de 1,41 a 1,09 Mg m⁻³ na área 2 e de 1,54 a 1,33 Mg m⁻³ na área 3. Esse comportamento é inverso ao da porosidade total, que aumentou em profundidade, passando de 0,476 para 0,582 m³ m⁻³ na área 2 e de 0,447 para 0,538 m³ m⁻³ na área 3. A despeito dessa tendência de um maior adensamento nas camadas superficiais dos solos das áreas 2 e 3, é importante destacar que nas três áreas os valores da porosidade total estiveram

sempre próximos a $0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, valor considerado ideal por Kiehl (1979). A exceção é a camada IICx da área 2, onde uma descontinuidade litológica leva ao aumento da densidade e diminuição da porosidade total em relação à camada imediatamente acima.

A densidade do solo é uma propriedade física que reflete o arranjo das partículas do solo, que por sua vez, define características como a porosidade, permeabilidade e capacidade de armazenamento de água pelo solo. A porosidade representa a porção do solo, em volume, não ocupada por sólidos, variando em função da textura e estrutura dos mesmos, sendo fundamental no estudo envolvendo armazenamento e movimento de água e gases no solo, no fluxo e retenção de calor, resistência mecânica dos solos e desenvolvimento do sistema radicular das plantas (Ferreira, 1993).

Tabela 4. Densidade do solo, densidade de partículas, porosidade total, macro e microporos dos horizontes das três áreas estudadas.

Horizonte	Espessura (cm)	Densidade do solo -----(Mg m^{-3})-----	Erro padrão	Porosidade Total -----($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)-----	Erro padrão	n*	Densidade de partículas --(Mg m^{-3})--
área 1							
Ap	0 - 16	1,47	0,010	0,46	0,004	12	2,75
A31	16 - 30	1,38	0,010	0,49	0,004	12	2,75
A32	30 - 50	1,42	0,007	0,48	0,003	12	2,74
AC	50 - 66	1,46	0,032	0,47	0,012	12	2,75
C1	66 - 84	1,45	0,016	0,46	0,006	18	2,73
C2	84 - 104	1,43	0,009	0,48	0,003	18	2,77
C3	104 - 150	1,43	0,010	0,47	0,004	30	2,73
área 2							
Ap	0 - 10	1,41	0,002	0,47	0,014	07	2,69
A/Bi	10 - 22	1,41	0,031	0,47	0,008	14	2,67
B1i	22 - 70	1,26	0,015	0,55	0,006	35	2,69
B2ig	70 - 114	1,14	0,022	0,58	0,006	35	2,68
B3ig	114 - 125	1,09	0,011	0,58	0,019	14	2,71
IICx	125 - 150	1,32	0,056	0,41	0,018	21	2,63
área 3							
Ap	0 - 10	1,54	0,018	0,44	0,007	07	2,78
A31	10 - 20	1,50	0,012	0,46	0,004	07	2,81
C32	20 - 35	1,52	0,019	0,46	0,007	14	2,82
Bt1	35 - 80	1,43	0,030	0,49	0,011	35	2,83
Bt2	80 - 120	1,34	0,031	0,51	0,011	28	2,76
Bw	120 - 150	1,33	0,037	0,53	0,013	21	2,88

n = número de amostras utilizadas na determinação da densidade e da porosidade total.

Os pares de dados potencial mátrico (ϕ_m) e umidade (θ), obtidos em funis de placa porosa e câmaras de pressão de Richards, foram ajustados juntamente com a porosidade total calculada – que estima a umidade saturada (θ_s) – ao modelo de Van Genuchten (1980), apresentado na equação 6. Os coeficientes resultantes desses ajustes são apresentados nas Tabelas 5, 6 e 7.

A incorporação da porosidade total como variável independente nas estimativas da umidade, pelo modelo de Van Genuchten (1980), a despeito de exigir um número maior de amostras para a confecção da curva de retenção, traz como aspecto positivo a possibilidade de se prever o comportamento dessa curva quando o solo experimenta pequenas alterações em sua densidade-porosidade total. Com relação à qualidade dos ajustes, pode-se verificar a ocorrência de

Tabela 5. Resultados do ajuste da curva de retenção de água no solo da área 1.

Horizontes	Espessura (cm)	Coeficientes	Valor	r^2	n*	Erro padrão	I.C. – 1%	
							Inferior	Superior
Ap	0 - 16	θ_r	0,062	0,96	18	0,007	0,039	0,083
		α	0,786			0,103	0,483	1,090
		n	1,898			0,118	1,551	2,246
		m	0,473			----	----	----
A31	16 - 30	θ_r	0,074	0,97	18	0,007	0,050	0,096
		α	0,950			0,134	0,554	1,346
		n	1,705			0,085	1,451	1,958
		m	0,413			----	----	----
A32	30 - 50	θ_r	0,028	0,97	18	0,007	0,007	0,049
		α	0,925			0,101	0,624	1,224
		n	1,999			0,118	1,650	2,349
		m	0,500			----	----	----
AC	50 - 66	θ_r	0,016	0,95	18	0,008	-0,008	0,042
		α	0,988			0,135	0,588	1,387
		n	1,999			0,147	1,565	2,434
		m	0,500			----	----	----
C1	66 - 84	θ_r	0,013	0,97	27	0,005	-0,001	0,028
		α	1,028			0,086	0,785	1,270
		n	1,999			0,092	1,741	2,258
		m	0,500			----	----	----
C2	84 - 104	θ_r	0,015	0,97	27	0,005	0,001	0,029
		α	1,153			0,093	0,891	1,414
		n	1,999			0,087	1,754	2,245
		m	0,500			----	----	----
C3	104 - 150	θ_r	0,011	0,95	45	0,005	-0,003	0,025
		α	1,043			0,086	0,810	1,275
		n	1,999			0,089	1,758	2,241
		m	0,500			----	----	----

* n = número de conjuntos (ϕ_m , θ , θ_s) utilizados para a obtenção do ajuste da curva de retenção.

valores elevados de r^2 , assim como a significância da maioria dos coeficientes das equações obtidas (teste t, com $p \geq 0,01$). Esta significância ocorre quando o limite inferior e superior do intervalo de confiança possuem o mesmo sinal e, portanto, não incluem o zero.

A partir dessas curvas de retenção, foram obtidos a macroporosidade, microporosidade, PA, θ_{CC} , θ_{PMP} e AD, que são apresentados na Tabela 8. Estes parâmetros poderiam ter sido obtidos a partir dos valores medidos em amostras individuais. No entanto, os valores obtidos na curva contemplam várias amostras, reduzindo erros devido à peculiaridade das amostras individuais.

Com relação à macro e a microporosidade, é importante destacar que o solo da área 1 apresenta grande quantidade de macroporos ao longo do perfil, que em média ocupam 2/3 da porosidade total, em detrimento da quantidade de microporos, que ocupam apenas 1/3. Para um solo tido como ideal, a proporção seria de 1/3 macroporos e 2/3 de microporos (Kiehl, 1979). Para o solo da área 2 verifica-se, em média no perfil, valor de macroporos da ordem de apenas 1/6 da

Tabela 6. Resultados do ajuste da curva de retenção de água no solo da área 2.

Horizontes	Espessura (cm)	Coeficientes	Valor	r^2	n*	Erro padrão	I.C. - 1%	
							Inferior	Superior
Ap	0 - 10	θ_r	0,341	0,84	10	0,104	0,291	0,391
		α	0,196			0,09	-0,120	0,511
		n	1,935			0,495	0,201	3,669
		m	0,483			----	----	----
A/Bi	10 - 22	θ_r	0,348	0,92	20	0,012	0,311	0,384
		α	0,210			0,071	0,003	0,417
		n	1,469			0,162	0,999	1,939
		m	0,319			----	----	----
B1i	22 - 70	θ_r	0,304	0,92	50	0,023	0,241	0,367
		α	0,318			0,077	0,110	0,526
		n	1,343			0,09	1,099	1,587
		m	0,255			----	----	----
B2ig	70 - 114	θ_r	0,284	0,89	40	0,041	0,171	0,397
		α	0,806			0,27	0,080	1,532
		n	1,210			0,066	1,032	1,388
		m	0,174			----	----	----
B3ig	114 - 125	θ_r	-2,318	0,82	20	9,38	-29,504	24,867
		α	5,753			5,803	-11,066	22,572
		n	1,012			0,040	0,886	1,138
		m	0,012			----	----	----
IICx	125 - 150	θ_r	-0,898	0,93	30	0,476	-2,218	0,420
		α	45,800			31,068	-40,278	131,9
		n	1,022			0,009	0,995	1,049
		m	0,022			----	----	----

* n = número de conjuntos (ϕ_m , θ , θ_s) utilizados para a obtenção do ajuste da curva de retenção.

porosidade total, enquanto a microporosidade representa 5/6 desta. Esta situação, embora oposta a que se verificou para o solo da área 1, também diverge do solo tido pela literatura como ideal (1/3 de macroporos e 2/3 de microporos), e a despeito de indicar possibilidade de retenção de volumes significativos de água, aponta para dificuldades na oxigenação do sistema radicular das plantas em períodos mais chuvosos. De acordo com Libardi (1995), os macroporos (raio maior que 0,05 mm) são responsáveis pela aeração do solo e drenagem do excesso de água, enquanto os microporos (raio < 0,05mm) respondem pela retenção de água.

Ainda em relação à área 1, merece destaque o fato da microporosidade diminuir em profundidade, estando os valores mais elevados das camadas superficiais associados aos maiores teores de carbono orgânico e a textura ligeiramente mais grosseira que aí se verificam. A macroporosidade, por outro lado, apresenta-se inversamente correlacionada ao teor de carbono orgânico,

Tabela 7. Resultados do ajuste da curva de retenção de água no solo da área 3.

Horizonte	Espessura (cm)	Coeficientes	Valor	r^2	n*	Erro padrão	I.C. – 1%	
							Inferior	Superior
Ap	0 - 10	θ_r	0,153	0,84	10	0,081	-0,130	0,437
		α	6,238			6,600	-16,86	29,34
		n	1,157			0,102	0,800	1,514
		m	0,136			----	----	----
A31	10 - 20	θ_r	0,18	0,92	10	0,039	0,040	0,32
		α	5,772			4,271	-9,178	20,723
		n	1,202			0,084	0,908	1,496
		m	0,168			----	----	----
C32	20 - 35	θ_r	0,200	0,92	20	0,033	0,104	0,297
		α	4,686			3,760	-6,213	15,585
		n	1,237			0,101	0,942	1,532
		m	0,192			----	----	----
Bt1	35 - 80	θ_r	0,204	0,89	50	0,022	0,144	0,264
		α	4,346			1,836	-0,583	9,276
		n	1,217			0,050	1,082	1,352
		m	0,178			----	----	----
Bt2	80 - 120	θ_r	0,212	0,82	40	0,016	0,169	0,256
		α	1,225			0,415	0,096	2,354
		n	1,408			0,093	1,153	1,663
		m	0,290			----	----	----
Bw	120 - 150	θ_r	0,193	0,93	30	0,025	0,123	0,262
		α	1,835			0,779	-0,323	3,994
		n	1,319			0,085	1,083	1,555
		m	0,242			----	----	----

* n = número de conjuntos (ϕ_m , θ , θ_s) utilizados para a obtenção do ajuste da curva de retenção.

aumentando em profundidade. Diferentemente do que se verificou para a área 1, os solos das áreas 2 e 3 mostraram aumento em profundidade tanto da macro quanto da microporosidade, o que neste caso, parece não estar associado ao teor de matéria orgânica, mas sim, ao próprio aumento da porosidade total em profundidade.

A análise dos dados da Tabela 8 mostra que a porosidade de aeração (PA) e a umidade na capacidade de campo (θ_{CC}) têm comportamento idêntico ao da macro e microporosidade, respectivamente. Isso já era esperado, uma vez que os limites entre os dois primeiros e entre os dois últimos atributos são determinados pela curva de retenção de água por valores de tensão não muito afastados entre si. A tensão limite para macro e microporos é aproximadamente de 0,6 m de coluna d'água, correspondente à manutenção da água em poros de raio menor que 0,05 mm, enquanto a da PA e θ_{CC} é de 1,0 m de coluna d'água, que esvazia poros de raio maior que 0,03 mm.

Tabela 8. Macroporosidade, microporosidade, porosidade de aeração (PA), umidade na capacidade de campo (θ_{CC}), umidade no ponto de murcha (θ_{PMP}) e água disponível (AD) dos três perfis estudados.

