



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA**

**INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO EM ÁREA CULTIVADA COM CITRUS NA  
REGIÃO NORDESTE DO ESTADO DO PARÁ**

**CLÉVEA ROSSANA FERREIRA DA SILVA**

Belém  
Pará - Brasil  
2009

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA**

**INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO EM ÁREA CULTIVADA COM CITRUS NA  
REGIÃO NORDESTE DO ESTADO DO PARÁ**

**CLÉVEA ROSSANA FERREIRA DA SILVA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia como parte das exigências do Curso de Mestrado em Agronomia, área de concentração em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de “Mestre em agronomia”.

Orientadora:

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup>. Herdjanira Veras de Lima.

Belém  
Pará - Brasil  
2009



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA**

**INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO EM ÁREA CULTIVADA COM CITRUS NA  
REGIÃO NORDESTE DO ESTADO DO PARÁ**

**Aprovada em: 13 de Fevereiro de 2009**

**CLÉVEA ROSSANA FERREIRA DA SILVA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia como parte das exigências do Curso de Mestrado em Agronomia, área de concentração em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de “Mestre em agronomia”.

**Banca Examinadora**

---

Engenheiro Agrônomo, Dr<sup>a</sup>. Herdjanira Veras de Lima  
(Orientadora)  
(Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA)

---

Engenheiro Agrônomo, Dr. Norberto Cornejo Noronha -PA  
(Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA)

---

Engenheiro Agrônomo, Dr. Sebastião Geraldo Augusto  
Universidade Federal do Pará– UFPA

---

Licenciado em Ciências Agrárias, Dr. João Tavares Nascimento  
Escola Agrotécnica Federal de Castanhal

Ao meu Pai Deus por me dar a vida e me segurar pelas mãos todas as vezes que eu cai.

Aos meus pais biológicos e de criação, Antônio Félix da Silva Filho e Maria Juscelina

Ferreira da Silva e, Paulo Félix da Silva e Maria de Fátima Carvalho da Silva, por

tudo o que fizeram para que eu pudesse chegar até neste ponto,

superando todos os obstáculos,

crescendo como ser humano e

evoluindo como profissional, sempre.

O amor, carinho, compreensão, amizade, incentivo e apoio

foram importantíssimos para que eu pudesse seguir em frente.

## **DEDICO**

Aos meus irmãos, Beto, Jorge e Lindiara pelo companheirismo, apoio,

carinho e amizade em todos os momentos,

e ao meu namorado Anderson a quem tanto amo,

por seu amor, apoio, compreensão, amizade e dedicação.

## **OFEREÇO**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, acima de tudo e de todos.

À Universidade Federal Rural da Amazônia, pela oportunidade que me foi dada desde a minha graduação até o momento da obtenção do Título de Mestre em Solos e Nutrição de Plantas.

Ao Departamento de Ciências do Solo e aos seus funcionários. Especialissimamente ao amigo de todos os jovens alunos inexperientes em práticas laboratoriais na área de química e física do solo, Max Sarrazani, pelo amor, seriedade e dedicação com que realiza seu trabalho e, ainda, como esclarecedor de infinitas dúvidas as quais lhe recorrem para solucionar. Sem esquecer do técnico de laboratório e amigo, Júlio, pelo acompanhamento em algumas vezes que foram necessárias a sua presença em processos laboratoriais.

À coordenação e sub-coordenação do Curso de Pós-graduação, Antônio Rodrigues Fernandes e Herdjania Veras de Lima, que tanto trabalharam para oferecer à mim e aos meus colegas de turma um curso louvável e digno de grande respeito no Estado do Pará, bem como pelos momentos de descontração, sorrisos e bom humor.

À minha orientadora, Professora Herdjania Veras de Lima, pelo show de orientação que me encheu de conhecimento e que costumo dizer, não foi só uma simples orientação, mas uma enorme lapidação melhorando minha vida profissional, e também pela sua amizade, conselhos e puxões de orelhas, infinitos, diga-se de passagem.

Ao Professor Paulo Roberto da Silva Farias, pelo sábio conselho em me indicar a Professora Herdjania Veras de Lima, como orientadora, pela grande amizade e brincadeiras, e pela orientação que me deu como bolsista de Pibic durante meu curso de graduação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – instituição ligada ao MEC (Ministério da Educação), pelo concedimento da bolsa de mestrado, através da qual pude custear todas as despesas necessárias para o desenvolvimento deste estudo.

À empresa Cítricos do Pará S/A (CITROPAR), por ter concedido à mim e ao meu grupo de pesquisa uma área dentro de sua fazenda de produção de citros, em Capitão Poço, PA, ao longo dos dois anos do curso de mestrado, disponibilizando inclusive, alguns trabalhadores para nos auxiliar durante as visitas à Empresa, bem como nossas refeições e dormitórios na sede da fazenda, quando necessário.