Horizonte	Espessura (cm)	Macro	Micro	PA	θ_{CC}	θ_{PMP}	AD
		-----($m^3 m^{-3}$)-----					
área 1							
Ap	0 - 16	0,306	0,160	0,343	0,125	0,063	0,062
A31	16 - 30	0,303	0,196	0,343	0,160	0,077	0,084
A32	30 - 50	0,372	0,109	0,339	0,077	0,028	0,048
AC	50 - 66	0,378	0,092	0,404	0,062	0,016	0,045
C1	66 - 84	0,384	0,084	0,408	0,057	0,013	0,044
C2	84 - 104	0,401	0,083	0,413	0,056	0,015	0,040
C3	104 - 150	0,393	0,085	0,429	0,056	0,011	0,044
área 2							
Ap	0 - 10	0,046	0,430	0,071	0,405	0,342	0,063
A/Bi	10 - 22	0,031	0,442	0,045	0,428	0,356	0,072
B1i	22 - 70	0,066	0,485	0,089	0,462	0,334	0,128
B2ig	70 - 114	0,089	0,492	0,106	0,473	0,351	0,122
B3ig	114 - 125	0,122	0,460	0,138	0,444	0,283	0,161
II Cx	125 - 150	0,152	0,261	0,165	0,248	0,128	0,120
área 3							
Ap	0 - 10	0,128	0,319	0,140	0,306	0,223	0,083
A31	10 - 20	0,146	0,319	0,160	0,305	0,226	0,080
C32	20 - 35	0,143	0,318	0,156	0,305	0,232	0,073
Bt1	35 - 80	0,148	0,346	0,161	0,331	0,247	0,084
Bt2	80 - 120	0,170	0,343	0,194	0,319	0,226	0,093
Bw	120 - 150	0,183	0,355	0,209	0,329	0,221	0,083

Corroborando com a discussão anterior, relativas à macro e microporosidade no solo da área 1, os baixos valores de θ_{CC} dessa área apontam para dificuldades no armazenamento de água. Isso implica num manejo de irrigação feito de maneira a aumentar a frequência de fornecimento de água para as plantas, em detrimento da lâmina aplicada.

Já para a área 2, os baixos valores de PA, principalmente nos horizontes superficiais Ap, A/Bi e B1i, apontam para problemas em relação à oxigenação do sistema radicular das plantas, especialmente, em períodos mais chuvosos. Cabe lembrar que, segundo Grable e Siemer (1968), dentre outros autores, uma porosidade mínima de 10% parece ser necessária para que a difusão de oxigênio atenda a demanda do sistema radicular. Devido a essa baixa aeração do solo, a irrigação deverá ser feita de forma cautelosa, para que a umidade do solo não atinja a capacidade de campo e tenha-se maior quantidade de poros livres de água, permitindo melhor aeração deste solo. Segundo Brady (1989), a deficiência de oxigênio no solo representa uma das maiores restrições para o desenvolvimento do sistema radicular, pois ocorre frequentemente a redução na absorção de água e nutrientes, e há formação de compostos inorgânicos tóxicos ao crescimento vegetal que são favorecidos pela aeração deficiente.

Embora a umidade na capacidade de campo muitas vezes possa servir para algumas inferências com relação à disponibilidade de água às plantas, este aspecto hídrico do solo somente é corretamente avaliado pela análise da água disponível, entre a CC e o PMP. De acordo com a Tabela 8, os valores de umidade na CC e PMP para os horizontes Ap e A31 da área 1, levam a valores de água disponível consideravelmente maiores (cerca de 7,3% do volume do solo) que os demais horizontes. Isso ocorre devido à contribuição da matéria orgânica na retenção de água, o que torna possível o cultivo de fruteiras nesse solo. Já para o solo da área 2, embora os valores de umidade na capacidade de campo revelem uma armazenagem de água cerca de 4,8 vezes maior que a do solo da área 1, os valores de água disponível são similares, pelo menos em superfície (cerca de 6,7% do volume do solo). Apenas a partir da terceira camada (0,22 – 0,70 m), os valores de AD da área 2 superam os da área 1, ultrapassando 12% do volume total do solo, contra os cerca de 4,5% que se verificam para área 1 nas profundidades maiores que 0,30 m. Como conseqüência, dependendo da profundidade efetiva do sistema radicular que for considerada, o manejo da

irrigação pode ser realizado utilizando-se uma quantidade de água e um tempo entre irrigações não muito diferente entre as áreas 1 e 2. Para a área 2, devido à sua textura pesada e à grande quantidade de microporos que retêm água em tensões elevadas, acima do PMP, a elevada umidade na CC não se constitui de referência para avaliação da disponibilidade de água.

Com relação ao solo da área 3, este não apresenta problemas de porosidade de aeração (PA), visto que, em média, os valores são da ordem de $0,17 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, relativamente uniformes em todo o perfil. Valores dessa ordem não são considerados um fator de impedimento para o crescimento e o desenvolvimento das raízes das culturas, o quê, de acordo com muitos autores, somente ocorreria em valores abaixo de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Entretanto, a despeito desse solo ser bastante argiloso e apresentar alto percentual de microporos (cerca de $2/3$ da porosidade total), ele também disponibiliza uma quantidade não muito elevada de água para as plantas (cerca de 8% do volume total do solo). A retenção de água em potenciais elevados, nos quais a planta não consegue ter acesso, é um aspecto negativo deste solo.

Analisando conjuntamente as Tabelas 4 e 8, verifica-se que nos perfis de solo das áreas 2 e 3 ocorre um efeito negativo da densidade do solo sobre a retenção de água, mais intenso na CC que no PMP. Silva e Kay (1997a) verificaram efeito negativo da densidade para θ_{CC} e positivo para o θ_{PMP} . Segundo esses autores, em elevados potenciais (-10 kPa) a retenção de água é fortemente influenciada pela estrutura do solo, em função da porosidade total que diminui com o aumento da densidade. Já Tormena (1998), em um latossolo roxo, e Leão (2002), em um latossolo vermelho distrófico, constataram que a umidade na CC aumentou com a densidade do solo. Segundo esses autores, nos latossolos o processo de compactação, geralmente, não afeta a porosidade presente no interior dos microagregados, porém os macroporos localizados entre os agregados têm seu diâmetro reduzido, passando a atuar na retenção de água e, deste modo, contribuindo para o aumento da quantidade de água retidas nas baixas tensões. Em relação à AD, o efeito depressivo da densidade do solo foi pronunciado na área 2, mas não perceptível na área 3, provavelmente porque nesta última área a θ_{CC} tenha tido reduções menos acentuadas com o aumento da densidade do que verificados para a área 2.

4.3 Resistência à penetração

As Tabelas 9, 10 e 11 mostram os valores de resistência à penetração, densidade e umidade para as amostras das áreas 1, 2 e 3, respectivamente, de acordo com os diferentes potenciais mátricos aplicados. Conforme esses dados,

Tabela 9. Resistência à penetração, densidade do solo e umidade em função dos potenciais mátricos aplicados nas amostras dos horizontes do solo da área 1.

Horizontes	Espessura (cm)	Potencial mátrico (kPa)			
		30	100	500	1500
		Resistência à penetração (MPa)			
Ap	0 - 16	1,26	1,79	2,43	2,26
A31	16 - 30	1,15	1,21	1,93	2,06
A32	30 - 50	0,53	0,62	0,61	0,85
AC	50 - 66	0,33	0,53	0,49	0,34
C1	66 - 84	0,28	0,37	0,33	0,33
C2	84 - 104	0,28	0,28	0,24	0,24
C3	104 - 150	0,39	0,29	0,23	0,29
Horizontes	Espessura (cm)	Densidade do solo (Mg m ⁻³)			
Ap	0 - 16	1,45	1,50	1,46	1,45
A31	16 - 30	1,35	1,41	1,37	1,41
A32	30 - 50	1,44	1,43	1,42	1,42
AC	50 - 66	1,46	1,50	1,48	1,37
C1	66 - 84	1,45	1,45	1,43	1,50
C2	84 - 104	1,43	1,43	1,43	1,44
C3	104 - 150	1,43	1,45	1,42	1,42
Horizontes	Espessura (cm)	Umidade (m ³ m ⁻³)			
Ap	0 - 16	0,081	0,073	0,060	0,058
A31	16 - 30	0,110	0,105	0,078	0,067
A32	30 - 50	0,049	0,043	0,039	0,035
AC	50 - 66	0,036	0,021	0,036	0,023
C1	66 - 84	0,029	0,021	0,023	0,025
C2	84 - 104	0,023	0,019	0,022	0,020
C3	104 - 150	0,023	0,020	0,022	0,015

comparativamente aos das áreas 2 e 3, o solo da área 1 apresenta valores baixos de resistência à penetração, considerados não prejudiciais ao desenvolvimento do sistema radicular, o que se justifica pela grande presença de macroporos, pela textura arenosa e pela ausência de estrutura (grãos simples). As exceções são os horizontes Ap e A31, que apresentam maiores valores de resistência devido, provavelmente, a maior presença de matéria orgânica, conferindo-lhes melhor agregação das partículas. Os dados das Tabelas 9, 10 e 11 foram ajustados às

Tabela 10. Resistência à penetração, densidade do solo e umidade em função dos potenciais mátricos aplicados nas amostras dos horizontes do solo da área 2.

Horizontes	Espessura (cm)	Potencial mátrico (kPa)				
		10	30	100	500	1500
		Resistência à penetração (MPa)				
Ap	0 - 10	2,98	1,91	3,52	7,18	5,89
A/Bi	22 - 70	1,93	1,97	3,67	5,3	6,89
B1i	22 - 70	1,92	1,89	2,43	4,71	4,05
B2ig	70 - 114	1,39	1,30	2,13	2,98	4,16
B3ig	114 - 125	0,77	0,90	1,62	1,95	3,38
IICx	125 - 150	1,17	1,88	5,42	11,83	13,59
Horizontes	Espessura (cm)	Densidade do solo (Mg m ⁻³)				
Ap	0 - 10	1,44	1,19	1,40	1,50	1,40
A/Bi	10 - 22	1,37	1,31	1,35	1,42	1,32
B1i	22 - 70	1,26	1,21	1,22	1,23	1,18
B2ig	70 - 114	1,11	1,10	1,13	1,12	1,14
B3ig	114 - 125	1,02	1,03	1,13	1,07	1,11
IICx	125 - 150	1,42	1,39	1,56	1,59	1,56
Horizontes	Espessura (cm)	Umidade (m ³ m ⁻³)				
Ap	0 - 10	0,407	0,366	0,378	0,358	0,303
A/Bi	22 - 70	0,422	0,409	0,375	0,365	0,346
B1i	22 - 70	0,466	0,419	0,395	0,353	0,315
B2ig	70 - 114	0,472	0,437	0,410	0,372	0,335
B3ig	114 - 125	0,457	0,458	0,351	0,288	0,295
IICx	125 - 150	0,271	0,268	0,161	0,153	0,137

equações 13a, 13b ou 13c, sendo os coeficientes de ajuste apresentados nas Tabelas 12, 13 e 14. Para as áreas 2 e 3, os dois horizontes superficiais foram juntados para se fazer o ajuste ao referido modelo, visto que, além desses horizontes terem características semelhantes, um número maior de observações implica em maior confiabilidade dos coeficientes obtidos.

Para as áreas 2 e 3, os coeficientes apresentados nas Tabelas 13 e 14 demonstram que a resistência à penetração variou positivamente com a

Tabela 11. Resistência à penetração, densidade do solo e umidade em função dos potenciais mátricos aplicados nas amostras dos horizontes do solo da área 3.

Horizontes	Espessura (cm)	Potencial mátrico (kPa)				
		10	30	100	500	1500
		Resistência à penetração (MPa)				
Ap	0 - 10	2,27	3,04	6,41	12,36	23,55
A31	10 - 20	1,67	4,28	4,28	12,03	15,79
C32	20 - 35	1,77	4,26	4,27	17,84	20,29
Bt1	35 - 80	1,58	2,76	4,47	15,23	14,43
Bt2	80 - 120	0,94	1,97	5,40	8,61	10,36
Bw	120 - 150	0,49	1,56	6,22	7,46	8,29
Horizontes	Espessura (cm)	Densidade do solo (Mg m ⁻³)				
Ap	0 - 10	1,54	1,49	1,51	1,46	1,56
A31	10 - 20	1,46	1,51	1,53	1,49	1,46
C32	20 - 35	1,46	1,51	1,47	1,52	1,54
Bt1	35 - 80	1,37	1,36	1,40	1,44	1,39
Bt2	80 - 120	1,34	1,26	1,26	1,29	1,27
Bw	120 - 150	1,23	1,21	1,28	1,27	1,23
Horizontes	Espessura (cm)	Umidade (m ³ m ⁻³)				
Ap	0 - 10	0,320	0,281	0,261	0,225	0,232
A31	10 - 20	0,309	0,273	0,245	0,233	0,225
C32	20 - 35	0,311	0,281	0,252	0,240	0,231
Bt1	35 - 80	0,334	0,311	0,272	0,249	0,237
Bt2	80 - 120	0,344	0,254	0,239	0,230	0,217
Bw	120 - 150	0,364	0,257	0,248	0,225	0,213

densidade e negativamente com umidade do solo, concordando com os resultados obtidos por diversos autores (Silva et al., 1994, Tormena et al., 1998; Imhoff et al., 2000b; Leão, 2002). Para o solo da área 1, no entanto, a Tabela 12 mostra um comportamento peculiar. Para os horizontes Ap e A31, enquanto a relação entre umidade e resistência à penetração apresenta comportamento similar ao descrito para as áreas 2 e 3 (ou seja, RP inversamente relacionada à umidade do solo), a relação entre densidade e RP não se verifica, de modo que os dados foram ajustados não à equação 13a, mas sim à equação 13b. Esta falta de ajuste pode ter ocorrido devido à pequena variação entre amostras com relação à densidade do solo. Para o horizonte A32, a partir do qual se restabelece a relação positiva entre densidade e resistência à penetração, deixa de ser verificada a relação negativa entre umidade e RP, levando a que os dados desse horizonte fossem ajustados à equação 13c, ao invés de 13a. Com relação aos demais horizontes (AC, C1, C2, C3), a peculiaridade é a inversão do

Tabela 12. Coeficientes resultantes do ajuste não linear da curva de resistência do solo à penetração da área 1.

Horizontes	Espessura (cm)	Coeficientes	Valor	r^2	n	Erro padrão	I.C. - 1%	
							Inferior	Superior
Ap	0 - 16	a	0,234	0,60	8	0,192	-0,237	0,707
		b	-0,803			0,302	-1,546	-0,060
A31	16 - 30	a	0,201	0,89	8	0,073	0,020	0,381
		b	-0,936			0,144	-1,291	-0,581
A32	30 - 50	a	60,725	0,50	8	17,292	-35,733	82,249
		c	-19,207			8,028	-38,934	0,518
AC	50 - 66	a	0,022	0,90	8	0,030	-0,100	0,146
		b	0,084			0,264	-0,981	1,150
		c	8,313			1,781	-15,495	-1,131
C1	66 - 84	a	0,099	0,57	12	0,207	-0,573	0,773
		b	0,447			0,410	-0,887	1,782
		c	7,452			2,430	-15,353	0,447
C2	84 - 104	a	2,358	0,70	12	2,234	-4,903	9,621
		b	0,610			0,131	0,181	1,038
		c	0,320			2,070	-7,049	6,408
C3	104 - 150	a	0,833	0,81	20	0,696	-1,183	2,851
		b	0,656			0,085	0,407	0,904
		c	4,127			1,796	-9,330	1,080

n = número de conjuntos (RP, θ , ρ), ou pares (RP, θ) ou (RP, ρ), utilizados para o ajuste das equações 13a, 13b ou 13c, respectivamente.

comportamento da relação entre umidade e RP, passando a ocorrer efeito positivo da umidade sobre a RP. Esta inversão não restringiu a utilização da equação 13a, mas diferentemente das áreas 2 e 3 levou à obtenção de valores positivos para o coeficiente “b”. Uma explicação admissível para esse caso é que esses horizontes mais profundos apresentarem agregação tão frágil que, quando se tornam úmidos, a água promove a adesão das partículas do solo, provendo uma pequena agregação, e à medida que o teor de água do solo diminui, esta deixa de ser um fator de agregação e as partículas tendem a se soltarem.

Com relação aos solos das áreas 2 e 3 nota-se, através das Tabelas 10 e 11, que a resistência à penetração diminui em profundidade, o que está relacionado com a redução dos valores de densidade ao longo do perfil, com exceção do horizonte IICx da área 2. Observa-se também que, tanto na área 2 quanto na 3, embora a resistência à penetração aumente com a redução do potencial e da umidade, altas resistências ocorrem mesmo em potenciais mátricos elevados, próximos a CC, o que irá restringir ou mesmo zerar o IHO. Segundo Giarola et al. (2001), a densidade do solo tem um efeito direto e positivo na resistência do solo à penetração. Para um solo de textura uniforme, a umidade e a densidade do solo são as principais fontes de variação da resistência do solo à penetração. Exceto para o caso dos horizontes profundos da área 1, já apresentados, no presente trabalho a umidade foi inversamente relacionada com

Tabela 13. Coeficientes resultantes do ajuste não linear da curva de resistência do solo à penetração da área 2.

Horizontes	Espessura (cm)	Coeficientes	Valor	r^2	n	Erro padrão	I.C. – 1%	
							Inferior	Superior
Ap e A/Bi	0 - 22	a	0,037	0,90	15	0,021	-0,027	0,102
		b	-2,461					
		c	6,593					
B1i	22 - 70	a	0,101	0,77	25	0,040	-0,012	0,216
		b	-2,635					
		c	3,928					
B2ig	70 - 114	a	0,104	0,83	25	0,041	-0,014	0,223
		b	-2,942					
		c	3,490					
B3ig	114 - 125	a	0,301	0,64	10	0,224	-0,485	1,088
		b	-1,547					
		c	1,004					
IICx	125 - 150	a	0,037	0,68	15	0,104	-0,282	0,356
		b	-1,380					
		c	5,530					

n = número de conjuntos (RP, θ , p) utilizados para o ajuste das equações 13a.

Tabela 14. Coeficientes resultantes do ajuste não linear da curva de resistência do solo à penetração da área 3.

Horizontes	Espessura (cm)	Coeficientes	Valor	r^2	n	Erro padrão	I.C. – 1%				
							Inferior	Superior			
Ap e A31	0 - 20	a	0,024	0,63	10	0,021	-0,340	0,388			
		b	-3,938						2,367	-11,033	3,157
		c	1,310						6,823	-23,130	20,508
C32	20 - 35	a	0,010	0,65	10	0,036	-0,118	0,139			
		b	-2,934						1,420	-7,906	2,037
		c	7,381						6,159	-28,938	14,174
Bt1	35 - 80	a	0,011	0,77	25	0,016	-0,034	0,056			
		b	-3,923						0,814	-6,220	-1,627
		c	4,289						1,553	-8,668	0,090
Bt2	80 - 120	a	0,008	0,75	20	0,014	-0,035	0,051			
		b	-3,324						1,080	-6,625	-0,024
		c	7,599						2,020	-13,771	-1,427
Bw	120 - 150	a	0,020	0,80	15	0,034	-0,084	0,125			
		b	-3,041						0,831	-5,580	-0,502
		c	5,584						2,971	-14,662	3,493

n = número de conjuntos (RP, θ , ρ) utilizados para o ajuste das equações 13a.

a resistência à penetração, de modo que, para uma mesma densidade, a resistência do solo aumenta com o secamento. Essa relação é devida à diminuição da mobilidade das partículas do solo, que aumenta a força requerida para deslocar as partículas do solo à medida que o cone metálico penetra, ou, similarmente, as raízes crescem. Em solos com umidade mais baixa, a água encontra-se sob maior tensão nos poros do solo. A essa tensão, somam-se as forças já existentes entre os sólidos do solo, fazendo com que, em solos com menor umidade, a resistência à deformação seja maior. Esse efeito ainda é amplificado porque, geralmente, a diminuição da umidade causa a aproximação maior das partículas de argila, resultando numa agregação mais forte dessas partículas. Como a umidade do solo varia espacial e temporalmente, para se avaliar qualquer efeito de práticas de manejo do solo na resistência à penetração é necessário considerar o efeito da umidade do solo.

4.4 Intervalo hídrico ótimo (IHO)

Substituindo-se os coeficientes apresentados nas Tabelas 5, 6 e 7 nas equações 17 e 18 obteve-se os valores θ_{CC} e θ_{PMP} , respectivamente, para cada amostra indeformada utilizada. Com relação à θ_{AR} , seu valor para cada amostra foi obtido pela equação 19. Da mesma maneira, os coeficientes apresentados nas

Tabelas 13 e 14, referentes às áreas 2 e 3, foram substituídos na equação 20 para obter a umidade em que a RP do solo atinge 3 Mpa. Para a área a substituição dos coeficientes na equação 20 foi inviabilizada pelo fato de que o valor de RP pretendido (3 MPa) não está incluído na faixa de RP para o qual estes coeficientes foram determinados. Portanto, a equação obtida não seria válida para este valor de RP, de modo que a substituição seria inadequada e resultaria em valores irreais de umidade do solo para que fosse atingida 3 MPa de RP. A não obtenção de valores críticos não se traduz num problema, uma vez que os valores de RP obtidos demonstram que o solo da área 1 não apresenta limitações de resistência à penetração ao crescimento de raízes.

Os valores de θ_{CC} , θ_{PMP} , θ_{AR} e θ_{RP} obtidos para cada uma das amostras indeformadas coletadas em cada horizonte foram plotadas em função da densidade do solo, obtendo-se, para a área 1, as Figuras 1 a 4, para a área 2, as Figuras 5 a 7, e para a área 3, as Figuras 8 a 10. Essas figuras representam a variação da umidade do solo nos limites críticos definidos por θ_{CC} , θ_{PMP} , θ_{RP} , e θ_{AR} em função da densidade do solo. O IHO corresponde a área hachurada do gráfico, tendo sido definido em seu limite superior pela θ_{CC} ou θ_{AR} , e em seu limite inferior pela θ_{PMP} ou θ_{RP} .

De acordo com as Figuras 1 a 4, para a área 1 em nenhum dos horizontes e valores de densidade do solo, a resistência à penetração ou a porosidade de aeração foram limitantes, de modo que o IHO é igual ao valor de água disponível (AD), ou seja, é o intervalo entre a umidade na CC e no PMP. Além disso, para esse solo, as umidades na CC e no PMP são pouco afetadas por variações na densidade e, conseqüentemente, por variações na porosidade total, sendo as linhas plotadas praticamente horizontais, paralelas ao eixo da abscissa. Neste caso, alterações na densidade que levem a um afastamento desse valor médio ρ , indicado nos gráficos, pouco interferem na qualidade do solo no que diz respeito à amplitude da AD e do IHO. O principal fator que interfere na qualidade desse solo é, certamente, o teor de matéria orgânica, cujos maiores valores verificados nos horizontes superficiais Ap e A31 se associam a valores também mais amplos de AD e, portanto, de IHO.

Para as faixas de densidade obtidas nas áreas 2 e 3, verifica-se, em cada horizonte, um efeito negativo da densidade sobre a retenção de água na CC e no PMP, mais pronunciado na primeira e mais sutil na última (exceto horizontes B3ig

e IICx). Esses resultados, ao mesmo tempo que corroboram com os discutidos no item 4.2, realizada com base nos valores médios de densidade de todo o perfil, são contrários ao obtidos por Tormena et al.(1998), Klein e Libardi (2000) e Leão (2002). Esses autores, a despeito de registrarem que para os solos estudados as umidades na CC e no PMP foram pouco afetadas por variações na densidade, observaram que a densidade do solo teve um efeito positivo na umidade na CC e PMP. Já Silva e Kay (1997a) constataram um efeito negativo da densidade na retenção de água na CC e positivo no PMP. Nota-se, dos trabalhos citados,