À banca participante da minha defesa, por suas preciosas contribuições, no intuito de enriquecer a obra que escrevi, contribuindo para o meu conhecimento e dos próximos alunos de mestrado, na área da física do solo, que se interessarem em consultar esta pesquisa.

Agradeço aos professores com quem tive a oportunidade de enriquecer meus conhecimentos ao longo da minha vida estudantil durante os cursos de graduação e mestrado, sempre repassando o melhor que um mestre pode dar aos seus aprendizes, cada um à sua maneira peculiar de ensinar. Em especial ao professor Geraldo Coqueiro, pelos seus conselhos de amigo e pelas conversas nos fins de tarde.

Ao amor da minha vida, meu Anderson, por todo seu amor, carinho, companheirismo, apoio e amizade. Você é o meu presente muito especial que papai do céu me mandou. Sua presença e seu apoio me fortaleceram e me deram um novo ânimo para seguir em frente. Sou feliz demais ao seu lado e desejo que seja assim sempre.

Aos meus irmãos e amigos, Patrícia Surama Parise Maia e Cândido Ferreira de Oliveira Neto, que me acompanharam desde o momento em que iniciamos o curso de graduação nesta Universidade e pelos quais tenho

um enorme e infinito sentimento de carinho e amizade, e aos meus mais novos irmãos e amigos Elane Maria da Silva Guedes e Neilo Bergamin Moreira, que vivenciaram junto comigo todas as emoções do mestrado e os puxões de orelha e ensinamentos de uma orientadora e colaboradora “arretada” de exigente. Tenham a certeza de que meu carinho por vocês é grande e cresce a cada dia mais.

As minhas amigas queridas, Danielle Souza Pegado e Sandra Gonçalves Ferreira pelo grande apoio, companheirismo e incentivo no episódio mais triste e cruel que passei toda a minha vida. Como também pelas momentos de fé, amizade e enorme alegria que passei ao seu lado.

À todos os meus colegas de turma do ano de 2007, e àqueles que convivi, da turma de 2008. Em especial, à Carla Letícia Pará da Silva, pela sua preciosa ajuda nos momentos que antecederam a minha apresentação de defesa neste referido curso de mestrado.

Aos meus colegas do grupo de estudos, estagiários da Professora Herdjania e do Professor Paulo, Carol, Augusto, Reynaldo, Salgadinho, Sâmala, João, Carol, Katianne, Lorena, Bruno, Nara, Hengles, Gerson e Javier, pela incansável colaboração que deram nos momentos de trabalho árduo em campo, debaixo de sol e chuva. Me perdoem se esqueci alguém. Só quero dizer que todos vocês foram demais pai d’égua.

*Ninguém faz um trabalho sozinho, por mais capaz que seja aquele que o escreve. Por isso, considero que essa vitória não é só minha, mas de todos que de sua união fizeram a força, culminando nesta obra que, espero, seja de grande proveito para futuros e louváveis pesquisadores de plantão. À todos, desejo o meu mais sincero: **MUITO OBRIGADA!!!***

*“Nessa longa estrada da vida  
vou correndo e não posso parar ...”*

*(Sérgio Reis)*



## SUMÁRIO

<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>11</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>12</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>14</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>16</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>18</b>
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>20</b>
2.1. Caracterização da citricultura no Estado do Pará.....	20
2.2. Manejo de citros sob plantio convencional.....	21
2.3. Qualidade (física) do solo e sua importância para a manutenção da sustentabilidade agrícola .....	22
2.4. Densidade do solo (Ds).....	24
2.5. Resistência do solo à penetração (RP) .....	25
2.6. Porosidade do solo .....	26
2.7. Curva de retenção de água (CRA).....	27
2.8. Curva de resistência do solo (CRP) .....	29
2.9. Intervalo hídrico ótimo (IHO) .....	30
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>32</b>
3.1 Caracterização da área estudada.....	32
3.2 Coleta de campo .....	32
3.3 Histórico da área .....	33
3.4 Classificação do solo.....	34
3.5 Curva de compactação do solo .....	34
3.6 Curva de retenção de água (CRA).....	35
3.7 Curva de resistência do solo (CRP).....	35
3.8. Determinação do intervalo hídrico ótimo (IHO).....	35
<b>4. RESULTADO E DISCUSSÃO</b> .....	<b>37</b>
4.1- Intervalo hídrico ótimo (IHO).....	37
<b>5- CONCLUSÃO</b> .....	<b>50</b>
<b>6- REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</b> .....	<b>51</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela</b>		<b>Página</b>
1	Classificação textural e distribuição estatística dos atributos físicos utilizados nos ajustes do modelo do intervalo hídrico.	43
2	Valores médios de resistência do solo à penetração (RP), densidade do solo (Ds) e umidade volumétrica ( $\theta_v$ ) nas diferentes posições de amostragem coletadas.	44
3	Distribuição estatística dos coeficientes resultantes dos ajustes lineares das curvas de resistência do solo à penetração ( $\ln RP = \ln a + b \ln \theta_v + c \ln D_s$ ) e de retenção da água no solo ( $\ln(\theta_v) = d + e D_s + f \ln  \psi_m $ ).	45

## LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Croqui da área experimental- sinais positivos (+) indicam as linhas de plantio e os pontos (•) alinhados em (EL) e (PC), indicam, respectivamente, as posições de entrelinha e projeção de copa, onde foram feitas as amostragens do solo.	39
2	Variação do conteúdo de água em função da densidade do solo em um Argissolo Amarelo Distrocoeso, nas profundidades de 10 cm (a) e 30 cm (b). A área em tom de cinza representa o Intervalo Hídrico Ótimo do solo (IHO). Dsc = densidade crítica do solo.	47
3	Variação do IHO em função da densidade do solo (Ds) em um Argissolo Amarelo Distrocoeso textura média sob sistema convencional, nas profundidades de 10 cm (a) e 30 cm (b).	42
4	Distribuição espacial da densidade do solo (Dsc) representativo para as profundidades de 10 cm (a) e a 30 cm (b), avaliadas sob plantio convencional, em um pomar de citros em Capitão Poço (PA).	43
5	Curvas características de compactação do solo em um Argissolo Amarelo Distrocoeso textura média, sob cultivo de laranja, em Capitão Poço (PA), nas profundidades de 10 cm (a) e 30 cm (b). Dsmáx. = densidade do solo máxima.	44

## RESUMO

O impacto negativo dos sistemas de manejo sobre o solo em pomares cítricos vem limitando a disponibilidade de água para as plantas, necessária ao seu crescimento radicular e, conseqüentemente, reduzindo a produtividade e a longevidade do pomar. O objetivo deste estudo foi caracterizar e quantificar a qualidade física de um Argissolo Amarelo Distrocoeso textura média em área de citros, através da curva de compactação do solo e do Intervalo Hídrico Ótimo em um. O estudo foi desenvolvido no mês de abril, no município de Capitão Poço, no Nordeste do Estado do Pará. A área era cultivada com laranja Pêra sobre porta-enxerto tangerina Cleópatra. Foram coletadas amostras deformadas e indeformadas, nas posições de linha (L) e entrelinha (EL) do pomar, nas profundidades de 10 e 30 cm, destinadas a obtenção dos seguintes parâmetros: análise granulométrica, densidade do solo ( $D_s$ ), curva de resistência à penetração (CRP), curva de retenção de água e o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO). A qualidade física do solo mostrou-se mais sensível ao manejo do solo, devido à maior intensidade de tráfego no local, reduzindo o intervalo de água disponível às plantas, medido pelo IHO, com valores nulos para densidades do solo iguais ou superiores a 1,62 e 1,66  $\text{g.cm}^{-3}$  para as profundidades de 10 e 30 cm, respectivamente. O sistema de manejo adotado na área tem favorecido a compactação do solo, principalmente em subsuperfície, correspondendo a uma  $D_{s\text{máx}}$  equivalente a 1,94 e 1,98  $\text{g.cm}^{-3}$  a 10 e 30 cm.

**Palavras-chave:** Resistência à penetração, densidade máxima do solo, manejo do solo, qualidade física do solo.

## ABSTRACT

The negative impact of management systems on soil in citrus orchards has limited the availability of water for plants, necessary for its root growth and, consequently, reducing the productivity and longevity of the orchard. This study was carried out to characterize and quantify the soil physical quality in the area of citrus through the curve of soil compaction and water range in a Ultisol medium texture. This study was conducted during the rainy season, in the northeastern state of Pará, in area cultivated with orange Pear on the rootstock Cleopatra mandarin. Samples were collected disturbed and undisturbed, the positions of line (L) and between (EL) of the orchard, at depths of 10 and 30 cm, to obtain the following parameters: bulk density (BD), penetration resistance curve (PRC), soil water retention curve of the determination of Least Limiting Water Range (IHO). The physical quality of the soil was more sensitive to soil management, due to greater intensity of traffic on site, reducing the range of water available to plants, as measured by the IHO, with null values for density of soil greater than or equal to 1.62 and 1.66 g.cm<sup>-3</sup> for depths of 10 and 30 cm respectively. The IHO was negatively correlated with D<sub>s</sub>, giving it more restrictive in the deep subsurface. Showing thus the development of bad management adopted in the area, as demonstrated by the values of D<sub>s</sub>max. beyond the limits of acceptable to good root development of plants. Affirming the importance of the IHO in the monitoring of soil physical quality.