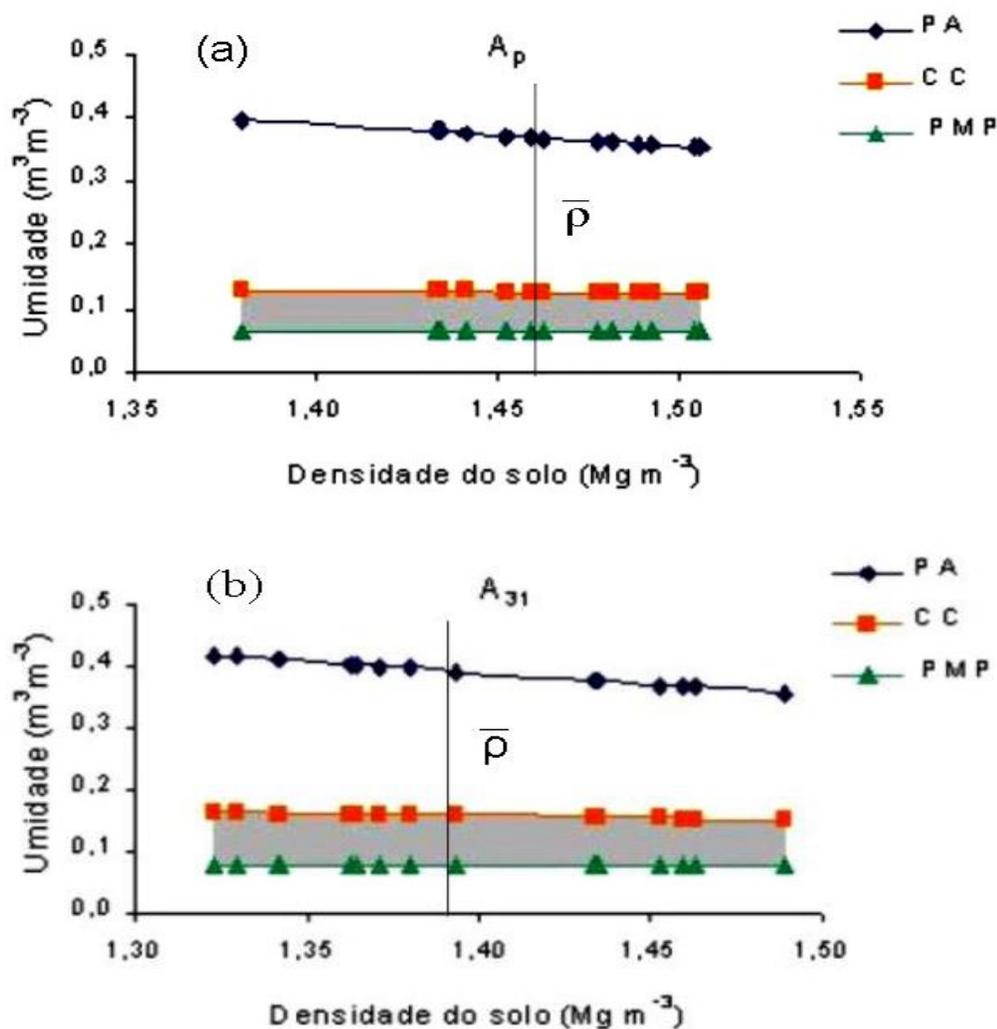


Figura 1. Umidade volumétrica em função da densidade do solo para os níveis críticos PA - porosidade de aeração de 10%, CC - capacidade de campo e PMP - ponto de murcha permanente, na área 1, para: (a) horizonte A_p ; e (b) horizonte A_{31} . A área hachurada representa o IHO (ou, neste caso, a AD), e $\bar{\rho}$ é a densidade média do horizonte.

que há bastante divergências nos resultados apresentados na literatura. Isso ocorre, porque a retenção de água no solo é uma característica que varia de acordo com a textura, a estrutura e a natureza dos componentes de cada solo. Portanto, é de se esperar essa variação nos resultados, pois cada solo apresenta características distintas que lhe confere certas particularidades.

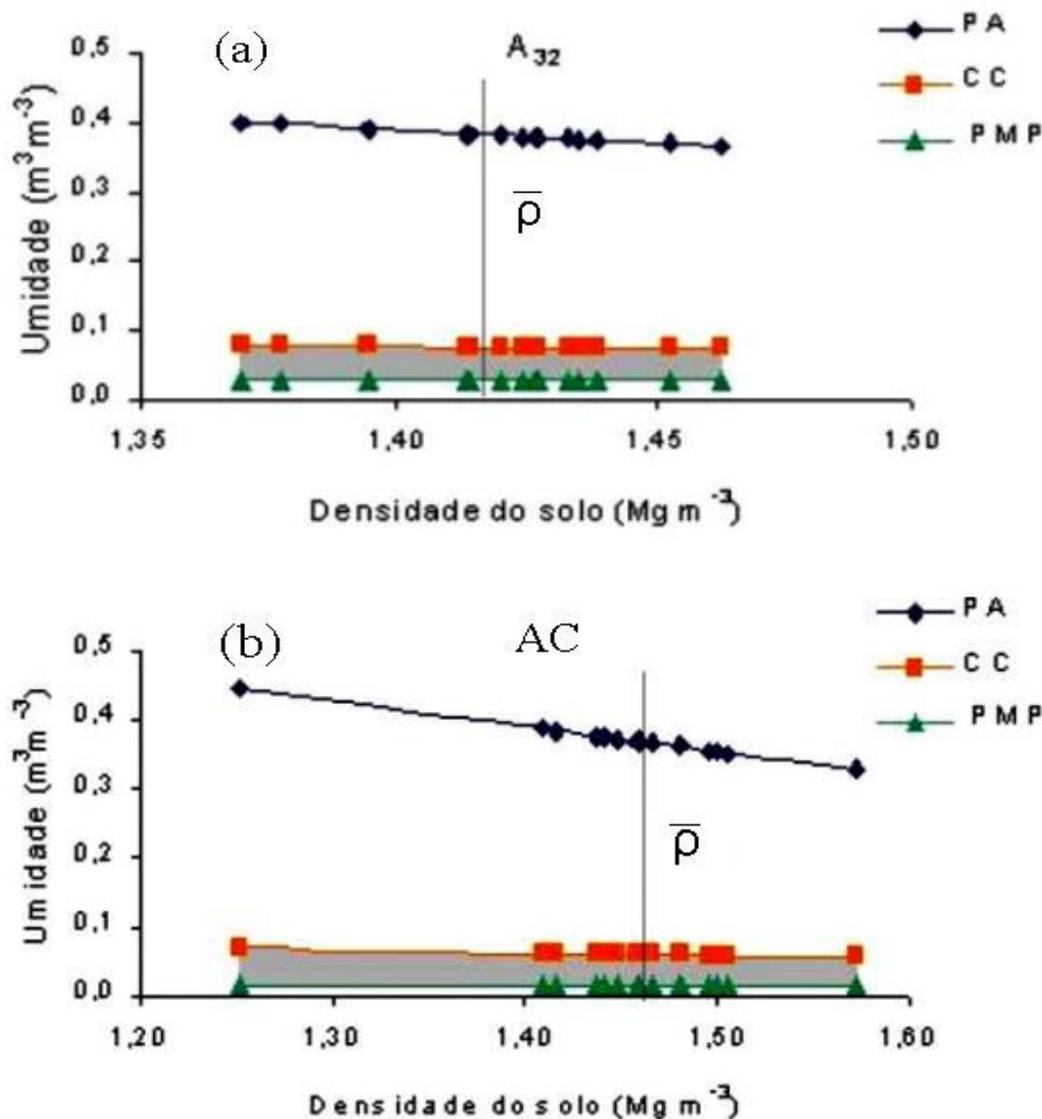


Figura 2. Umidade volumétrica em função da densidade do solo para os níveis críticos PA - porosidade de aeração de 10%, CC - capacidade de campo e PMP - ponto de murcha permanente, na área 1, para: (a) horizonte A₃₂; e (b) horizonte AC. A área hachurada representa o IHO (ou, neste caso, a AD), e $\bar{\rho}$ é a densidade média do horizonte.

Para os horizontes do solo da área 2 e 3, a diminuição da porosidade total com o aumento da densidade é acompanhada da redução tanto da micro quanto da macroporosidade, o quê justifica a menores retenções de água na CC e PMP nas maiores densidades. Para Silva e Kay (1997a), em baixas tensões a retenção é fortemente influenciada pela porosidade total, que diminui com o aumento da densidade, e que sob altas tensões é controlada pelo volume de microporos.

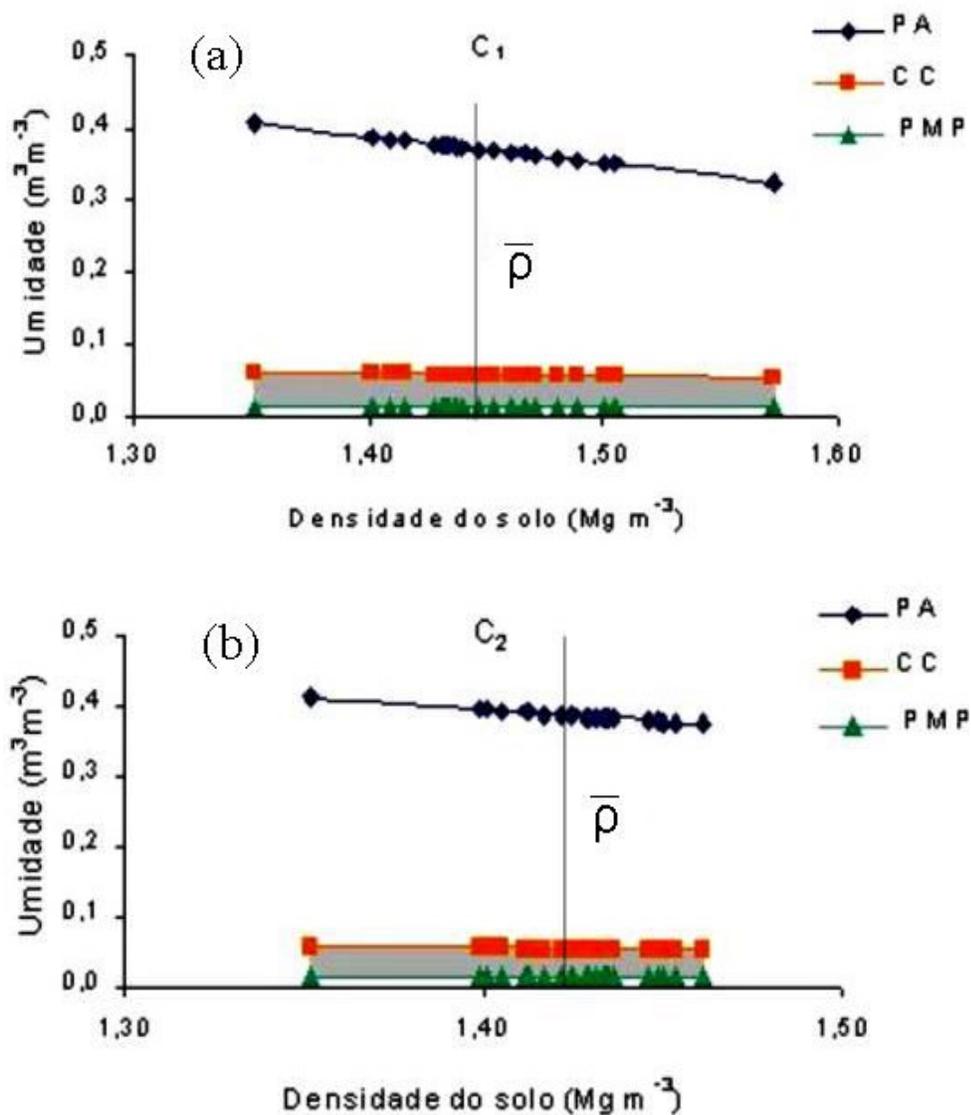


Figura 3. Umidade volumétrica em função da densidade do solo para os níveis críticos PA - porosidade de aeração de 10%, CC - capacidade de campo e PMP - ponto de murcha permanente, na área 1, para: (a) horizonte C1; e (b) horizonte C2. A área hachurada representa o IHO (ou, neste caso, a AD), e $\bar{\rho}$ é a densidade média do horizonte.

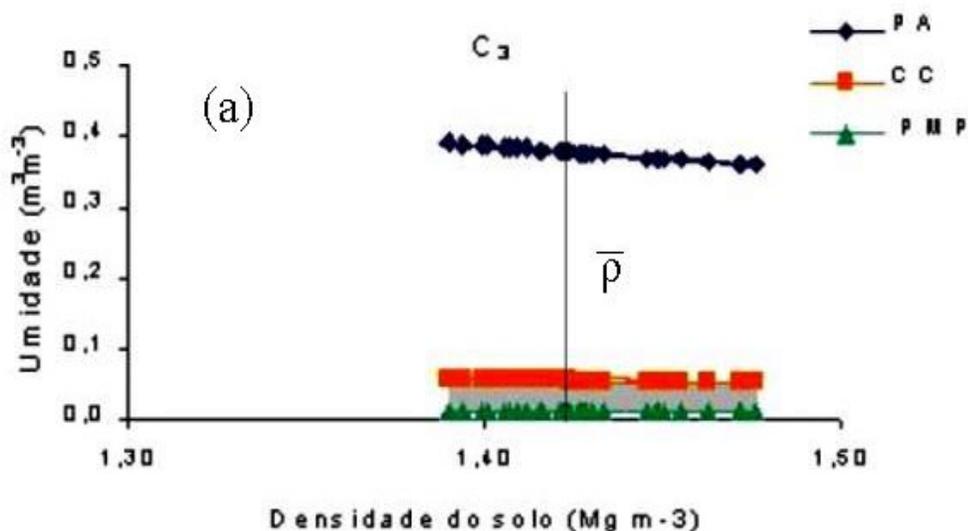


Figura 4. Umidade volumétrica em função da densidade do solo para os níveis críticos PA - porosidade de aeração de 10%, CC - capacidade de campo e PMP - ponto de murcha permanente, na área 1, para o horizonte C3. A área hachurada representa o IHO (ou, neste caso, a AD), e $\bar{\rho}$ é a densidade média do horizonte.