**Key words:** Penetration resistance, maximum density of soil, soil management, soil physical quality.

## 1. INTRODUÇÃO

A falta de conhecimento sobre o comportamento da qualidade física do solo contribui, em geral, para que as deficiências relacionadas a baixa produtividade, em pomares de citros, sejam atribuídas somente às deficiências químicas e/ou nutricionais do mesmo. Uma forma de avaliar os níveis da degradação física impostas a uma área agrícola é caracterizar os efeitos proporcionados pelos sistemas de manejo à estrutura e à textura do solo, conforme o seu tempo de uso, para que, desta maneira, se possa estabelecer a adoção de um sistema agrícola sustentável.

A desestabilidade estrutural do solo proporcionada pela intensificação do tráfego de máquinas pesadas na área de cultivo, em pomares de citros, aliada a outras práticas de manejo, contribui para o aumento da retenção de água em altos potenciais e, para uma conseqüente diminuição no fornecimento de oxigênio e nutrientes as plantas, como resultado do aumento da densidade do solo (Ds) e da resistência do solo à penetração das raízes (RP), refletindo em baixa longevidade e produtividade no local (BEUTLER et al., 2004). Essa limitação impõe a cultura dos citros, um crescimento radicular restrito às camadas subsuperficiais, principalmente em épocas mais secas. Fato este também verificado por Collares et al. (2008) em relação ao feijão e ao trigo sob plantio direto compactado.

Fidalski & Tormena (2007) ressaltam que o manejo inadequado do solo em área de laranja proporcionado pelo tráfego intensivo de máquinas determina a presença de sulcos na posição de amostragem equivalente a entrelinha, com restrições ao intervalo de água disponível às plantas, contribuindo para um aumento na densidade do solo, bem como para o surgimento da compactação. Cavalieri (2007) relata que essa limitação não é prioridade apenas da entrelinha de cultivo, considerada como o local de maior restrição física para o desenvolvimento radicular das plantas, atualmente, mas que também ocorre sobre as posições de amostragens relativas às posições de linha e projeção de copa. Tal situação poderia ser menos impactante se as práticas de manejo do solo fossem realizadas em épocas e condições adequadas, contribuindo assim, para a manutenção da qualidade física do solo (Fidalski et al., 2007).

Um índice que melhor interpreta os resultados evidenciados pelos atributos físicos do solo em função do manejo adotado, é o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO). O IHO foi proposto por Letey (1985) como “Non limiting Water Range” (NLWR), sendo posteriormente adaptado por Silva et al. (1994) e, introduzido no Brasil por Tormena et al. (1998) como IHO ou “Least Limiting Water Range” (LLWR) em outros países. Sua aplicabilidade na

agricultura está diretamente relacionada ao desenvolvimento das culturas no campo, sendo estimado por meio de funções de pedotransferência.

Vários estudos realizados no Brasil, principalmente nas regiões Sul e Sudeste, enfatizam a importância em se conhecer as características físicas do solo cultivado, como forma de estabelecer a adoção de um sistema agrícola sustentável, mas regiões como o Norte e o Nordeste são carentes de estudos que visem a avaliação da qualidade física do solo, através de índices como o Intervalo Hídrico Ótimo, por exemplo.

O Estado do Pará não apresenta registros de estudos na literatura, que enfatizem as condições físicas do solo em áreas cultivadas com laranja. O mesmo não ocorre em relação ao conhecimento das propriedades químicas do solo. Sendo os solos paraenses classificados como pobres quimicamente e ricos fisicamente.

A hipótese levantada neste estudo é que o manejo do solo utilizado nos pomares da região de Capitão Poço implica em sérias restrições da qualidade física do solo. O objetivo geral deste trabalho foi caracterizar e quantificar a qualidade física do solo em área de laranja num Argissolo Amarelo Distrocoeso textura média através do Intervalo Hídrico Ótimo e da curva de compactação do solo, tendo como objetivos específicos: i) caracterizar a área e o tipo de solo da área estudada; ii) obter a curva de resistência do solo à penetração; iii) determinar a curva de retenção de água no solo; iv) determinar a densidade do solo máxima através do Teste de Proctor e, v) determinar a densidade crítica e a faixa de água ótima para o desenvolvimento da cultura da laranja através do IHO.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1. Caracterização da citricultura no Estado do Pará.**

A fruticultura é a quarta principal atividade econômica da região amazônica, depois do minério de ferro, da madeira e da pecuária. No entanto, do ponto de vista social, é o setor que melhor representa o potencial de distribuição de renda da população, por envolver milhares de pequenos produtores, além de indústrias processadoras (SINDIFRUTAS, 2008). Neste contexto, a citricultura paraense, possui grande destaque, tendo se expandido muito nos últimos anos em todos os municípios, gerando uma cadeia produtiva eficiente e com baixo requisito de investimento (FAEPA, 2008).

O Pará é o maior produtor de citros da Região Norte do país, com produção estimada em uma caixa de 40,8 kg por planta, gerando um aumento de cerca de 40%, nas exportações

frutícolas paraenses (IBGE, 2007), seguido, a certa distância, pelos Estados do Amazonas e do Amapá. Capitão Poço é o maior produtor e exportador de laranja do Estado, com 146.370 toneladas produzidas em apenas 8.610 hectares. Porém, o Estado é apenas o 7º colocado no ranking brasileiro, chegando a produzir 210.360 toneladas de laranja em 12.757 hectares, rendendo algo em torno de 30 milhões/ano em divisas e mais de 10.000 trabalhadores empregados nessa atividade (IBGE, 2007).

No Estado de São Paulo, maior produtor do país, essa produção praticamente triplica, chegando a 3 caixas por planta. Nos outros Estados, a produção está entre 70 e 90 milhões de caixas, das quais 10% é destinada à produção de suco para exportação e 90% para o mercado interno de fruta fresca e de suco para empresas especializadas no mercado doméstico, apresentando expressivo crescimento nos últimos anos (ABEcitrus, 2008). Tal diferença advém de maiores investimentos de produção em áreas citrícolas nos outros Estados, aliado a investimentos em pesquisas de melhoramento das frutas e dos solos cultivados, uma vez que, os solos paraenses possuem a mesma capacidade produtiva que os solos de outras regiões e, com uma vantagem, o clima do Estado é propício o ano todo para o cultivo do fruto, ao contrário do clima de outras regiões, que enfrentam condições adversas, como períodos de seca e geadas.

Os principais destinos de exportação dos cítricos paraenses, principalmente a produção de laranja in natura e suco concentrado, são os Estados Unidos, a União Européia e a Ásia. O panorama geral é bastante favorável à fruticultura paraense, tanto no segmento de frutas exóticas como para o de frutas regionais da Amazônia. Isso ocorre porque a demanda internacional por esses produtos tem crescido consideravelmente devido às campanhas nos países do hemisfério norte sobre as vantagens para a saúde do consumo de sucos naturais (FAEPA, 2008).

## **2.2. Manejo dos citros sob plantio convencional.**

Grandes áreas agrícolas cultivadas com citros ainda são trabalhadas sob plantio convencional, devido ao elevado número de preparo do solo com respostas “rápidas” ao manejo, atendendo a necessidade de produção em larga escala comercial. No entanto, práticas de manejo utilizadas convencionalmente, com o uso intensivo de arado e grade, tem contribuído para acentuar as limitações naturais dos solos agrícolas (Carvalho et al., 2002),



diminuindo a porosidade total, a disponibilidade de água e nutrientes para as plantas e reduzindo a penetração radicular das plantas no solo (DEXTER, 2004a).

Soares et al. (2005), trabalhando com citros e cana-de-açúcar, observaram que as práticas de manejo tradicionais adotadas foram mais impactantes na cultura da cana, devido a maior exigência desta em tratos culturais, o que não torna menos relevante as conseqüências negativas do manejo ocasionadas na área de citros. Fidalski (2004), considera que a manutenção da matéria orgânica (M.O.) em níveis adequados minimizaria este problema. No entanto deve-se tomar bastante cuidado na forma como incorporá-la no solo, para que não ocorram problemas de compactação nas camadas superficiais.

Independentemente da manutenção da M.O., os pomares cítricos no Estado do Pará sofrem com as conseqüências negativas de manejos inadequados do solo sob plantio convencional (PC) e até mesmo sob plantio direto (PD), hora por problemas químicos hora por problemas físicos. Esta situação é agravada mais ainda pela falta de pesquisas que avaliem as variáveis físico-hídricas do solo, justificando-se, desta forma, a queda de produtividade dos pomares por meio de problemas atribuídos à “má qualidade química do solo”.

Fidalski et al. (2007), trabalhando com sistema convencional em área de citros, no município de Alto Paraná, notaram a diminuição da qualidade física do solo quando manejado com amendoim forrageiro na entrelinha de plantio. Neves et al. (2004), observaram uma diminuição na profundidade efetiva do sistema radicular dos citros, passando de 67 a 68 cm na entrelinha (EL) para 31 a 53 cm, na linha (L) de cultivo, influenciada pelo manejo e pelas variedades dos porta- enxertos, citrange ‘C13’, limão rugoso da África e limão volkameriano. Entretanto, Carvalho et al. (1999), observaram uma melhora no sistema radicular do limão ‘Cravo’ sob laranja ‘Pêra’, na EL a partir da profundidade de 0,40m até 1,0m quando associado ao manejo da leguminosa feijão-de-porco. Bordin et al. (2005), consideram que as características físicas do solo, pós manejo, têm sido pouco estudadas, em áreas de citros. Este quadro torna-se mais deficiente quando se relaciona às pesquisas sobre qualidade física do solo no Estado do Pará.

### **2.3. Qualidade (física) do Solo e sua importância para a manutenção da sustentabilidade agrícola.**

O que é isso em vermelho?