Com o aumento da densidade do solo, nas áreas 2 e 3 (Figuras de 5 a 10), ocorreu, simultaneamente, aumento na θ_{RP} e decréscimo na θ_{AR} . Os horizontes Ap, A/Bi e B1i da área 2 sempre apresentaram, para o valor médio de densidade do solo, porosidade de aeração $< 10\%$ (Tabela 8), de modo que a θ_{AR} sempre foi o limite superior de umidade do IHO. Já para os horizontes B2ig, B3ig e IICx da área 2, assim como para todos os horizontes da área 3, a porosidade de aeração correspondente à $\bar{\rho}$ em nenhum caso foi inferior a 10% (Tabela 8), pelo que sempre θ_{CC} foi o limite superior do IHO. Também considerando o valor médio da densidade do solo, a θ_{RP} foi maior que o θ_{PMP} em todos os horizontes, exceto para o B3ig na área 2, sendo portanto, considerada sempre como o limite inferior de umidade do IHO.

Lembramos que o valor do IHO correspondente à densidade média ou à porosidade total média de cada horizonte é calculado pela equação 16a, 16b, 16c ou 16d a partir dos valores de θ_{CC} , θ_{PMP} , θ_{AR} e θ_{RP} obtidos, respectivamente, pelas equações 9, 11, 14 e 15a (ou 15b). Gráficamente, o IHO pode ainda ser

observado nas Figuras de 1 a 10 pela medida da faixa hachurada na posição em que se apresenta a linha vertical que representa $\bar{\rho}$.

Para a área 1, o IHO corresponde a água disponível, cujos valores já foram apresentados na Tabela 8; para as áreas 2 e 3, no entanto, os valores do IHO são menores que o da AD, sendo apresentados na Tabela 15. Considerando

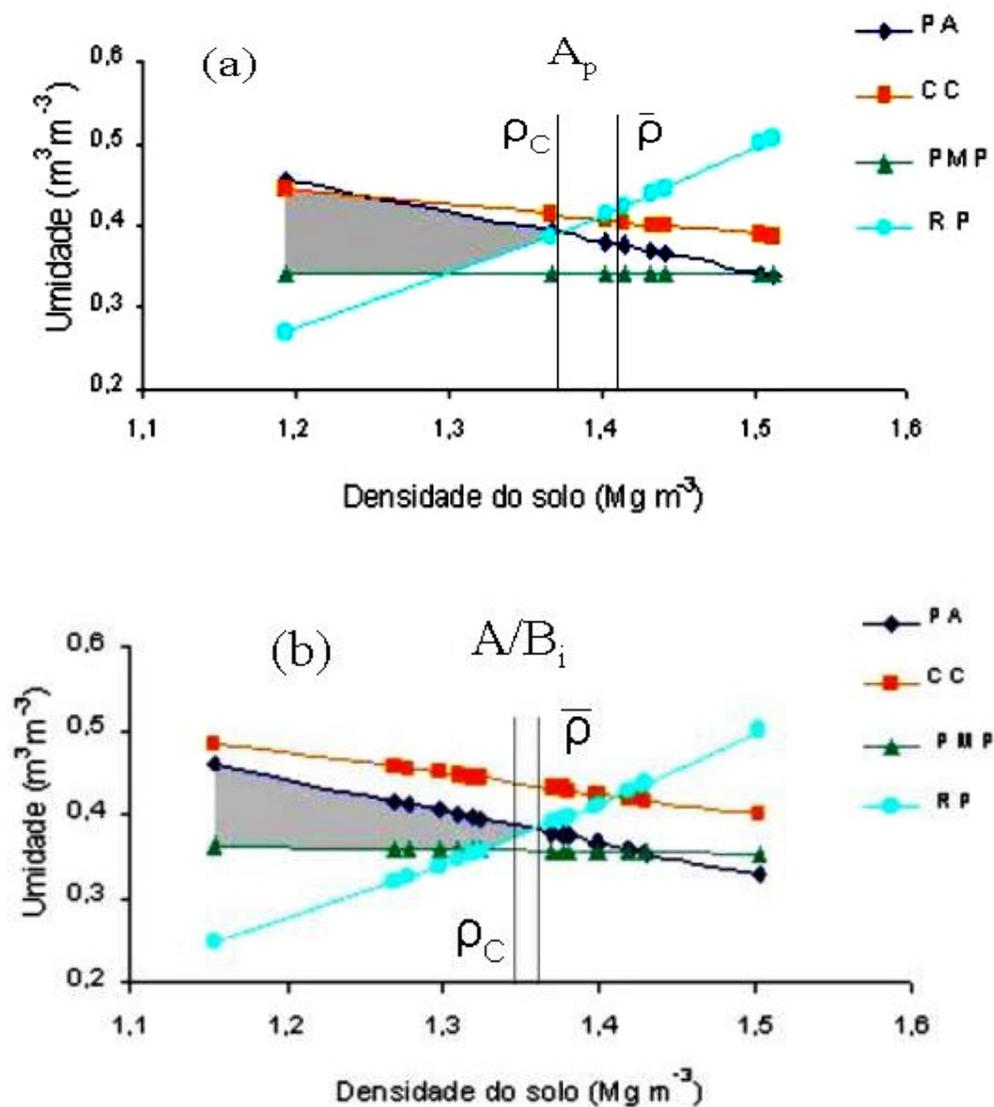


Figura 5. Umidade volumétrica em função da densidade do solo para os níveis críticos PA - porosidade de aeração de 10%, CC - capacidade de campo, PMP - ponto de murcha permanente e RP - resistência à penetração de 3MPa na área 2, para: (a) horizonte A_p ; e (b) horizonte A/B_i . A área hachurada representa o IHO, $\bar{\rho}$ é a densidade média do horizonte, e ρ_c é a densidade em que o IHO = 0.

a situação média da densidade e porosidade total de cada horizonte, a situação mais problemática se verifica na área 3, onde o IHO foi zero para todos os horizontes. Para a área 2 os problemas se concentram nos horizontes superficiais Ap e A/Bi, onde o IHO também é zero.

Os valores da densidade e porosidade total críticas (ρ_c e PT_c), correspondentes aos valores limítrofes nos quais o IHO é igual a zero, da

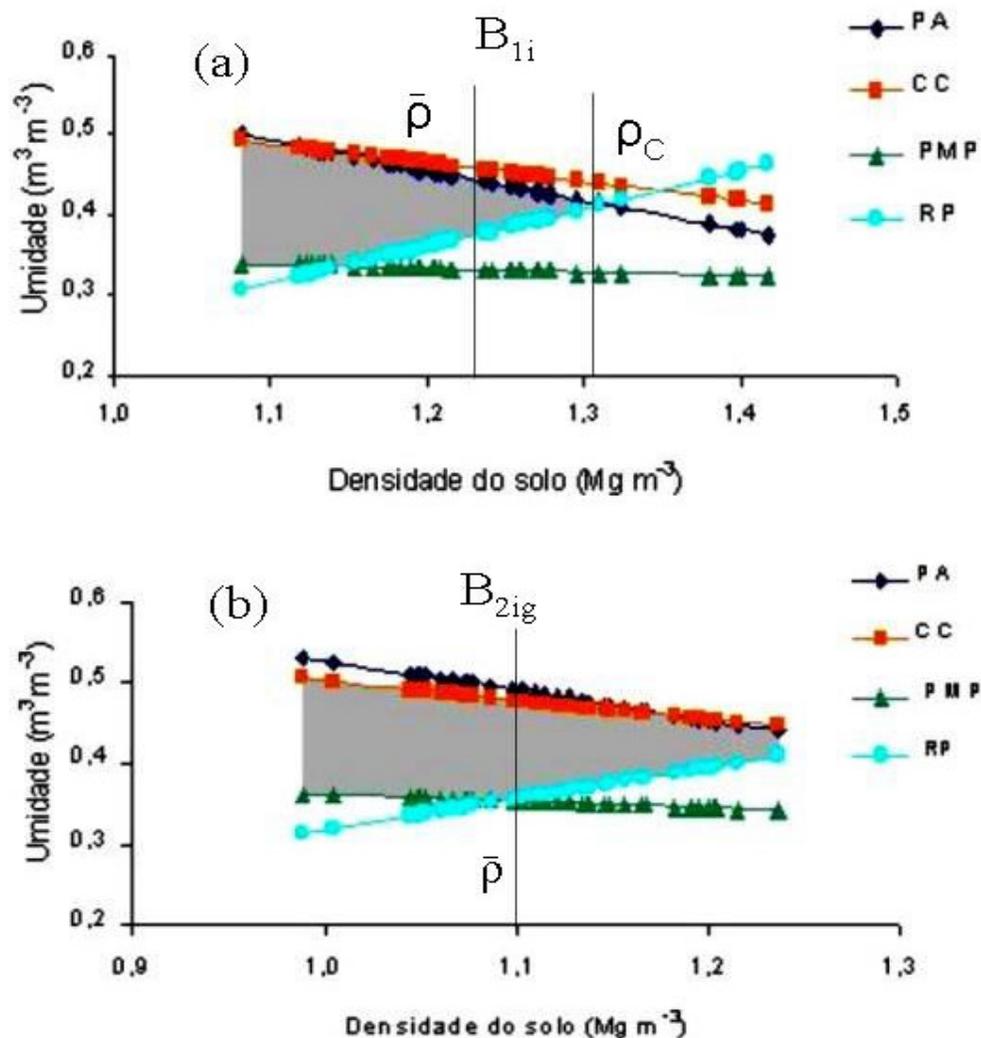


Figura 6. Umidade volumétrica em função da densidade do solo para os níveis críticos PA - porosidade de aeração de 10%, CC - capacidade de campo, PMP - ponto de murcha permanente e RP - resistência à penetração de 3MPa na área 2, para: (a) horizonte B_{1i}; e (b) horizonte B_{2ig}. A área hachurada representa o IHO, $\bar{\rho}$ é a densidade média do horizonte, e ρ_c é a densidade em que o IHO = 0.

densidade e porosidade total nos quais θ_{AR} substitui θ_{CC} como limite superior do IHO (ρ_{AR} e PT_{AR}), e da densidade e porosidade total nos quais θ_{RP} substitui θ_{PMP} como limite inferior do IHO (ρ_{RP} e PT_{RP}) também são apresentados na Tabela 15. Conforme descrito no item “m” do tópico 3.3.2, estes valores de densidade e