Solos com boa qualidade física promovem condições adequadas ao crescimento e desenvolvimento das plantas (Tormena et al., 1998a). Mas mesmo estes solos são suficientemente fracos para permitir que práticas inadequadas de manejo prejudiquem o

comportamento radicular das plantas, ao influenciar negativamente a estrutura do solo (SILVA et al., 1994; REYNOLDS et al., 2002).

A escassez dos recursos naturais incrementada com o crescente potencial agrícola, ao longo dos anos, transforma áreas antes produtivas em áreas degradadas e de baixa sustentabilidade, contribuindo para a alteração das características originais do solo e o conseqüente declínio da produção/productividade da agricultura. A agricultura atual necessita que seja feita uma mudança considerável no intuito prover a melhora da qualidade de vida da população, mas, ao mesmo tempo, precisa se ajustar a capacidade de suporte dos ecossistemas e a capacidade de uso dos solos. Diante deste propósito, devem-se buscar alternativas de uso e manejo do solo que melhorem e mantenham a qualidade física do solo, adequando-se a realidade local (NEVES JÚNIOR, 2005). Para tanto, se faz necessário haver pesquisas direcionadas a obtenção de técnicas de manejo que acompanhem a evolução do quadro de exploração econômica, principalmente nas regiões Norte e Nordeste do país.

Imhoff (2002) sugere a utilização de indicadores da qualidade física do solo que incluam os atributos físicos que influenciam diretamente a produção das culturas, como forma de sinalizar quando as características de armazenamento e transmissão de fluídos no solo não estejam mais se comportando adequadamente. Isto porque tais atributos determinam as taxas dos processos fisiológicos ligados com o crescimento radicular, com a fotossíntese e com o crescimento foliar (NEVES JUNIOR, 2005). Dexter (2004a) concorda que os indicadores da qualidade física do solo sejam essenciais para identificar a descaracterização do comportamento original do solo, mas lembra que os indicadores da qualidade do solo abrangem não somente os atributos físicos como também os atributos químicos e biológicos do solo. Apesar de que o primeiro exerce forte influência sobre os processos químicos e biológicos do solo.

Nem todos os atributos do solo podem ser considerados indicadores de qualidade física do mesmo, mas aqueles que assumem essa função devem ser sensíveis a variações em longo prazo provocadas pelas alterações sazonais; ser mensuráveis precisamente através de uma ampla variedade de classes e condições de solos; ser simples de medir; ter um baixo custo e ser adequados para diversos sistemas, com capacidade para fornecer adequada aeração e quantidade de água para o crescimento e expansão do sistema radicular, concordando com Letey (1985). Tais indicadores podem ser: porosidade de aeração (Reynolds et al., 2002), densidade do solo (Ds), resistência à penetração de raízes (RP) (Fidalski et al., 2007) e o

Intervalo hídrico ótimo (IHO) (Silva et al., 2004; Freddy et al., 2007; Beutler et al., 2007; Tormena et al., 2008).

Vários resultados de pesquisa comprovam a eficiência dos indicadores de qualidade física do solo em especificar alterações quanto ao desenvolvimento vegetal no solo. Neste sentido, Fidalski et al. (2007), mostraram resultados de qualidade física do solo em área de citros num Latossolo Vermelho distrófico textura média, na região de Alto Paraná, alterada negativamente em função do manejo em várias posições de amostragens, mesmo este fato estando associado à melhor condição química do solo. Tormena et al. (1999a), estudando o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) em dois sistemas de manejo do solo cultivados com milho, verificaram um comportamento negativo das condições físicas do solo associadas à variação da  $D_s$  acima de  $1,02 \text{ g.cm}^{-3}$ , sendo limitado inferiormente pela RP, no sistema de plantio direto (PD).

#### **2.4. Densidade do solo ( $D_s$ )**

A densidade do solo ( $D_s$ ), a densidade do solo crítica ( $D_{sc}$ ) e a densidade do solo máxima ( $D_{smáx}$ ) são importantes parâmetros de definição da qualidade física do solo em pomares de citros, contribuindo para identificar limitações impostas ao desenvolvimento radicular da plantas em diferentes níveis.

Cada tipo de solo apresenta uma faixa de densidade específica, considerada como aceitável para o bom desenvolvimento vegetal. Tais limites tendem a ser maior em solos arenosos ( $1,2$  a  $1,4 \text{ kg.dm}^{-3}$ ) que em solos argilosos ( $1,0$  a  $1,2 \text{ kg.dm}^{-3}$ ), devido à forma, ao tamanho e ao arranjo diferenciado das partículas de areia e argila, enquanto que os solos siltsosos apresentam valores de densidade do solo ( $D_s$ ) intermediários (REICHARDT & TIMM, 2004; LIBARDI, 2005).