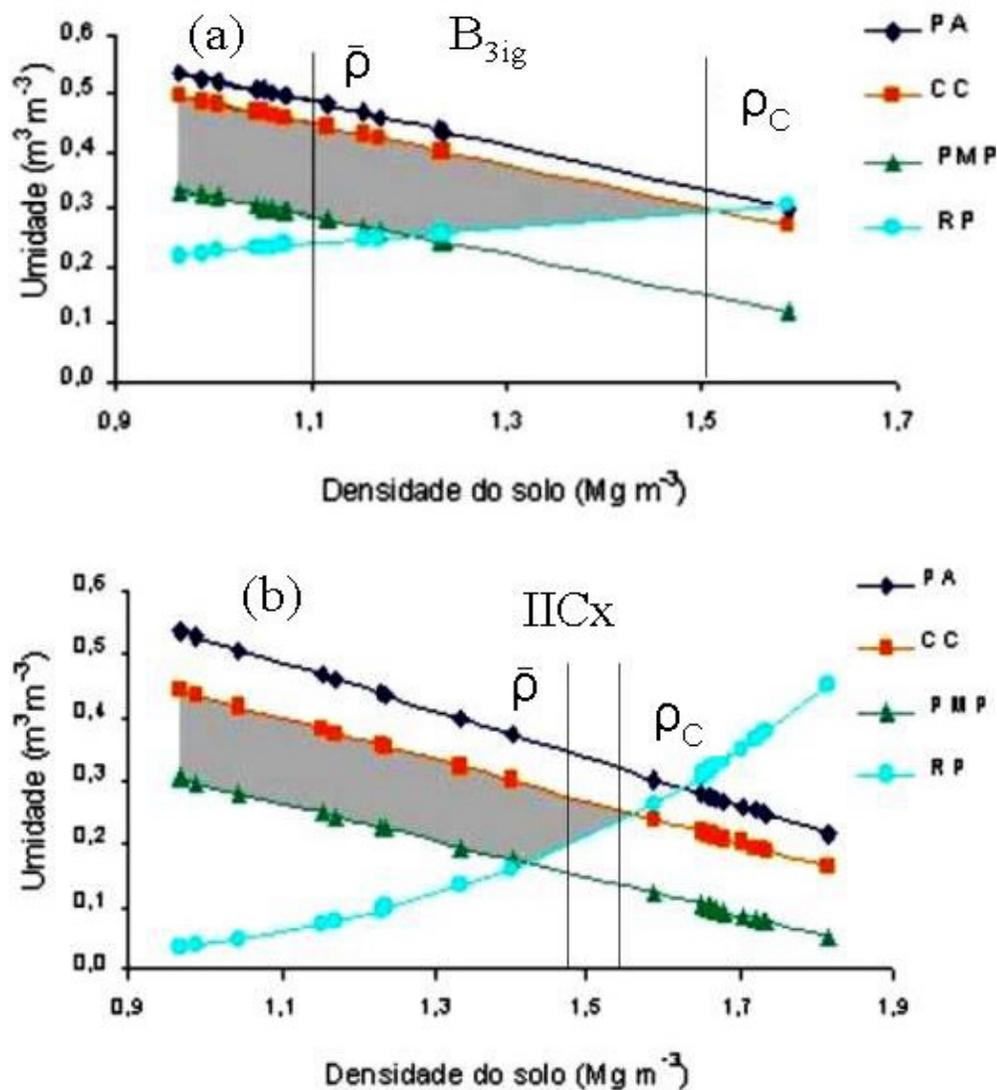


Figura 7. Umidade volumétrica em função da densidade do solo para os níveis críticos PA - porosidade de aeração de 10%, CC - capacidade de campo, PMP - ponto de murcha permanente e RP – resistência à penetração de 3MPa na área 2, para: (a) horizonte B3ig; e (b) horizonte IICx. A área hachurada representa o IHO, $\bar{\rho}$ é a densidade média do horizonte, e ρ_c é a densidade em que o IHO = 0.

porosidade total são obtidos nas interseções das equações que determinam os limites superior e inferior de umidade do IHO.

Considerando não o valor médio de densidade ou porosidade total, mas sim toda a sua faixa de variação apresentada nas Figuras de 5 a 10, depreende-se que a situação mais problemática é a dos horizontes superficiais

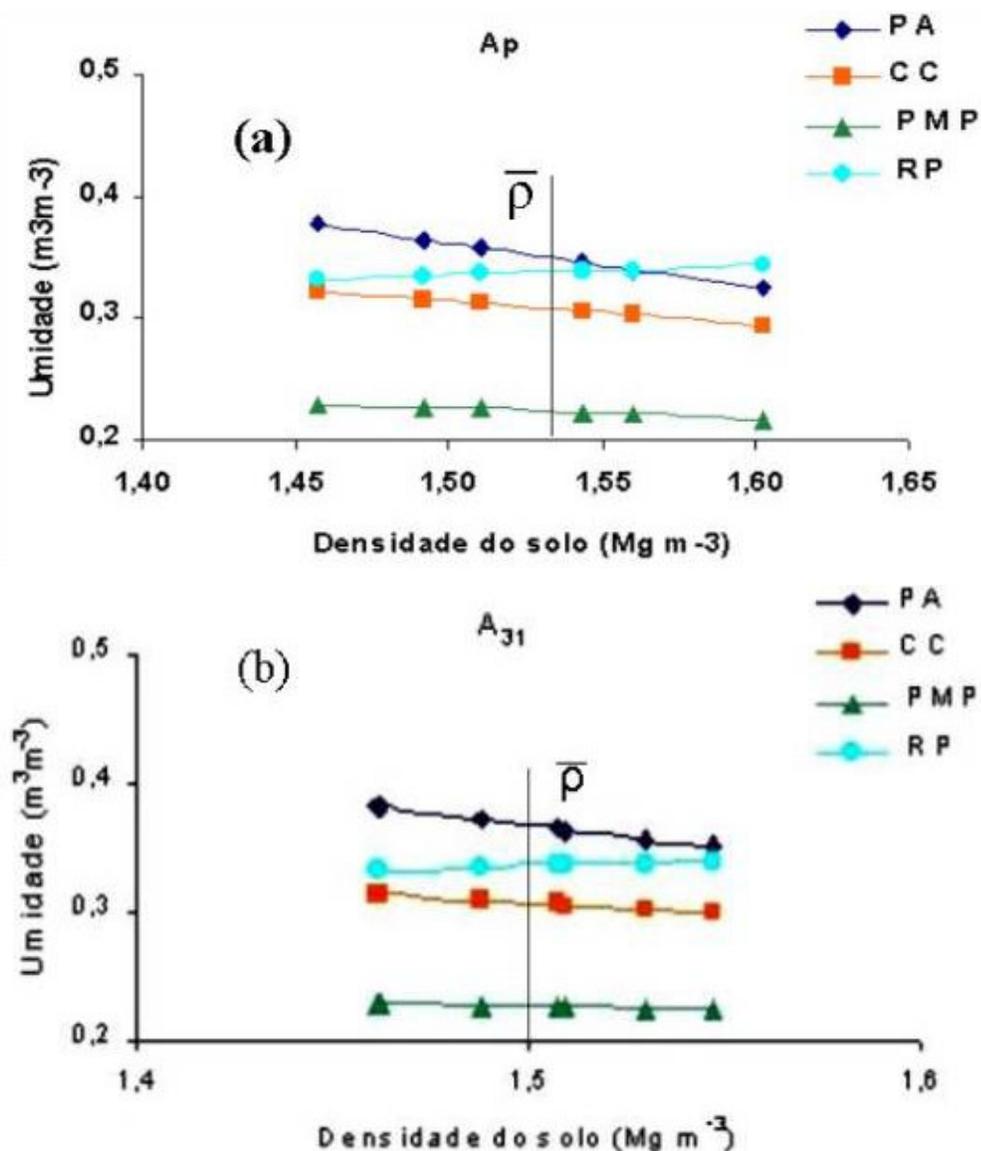


Figura 8. Umidade volumétrica em função da densidade do solo para os níveis críticos PA - porosidade de aeração de 10%, CC - capacidade de campo, PMP - ponto de murcha permanente e RP - resistência à penetração de 3MPa na área 3, para: (a) horizonte Ap e (b) horizonte A31. A área hachurada representa o IHO, $\bar{\rho}$ é a densidade média do horizonte.

Ap, A31 e A32 da área 3, em que o IHO é zero mesmo para o menor valor de densidade encontrado. Para os demais horizontes das áreas 2 e 3, onde o IHO foi zero na condição média da densidade, encontra-se amostras com densidade do solo inferior à ρ_c , mostrando que apesar da situação média ser crítica, há regiões do solo onde poderá haver o desenvolvimento preferencial do sistema radicular.

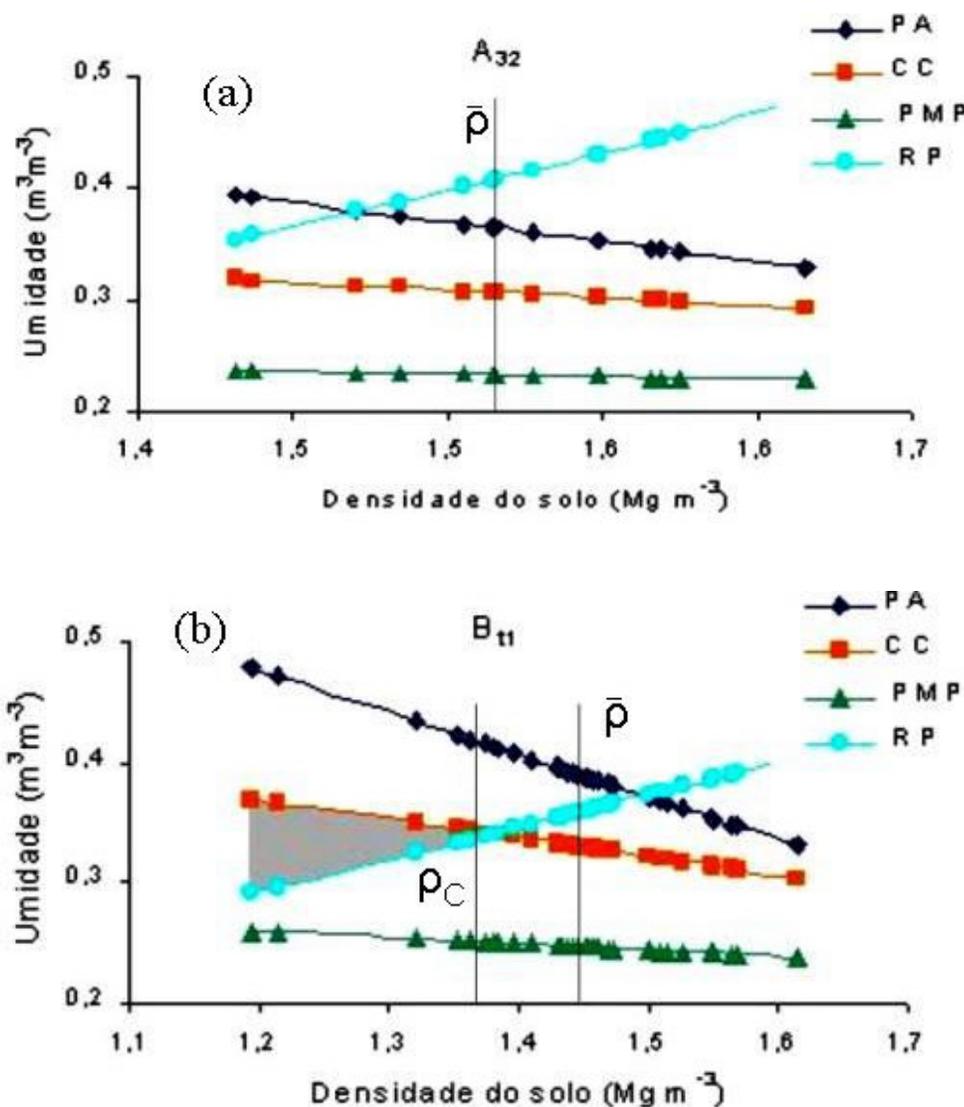


Figura 9. Umidade volumétrica em função da densidade do solo para os níveis críticos PA - porosidade de aeração de 10%, CC - capacidade de campo, PMP - ponto de murcha permanente e RP – resistência à penetração de 3MPa na área 3, para: (a) horizonte A32; e (b) horizonte Bt1. A área hachurada representa o IHO, $\bar{\rho}$ é a densidade média do horizonte, e ρ_c é a densidade em que o IHO = 0.