A densidade crítica do solo ( $D_{sc}$ ) é definida por Silva & Kay (1997), como a  $D_s$  onde o IHO é igual a zero, ou seja, a  $D_s$  na qual o limite inferior cruza com o limite superior do intervalo, a partir da qual ocorreriam limitações severas ao desenvolvimento das plantas. Não se sabe muito sobre a mesma, mas apenas que ela corresponde a 20% do crescimento radicular das plantas (Reynolds et al., 2002), apesar de autores como Camargo & Alleoni (1997), Reinert et al. (2001) e Reichert et al. (2003) terem proposto limites variados de densidade crítica do solo ( $D_{sc}$ ), abrangendo solos com ampla variação textural. Valores de

Dsc sinalizam que o manejo do solo não está sendo bem executado e que, portanto, o produtor já deve começar a se preocupar em mudar sua forma de manejar o solo.

O conhecimento da densidade máxima do solo ( $D_{sm\acute{a}x.}$ ), por sua vez, permite ao pesquisador ter a noção do quanto as características originais do solo foram drasticamente alteradas pelo manejo, tornando-o muitas vezes, propício a um forte declínio produtivo. Quanto maior for a  $D_s$ , mais compactado ficará o solo, até que atinja a máxima densidade de compactação. Por isso mesmo, nunca se deve deixar que o solo cultivado atinja tais valores de  $D_s$ . Os valores de  $D_{sm\acute{a}x.}$  podem ser obtidos por meio da realização de um simples teste de compactação, o teste de Proctor.

Tormena et al. (1999b), trabalhando com a qualidade física do solo em um Latossolo roxo sob agricultura irrigada, no município de Guairá (SP), encontraram valores de  $D_s$  superiores a  $1,09 \text{ Mg.m}^{-3}$  como limitantes para a RP em potenciais menores que o ponto de murcha permanente (PMP). Influenciando também a difusão de gases no solo, com restrições ao crescimento das plantas para valores de  $D_s$  a partir de  $1,28 \text{ Mg.m}^{-3}$ . Contradizendo os resultados encontrados por Moraes & Benez (1996), que estudando diferentes preparos do solo para a cultura do milho sob Terra Roxa Estruturada argilosa, não verificaram influência alguma da  $D_s$  quando esta aumentou de  $1,25$  para  $1,33 \text{ Mg m}^{-3}$ , na camada de  $0-0,20 \text{ m}$ .

A redução da macroporosidade do solo e a sua contribuição para a elevação de valores de  $D_s$  foi estudada por Sanches et al. (1999). Maiores valores de  $D_s$  foram observados na área sob citros em comparação à mata nativa, associando tais resultados com a compactação do solo, causada pelo tráfego contínuo de máquinas e equipamentos. Concordando com Minatel et al. (2006) que encontraram valores de  $D_s$  maiores nas posições de rodado e entre - rodado e reduzida macroporosidade do solo em relação à região da copa, provocando efeitos semelhantes, justificando o comportamento do solo tal como os autores acima.

## **2.5. Resistência à penetração (RP)**

O sistema radicular dos citros é profundo, podendo chegar a dois metros ou mais. Contudo, o manejo inadequado do solo pode reduzir e muito o seu comprimento ao longo do perfil, em função do aumento da resistência do solo à penetração (RP). Nesta situação, o sistema radicular das plantas fica muito denso e menos vigoroso, reduzido a um crescimento subsuperficial com tendências a se desenvolver em pequenas fraturas, e que no campo, dificilmente sobreviveria às condições de seca.

Segundo Cintra et al. (1999), em condições de RP reduzida cerca de 60% do sistema radicular dos citros fica localizado na profundidade de 0–0,20 m, e 90% entre 0 e 0,40 m (Cintra et al., 1999), sendo esta característica agravada pelo uso excessivo de práticas culturais que após determinado intervalo de tempo, só vêm a contribuir para o aumento da Ds, e conseqüente RP, diminuindo a capacidade de retenção de água a baixas tensões (SOUZA et al., 2004b). O papel dos porta-enxertos, quanto à capacidade de desenvolvimento radicular das plantas de citros é bastante importante, pois imprimem ao cultivo suas características e benefícios particulares também no que diz respeito a eficiência produtiva das plantas.

Quaggio (1996) concluiu que a coleta de amostras de solo para a citricultura é mais representativa do ambiente radicular dos citros, quando feita conjuntamente, coletando-se amostras de solo na projeção da copa e também distantes dela cerca de 1,0 a 1,5 m, em direção ao meio centro da entrelinha. Souza et al. (2007), observaram maiores restrições ao desenvolvimento radicular de plantas de citros em sistema de sequeiro comparação ao irrigado, na entrelinha de cultivo (EL) a 0,20-0,40m, enquanto que na linha (L), tal restrição ocorreu a uma profundidade maior (0,40-0,60 m). Este fato foi atribuído a um maior sombreamento, menor tráfego e revolvimento do solo na linha de cultivo, propiciando maior umidade nesta posição.