No horizonte Ap, da área 2 (Figura 5a), 6 das 7 amostras apresentaram porosidade de aeração <10%, e a θ_{RP} foi considerada o limite inferior do IHO também em 6 amostras. Neste horizonte, somente para a amostra de menor densidade ($1,19 \text{ Mg m}^{-3}$) não ocorreu os valores críticos de θ_{RP} e θ_{AR} como limitantes ao IHO. Para o horizonte A/Bi (figura 5b) todas as amostras

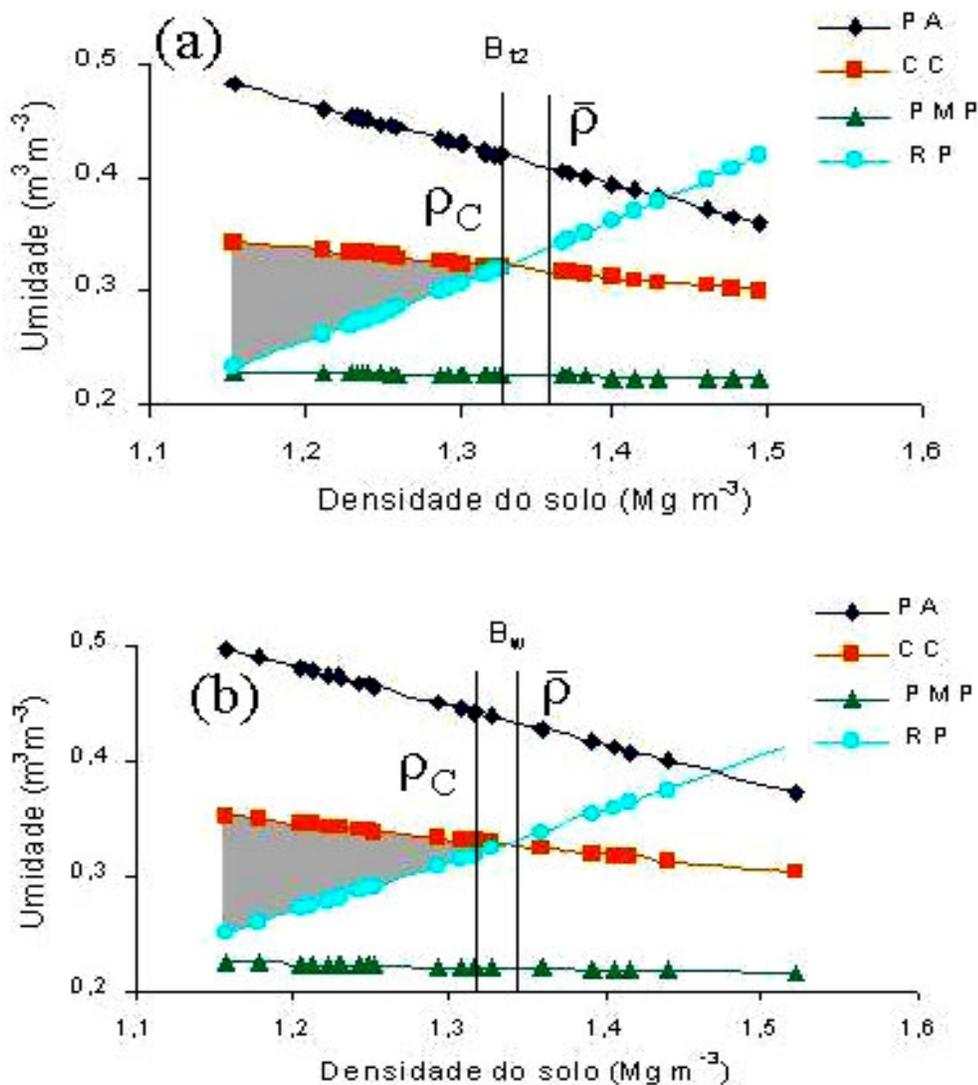


Figura 10. Umidade volumétrica em função da densidade do solo para os níveis críticos PA - porosidade de aeração de 10%, CC - capacidade de campo, PMP - ponto de murcha permanente e RP - resistência à penetração de 3MPa na área 3, para: (a) horizonte Bt2; e (b) horizonte Bw. A área hachurada representa o IHO, $\bar{\rho}$ é a densidade média do horizonte, e ρ_c é a densidade em que o IHO = 0.

apresentaram problemas de aeração e, em cerca de 60% delas a θ_{RP} foi considerada o limite inferior do IHO. A θ_{RP} substitui a θ_{PMP} nos valores de densidade $>1,33 \text{ Mg m}^{-3}$ (Tabela 15). Para o horizonte B1i (figura 6a), 84% das amostras apresentaram deficiência na aeração e 80% RP crítica ao crescimento de raiz. De acordo com a Tabela 15, a θ_{AR} substitui a θ_{CC} no limite superior de umidade do IHO para densidades do solo maiores que $1,19 \text{ Mg m}^{-3}$, enquanto a θ_{RP} substitui a θ_{PMP} no limite inferior do IHO para densidades $>1,15 \text{ Mg m}^{-3}$. No horizonte B2ig, a amplitude total do IHO foi de 0,030 até 0,143 $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$, sendo que 11% das amostras apresentaram porosidade de aeração $<10\%$ e 66% a θ_{RP} substitui a θ_{PMP} . O horizonte B3ig é o que apresenta maior amplitude do IHO, variando de 0,164 $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ para o menor valor de densidade ($0,966 \text{ Mg m}^{-3}$) até 0,141 $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ na densidade de $1,23 \text{ Mg m}^{-3}$. Já para o horizonte IICx a θ_{RP} substitui a θ_{PMP} nos valores de densidade acima de $1,42 \text{ Mg m}^{-3}$.

Tabela 15. Valores críticos de densidade do solo e porosidade total para os horizontes dos solos das áreas 2 e 3.

Horizonte	Profundidade (cm)	Valores críticos de ρ			Valores críticos de PT			
		ρ_{AR}	ρ_{RP}	ρ_C	PT_{AR}	PT_{RP}	PT_C	IHO
área 2								
Ap	0 - 10	1,26	1,31	1,37	0,532	0,513	0,491	0,000
A/Bi	10 - 22	0,98	1,33	1,36	0,626	0,493	0,481	0,001
B1i	22 - 70	1,19	1,15	1,32	0,561	0,576	0,513	0,077
B2ig	70 - 114	1,17	1,08	1,28	0,565	0,598	0,524	0,011
B3ig	114 - 125	----	1,20	1,52	----	0,549	0,429	0,016
IICx	125 - 150	----	1,42	1,56	----	0,464	0,411	0,062
área 3								
Ap	0 - 10	1,78	---	1,41	0,359	---	0,492	0,000
A31	10 - 20	1,80	---	1,37	0,359	---	0,512	0,000
C32	20 - 35	1,78	---	1,38	0,369	---	0,512	0,000
Bt1	35 - 80	1,74	1,10	1,38	0,385	0,611	0,512	0,000
Bt2	80 - 120	1,75	1,15	1,33	0,365	0,587	0,518	0,000
Bw	120 - 150	1,85	1,11	1,33	0,357	0,534	0,538	0,000

ρ_{AR} = valor de densidade onde θ_{AR} substitui θ_{CC} no IHO; ρ_{RP} = valor de densidade onde θ_{RP} substitui θ_{PMP} no IHO; ρ_C = valor de densidade onde o IHO se iguala a zero; PT_{AR} = valor de porosidade total onde θ_{AR} substitui θ_{CC} no IHO; PT_{RP} = valor de porosidade total onde θ_{RP} substitui θ_{PMP} no IHO; PT_C = valor de porosidade total onde o IHO se iguala a zero.

Para os horizontes Bt1, Bt2 e Bw (Figuras 9b, 10a e 10b), a θ_{RP} foi considerada o limite inferior do IHO em todas as amostras, sendo que, de acordo com a Tabela 15, a partir das densidades de 1,10, 1,15 e 1,11 Mg m⁻³ a θ_{RP} substitui a θ_{PMP} no limite inferior do IHO, e a partir 1,74, 1,75 e 1,85 Mg m⁻³ a θ_{AR} substitui a θ_{CC} no limite superior de umidade do IHO, respectivamente, para os horizontes em discussão. Como o solo da área 3 está localizado nas áreas de tabuleiro costeiro e em seu processo de pedogênese apresenta a formação de horizontes coesos, que são duros ou muito duros quando secos e normalmente friáveis quando úmidos, é fato comprovado a dificuldade deste solo ser mantido sempre em condições físicas em que não haja impedimentos ao desenvolvimento das raízes das culturas.

Considerando-se que para as culturas perenes a profundidade efetiva do sistema radicular é de 60 cm de profundidade (Arruda 1987), e que Moreira (1993) observou que o fator de disponibilidade de água para as frutíferas em geral é de 50% da AD (ou seja, toda vez que houver o consumo de metade da água disponível deve-se fazer uma nova irrigação) uma outra discussão pode ser realizada. Assim, adotando como limite inferior do IHO não θ_{PMP} , mas sim θ na qual 50% da AD é consumida, o IHO tende a ser menor, diminuindo a frequência com este intervalo é restringido pela resistência à penetração do solo.

Para essa avaliação foram feitos ajustes das curvas de retenção de água (equação 6) e resistência à penetração (equação 13a), considerando-se camada única de 0 - 0,60 m (profundidade efetiva do sistema radicular). Os parâmetros obtidos nesses ajustes foram: (i) área 1 – $\theta_r = 0,052$, $\alpha = 0,825$, $n = 1,999$ e $m = 0,499$, para a equação 6, e $a = 0,959$, $b = 0,541$ e $c = 4,870$, para a equação 13a; (ii) área 2 – $\theta_r = 0,331$, $\alpha = 0,289$, $n = 1,441$ e $m = 0,306$, para a equação 6, e $a = 0,118$, $b = -2,484$ e $c = 3,422$, para a equação 13a; (iii) área 3 – $\theta_r = 0,196$, $\alpha = 5,525$, $n = 1,213$ e $m = 0,176$, para a equação 6, e $a = 0,016$, $b = -3,509$ e $c = 4,103$, para a equação 13a. Substituindo-os nas respectivas equações, obteveram-se valores de umidade na CC e PMP, de AD, potencial mátrico, umidade e resistência à penetração correspondentes ao consumo de 50% da água disponível.

De acordo com a Tabela 16, para os solos das áreas 1 e 2, na umidade correspondente a 50% da água disponível, não se verifica restrições ao crescimento da raiz das culturas em geral, devidas às resistências à penetração

de 1,36 e 2,84 MPa respectivamente, estarem abaixo do limite crítico de 3 MPa. Já para o solo da área 3, quando este solo atinge a umidade correspondente a 50% da AD, a resistência à penetração é alta (7,12 MPa), o que não satisfaz as condições consideradas ideais ao crescimento radicular.

Os resultados obtidos demonstram que o IHO foi mais sensível que a variação da água disponível (AD) para quantificar os efeitos das variações das propriedades físicas que promovem limitações ao desenvolvimento do sistema radicular. A resistência à penetração foi o atributo que mais contribuiu para esse comportamento, sendo que 65% das amostras na área 2, e 100% das amostras da área 3 apresentaram problemas de resistência ($RP > 3$ MPa). Com relação à porosidade de aeração, em 45,5% das amostras da área 2 esta foi menor que 10%, enquanto para a área 3 não houve problemas de aeração em nenhuma das amostras.

De um modo geral, para a melhor interpretação do IHO, deve-se realizar estudos com a finalidade de identificar os valores de resistência à penetração, de aeração, umidade e potenciais mátricos críticos as para culturas, visto que os solos tropicais apresentam ampla variação de mineralogia, textura e condições de manejo. Além disso, a adoção de valores críticos empíricos para os atributos obtidos pode levar à falsa identificação da ocorrência de restrições ao crescimento vegetal.

Uma caracterização física detalhada dos solos, tal qual feita nesse trabalho, é de grande importância prática, pois permite fazer o acompanhamento temporal da porosidade de aeração, da resistência à penetração e da disponibilidade de água, monitorando-se apenas a umidade do solo ou o potencial

Tabela 16. Valores de umidade (θ), potencial mátrico (ϕ) e resistência à penetração (RP) correspondente a umidade na qual 50% da água disponível é consumida.

Área	θ_{CC}	θ_{PMP}	AD	$\theta_{50\% AD}$	$\phi_{m50\% AD}$	RP _{50% AD}
	-----($M^3 m^{-3}$)-----				(kPa)	(MPa)
1	0,104	0,052	0,051	0,078	19,8	1,36
2	0,443	0,344	0,099	0,393	42,7	2,84
3	0,313	0,236	0,077	0,275	63,0	7,12

mátrico. Assim, durante o manejo de irrigação e de posse da curva de retenção de água e de resistência à penetração do solo, podemos inferir quais os valores desses atributos estão ocorrendo em um dado momento.

O monitoramento concomitante da umidade do solo, de aspectos fisiológicos das plantas e de aspectos do clima permitirá a identificação dos valores das propriedades físicas do solo que realmente sejam críticos ao desenvolvimento das plantas.

5 RESUMO E CONCLUSÕES

Este trabalho foi realizado a partir de amostras de três perfis de solo da Região Norte Fluminense: um Neossolo Quartzarênico Órtico gleico, um Cambissolo Háptico Tb Distrófico gleico e um Argissolo Amarelo Distrófico fragipânico latossólico. As amostras deformadas e indeformadas foram retiradas em camadas de 0,10 m, da superfície até a profundidade de 1,50 m.

Os resultados demonstraram que o solo da área 1, devido à sua textura arenosa, apresentou baixa capacidade de armazenamento de água, enquanto os solos das áreas 2 e 3, em função da sua textura mais pesada, apresentaram altas taxas de retenção e armazenamento de água. Os solos das áreas 1, 2 e 3 apresentam baixa quantidade de água disponível. Para o solo da área 1 o IHO foi igual à água disponível (AD), ou seja, correspondeu ao intervalo da umidade entre CC e o PMP, já que esse solo não apresenta problemas de porosidade de aeração e resistência à penetração. Para os solos das áreas 2 e 3 o IHO correlacionou-se negativamente com a densidade do solo, mostrando o efeito da estrutura nas propriedades físicas do solo. Através dos resultados obtidos concluímos que:

- O solo da área 1 não apresenta problemas de elevada RP e baixa PA, mas possui baixa capacidade de retenção de água na CC e baixa capacidade de água disponível para as plantas.
- Apesar da elevada capacidade de retenção de água na CC, os solos das áreas 2 e 3 apresentam baixa quantidade de água disponível para as plantas.

- No solo da área 2, 65% das amostras apresentaram problemas de elevada RP mesmo em valores de umidade acima do PMP, enquanto 45,5% das amostras tiveram PA menor que 10% na umidade correspondente à CC.
- No solo da área 3, nenhuma amostra apresentou problemas de aeração, mas todas apresentaram valores de RP maiores que 3 MPa em umidades acima do PMP (ou seja, θ_{RP} sempre substituiu θ_{PMP} como limite inferior de umidade do IHO).
- A PA e a RP foram os atributos que mais variaram em função da textura e da densidade do solo.
- A CC foi o fator que mais limitou o limite superior do IHO, sendo substituída pela PA apenas nos horizontes/amostras mais adensadas do solo da área 2.
- O limite inferior do IHO foi determinado pelo PMP nos horizontes/amostras de baixa densidade e pela PR nos de alta densidade.
- O IHO mostrou-se mais sensível que a AD para avaliar as variações das propriedades físicas que afetam diretamente o crescimento das plantas, sendo que para os solos das áreas 2 e 3 correlacionou-se negativamente com a densidade do solo.
- A metodologia aplicada é interessante, mas novas pesquisas são necessárias, pois os limites críticos aqui utilizados parecem não serem adequados devido à falta de estudos sobre o mesmo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alway, F.J., Mcdole, G.R. (1917) Relation of the water-retaining capacity of a soil to its hydrosopic coefficient. *J. Agr. Res.*, Washington, 9:27-71.
- Anderson, J.M., Ingram, J.S.I. (1993) *Tropical soil Biology and Fertility*. 2. ed. Wallingford: Cob. Internacional, 221p.
- Arruda, F.B., Zullo Jr., J., Oliveira J. B. de. (1987) Parâmetros de solo para cálculo da água disponível baseado na textura do solo. *Rev. Bras. Ci. Solo*, Campinas, 11:11-15.
- Aubertin, Y.M., Kardos, L.T. (1965a) Root growth in porous media under controlled conditions. I. Effect of pore size and rigidity. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 29:290-293.
- Aubertin, Y.M., Kardos, L.T. (1965b) Root growth through porous media under controlled conditions. II. Effects of aeration levels and rigidity. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 29:363-365.
- Bernardo, S. (1995) *Manual de irrigação*. 6. ed. Viçosa: UFV. 657 p.
- Boone, F.R., Veen, B.W. (1994) Mechanisms of crop responses to soil compaction. In: SOANE, B.D., OUWEKERK, C. van (eds.) *Soil compaction in crop production*. Amsterdam: Elsevier, Cap. 11, p.237-264.
- Boone, F.R., Werf, H.M.G van der, Kroesbergen, B., Haag, B.A. ten, Boers, A. (1987) The effect of compaction of the arable layer in sandy soils on the growth of maize for silage. II. Soil conditions and plant growth. *Netherlands journal of agricultural Research*, v. 35, nº 2, p. 113-128.
- Brady, N.C. (1989) *Natureza e propriedades dos solos*. 7. ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 878 p.

- Busscher, W.J. (1990) Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 12:37-51.
- Camargo, O.A. (1983) *Compactação do solo e desenvolvimento das plantas*. Campinas: Fundação Cargill, 44p.
- Cassel, D.K., Bowen, H.D., Nelson, L.A. (1978) An evaluation of mechanical impedance for three tillage treatments on Norfolk Sandy Loam. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, 42:116-120.
- Chancellor, W.J. (1977) *Compaction of soil by agricultural equipment*. Berkeley: University of California, Division of Agricultural Sciences, Bulletin 1981, 53p.
- Eavis, B.W. (1972) Soil physical condition affecting seedling root growth. I. Mechanical impedance, aeration and moisture availability and moisture levels in a sandy loam soil. *Plant and Soil*, 36:613-622.
- Embrapa (1997) Centro Nacional de Pesquisa de Solos *Manual e Métodos de análise de solos*, 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 212p.
- Embrapa (1999) Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. Brasília: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 412p.
- Fernandes, B., Galloway, H.M., Bronson, R.D., Mannering, J.V. (1983) Efeito de três sistemas de preparo do solo na densidade aparente, na porosidade total e na distribuição de poros em dois solos (Typic Argiaquoll e Typic Hapludalf). *Rev. Bras. Ci. Solo*, 7:329-333.
- Ferreira, M.M. (1993) *Física do solo*. Lavras: ESAL/FAEPE, 63p.
- Gavande, S.A. (1972) *Física de suelos*. México: Centro Regional de Ayuda Técnica (AID), 315p.
- Giarola, N.F.B., Silva, A.P.da, Tormena, C., Souza, L. e Ribeiro, L.da P. (2001) Similaridade entre o caráter coeso dos solos e o comportamento *hardsetting*: estudo de caso. *Rev. Bras. Ci. Solo*, v. 25, n. 1, p. 239-247.
- Gill, W.R., Bolt, G.H. (1955) Pfeffers studies of root growth pressure exerted by plants. *Agron. J.*, 47:166-168.
- Grable, A.R., Siemer, E.G. (1968) Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 32: 180-186.
- Grohmann, F., Queiroz Neto, J.P. (1966) Efeito da compactação artificial de dois solos limo-argilosos sobre a penetração das raízes de arroz. *Bragantia*, Campinas, 25:421-431.

- Hillel, D. (1982) *Introduction of soil physics*. New York: Academic Press, 364p.
- Imhoff, S., Silva, A.P., Tormena, C.A. (2000b) Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, 25(7)p.1493-1500.
- Imhoff, S., Silva, A.S., Dias Junior, M. de S., Tormena, C.A. (2001) Quantificação de Pressões críticas para o crescimento das plantas. *Rev. Bras. Ci. Solo*, Viçosa, 25:11-18.
- Jacomine, P.K.T. (2001) Evolução do conhecimento sobre solos coesos no Brasil. In: Cintra, F.L.D., Anjos, J. L. dos, Mello Ivo, W.M.P. *Workshop coesão em solos dos tabuleiros costeiros*. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, p.19-46.
- Jong Van Lier, Q. de. (2000) Índices de disponibilidade de água para as plantas. In: Novais, R.F., Alvarez V., V.H., Schaefer, C.A.G.R. *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 1, p. 95-106.
- Jong Van Lier, Q. de. (2001) Oxigenação do sistema radicular: uma abordagem física. *Rev. Bras. Ci. Solo*, Viçosa, 25:233-238.
- Leão, T.P. (2002) *Intervalo hídrico ótimo em diferentes sistemas de pastejo e manejo da pastagem*. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Piracicaba - SP, Universidade de São Paulo - USP, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - Esalq, 58 p.
- Kay, B.D.(1990) Rates of changes of soil structure under different cropping systems. *Advances in Soil Science*, v.12, p. 1-51.
- Kay, B.D., Silva, A.P., Baldock, J.A. (1997) Sensitivity of soil structure to changes in organic carbon content: predictions using pedotranfer functions. *Canadian Journal of Soil Science*, 77(4):655-667.
- Kiehl, E.J. (1979) *Manual de edafologia: relações solo-planta*. São Paulo: Ceres, 262p.
- Klein, V.A., Libardi, P.L. (2000) Faixa de umidade menos limitante ao crescimento vegetal e sua relação com a densidade do solo ao longo do perfil de um latossolo roxo. *Ciência Rural*, Santa Maria, 30(6):959-964.
- Klein, V.A., Libardi, P.L., Silva, A.P. (1998) Resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes condições de densidade e teor de água. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, 18(2):45-54.
- Letey, J. (1985) Relationship between soil physical properties and crop production. *Advances in Soil Science*, 1:277-294.
- Libardi, P.L. (1995) *Dinâmica da água no solo*. Piracicaba: O autor. 497p.

- Moreira, H.J.C. (1993) *S.A.A.C.I. – Sistema agroclimatoógico para o acompanhamento das culturas irrigadas: manual prático para manejo da irrigação*. Brasília: Secretaria Nacional de Irrigação, 90 p.
- Nesmith, D.S. (1987) Soil compaction in double cropped wheat and soybean on ultissol. *Soil Science Society of American Journal*, Madison, 51:183-186.
- Petter, R.L. (1990) *Desenvolvimento radicular da soja em função da compactação do solo, conteúdo de água e fertilidade em latossolo*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Santa Maria - RS. Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, 144 p.
- Primavesi, A. (1984) *Manejo ecológico do solo: a agricultura em regiões tropicais*. 6. ed. São Paulo: Nobel, 541p.
- Ravelli Neto, A. (1989) *Caracterização e classificação de uma sequência de solos da Baixada dos Goitacazes, RJ*. Tese (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Itaguaí - RJ. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro - UFRRJ, 180p.
- Reichardt, K. (1975) *Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera*. Campinas: Fundação Cargill, 268p.
- Reichardt, K. (1978) *A água na produção agrícola*. São Paulo: Mcgraw-Hill do Brasil, 118p.
- Reichardt, K. (1988) Capacidade de campo. *Rev. Bras. Ci. Solo*, Campinas, 12:211-216.
- Silva, A.P., Kay, B.D. (1996) The sensitivity of shoot growth of corn to the least limiting water range of soils. *Plant and soil*, 184:323-329.
- Silva, A.P., Kay, B.D. (1997a) Estimating the least limiting water range of soil from properties and management. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, 61(3):877-883.
- Silva, A.P., Kay, B.D. (1997b) Effect of soil water content variation on the least limiting water range. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, 61(3):884-888
- Silva, A.P., Kay, B.D., Perfect, E. (1994) Characterization of the least limiting water range. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, 58(6):1775-1781.
- Souza, L.S. (1996) *Uso e manejo de solos coesos dos tabuleiros costeiros*. In Reunião Técnica sobre Solos Coesos dos Tabuleiros Costeiros, 1, Cruz das Almas. Anais, Aracaju: Embrapa – CPATC. 80p.

- Stolzy, L.H., Barley, K.P.(1968) Mechanical resistance encountered by root entering compacted soils. *Soil Science*, Baltimore, 105:297-301.
- Taylor, H.M. (1971) Root behavior as affected by soil structure and strength. *In: Carson, E.W. (ed.) The plant root and its environment*. Charlottesville, University of Virginia, Cap. 11, p.28-291.
- Taylor, H.M., Gardner, H.R. (1963) Penetration of cotton seedling roots as influenced by bulk density, moisture content, and strength of soil. *Soil Science*, Baltimore, 96:153-156.
- Taylor, H.M. Roberson, G.M., PARKER Jr., J.J. (1966) Soil strength-root penetrations relations for medium to coarse-textured soil materials. *Soil Science*, Baltimore, 102(1):18-22.
- Topp, G.C., Galganov, Y.T., Ball, B.C. et al. (1994) Soil water curves desorption. *In: Carter, M.R. (ed.) Soil sampling and methods of analysis*. Boca Raton: Lewis Publisher, Cap. 15, p.569-579.
- Tormena, C.A., Silva, A.P., Libardi, P.L. (1998) Caracterização do Intervalo Hídrico Ótimo de um latossolo roxo sob plantio direto. *Rev. Bras. Ci. Solo*, Viçosa, 22:573-581.
- Unger, P.W. e Kaspar, T.C. (1994) Soil compaction and root growth: a review. *Agron. J.*, 86:759-766.
- Van Genuchten, M.T. (1980) A closed form equation for predicting hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, 44(5):892-898.
- Veihmeyer, F.J., Hendrickson, A.H. (1927) Soil moisture conditions in relation to plant growth. *Plant Physiology*, 2:71-78.
- Veihmeyer, F.J., Hendrickson, A.H. (1931) The moisture equivalent as a measure of the field capacity of soils. *Soil Science*, Baltimore, 32:181-193.
- Veihmeyer, F.J., Hendrickson, A.H. (1948) Soil density and root penetration. *Soil Science*, Baltimore, 65:487-493.
- Veihmeyer, F.J., Hendrickson, A.H. (1949) Methods of measuring field capacity and wilting percentages of soils. *Soil Science*, Baltimore, 68:75-94.
- Winter, E., Simonson, R.W. (1978) Effects of soil compaction and development and yield of corn (maize). *Soil Science*, Baltimore, 58:435-443.