Tormena et al. (1998) preconizou o valor de 2 MPa como limitante para a RP em relação ao crescimento radicular de muitas culturas. Os valores de RP obtidos em alguns trabalhos realizados em áreas de citros também coincidem com o valor preconizado pelo autor acima, mas nada impede que sob condições muito mais severas afetem o comportamento do solo e este passe a ser limitado por valores de RP acima de 2,0 MPa. Valores limítrofes da RP em relação ao crescimento das plantas têm sido documentados na literatura por diversos autores (Silva et al., 1994, Zou et al., 2000; Leão et al., 2006; Beulter et al., 2006, Klein & Camara, 2007), com efeitos negativos ao desenvolvimento das culturas.

A RP pode ser calculada e estimada através da curva de resistência do solo à penetração (CRS) (Silva et al., 2008), permitindo identificar áreas com RP potencialmente limitante ao crescimento das raízes, além de estabelecer a  $\theta_v$  e a Dsc para o desenvolvimento das plantas.

## **2.6. Porosidade do solo**

A porosidade do solo é diretamente influenciada pela Ds. Logo, um aumento excessivo desta propriedade, contribuirá para a redução da macroporosidade, porosidade total,

porosidade de aeração e para o aumento de poros de menor diâmetro, prejudicando a absorção de água e nutrientes pelas raízes.

A faixa de variação da porosidade total, adequada para o bom desenvolvimento das plantas, vai de 0,32 a 0,47  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  para solos arenosos e, de 0,52 a 0,61  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  para os solos argilosos, enquanto que os solos francos permanecem num valor intermediário (LIBARDI, 2005). Contudo, admite-se que ela não deva ser menor do que 10-12% (em volume), dentro de dois ou três dias após ocorrer a chuva ou irrigação (SAEAFS, 2002). Segundo Demattê e Vitti, (1992) a porosidade total ideal para a cultura dos citros deve estar entre 0,40 e 0,55  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ . Em relação ao comportamento físico-hídrico do solo medido pelo intervalo hídrico ótimo (IHO), pode-se dizer que quando a estrutura do solo passa a ser muito afetada pelo manejo, a umidade na porosidade do solo, conhecida como porosidade de aeração ( $\theta_{PA}$ ), pode chegar a atingir o limite superior deste índice antes mesmo que ele seja atingido pela umidade na capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ).

Davoglio Júnior et al. (2006), avaliando o sistema radicular de citros, em um Latossolo distrófico de textura franca, no município de Cafelândia, SP, referente as posições de amostragens equivalentes a linha (L) e entrelinha (EL) em dois tratamentos, sistema em viveiro aberto a campo com mudas de torrão e sistema de produção em tubetes sob viveiro telado, observaram um expressivo crescimento radicular em profundidade na posição de entrelinha, com limites críticos de porosidade de aeração (PA) e de Ds em torno de 0, 10  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  e 1,3 a 1,5  $\text{kg} \cdot \text{dm}^{-3}$ .

Resende et al. (2002), também verificaram melhoras na porosidade do solo em pomar de citros, com limão 'Cravo' sob laranja 'Pêra', ao adotar a prática de escarificação do solo. Ao contrário dos resultados encontrados por Soares et al. (2005), que observaram uma porosidade extremamente reduzida em camadas compactadas de um Latossolo Vermelho, em Bariri, SP, e bastante intensa nos horizontes subjacentes, com ocorrência de raízes médias a finas ao longo do perfil, mesmo nas zonas de compactação. Fidalski et al. (2007), trabalhando com citros no município de Alto Paraná, observaram que apesar de os sistemas de manejo utilizados estabelecerem alterações na porosidade, expressas pela porosidade total do solo, a porosidade total foi a variável que melhor distinguiu a condição física do solo nas vegetações estudadas sob o rodado.

Práticas de manejo como a subsolagem e a gradagem podem aumentar a porosidade do solo nos primeiros momentos, mas o efeito obtido não é duradouro, sendo considerado como motivo de controvérsias por Stolf (1987). Isto porque tais efeitos podem ser anulados ou mesmo tornados negativos, pelos sistemas de manejo, em função de quaisquer danos ou

prejuízos causados ao sistema radicular. A prática da adubação verde é, portanto, mais aceitável na correção de problemas de aeração do solo, resultando em uma maior disponibilidade hídrica dos solos, principalmente nas épocas onde a disponibilidade de água é mais crítica para a cultura do citros. Segundo Carvalho et al. (2001) e Bordin et al. (2005), as práticas mecânicas de manejo apresentam resultados divergentes quanto à modificação da qualidade física e ao crescimento radicular em citros.

## **2.7. Curva de Retenção de água no solo (CRA)**

A curva de retenção de água (CRA) tem grande influência sobre o comportamento de infiltração e retenção de água no solo, sendo considerada por Aguiar (2008) como um bom indicador de qualidade física do solo, permitindo conhecer o conteúdo máximo ("capacidade de campo" – cc), e mínimo (ponto de murchamento – PMP) de armazenamento da água no campo, essencial a realização de práticas de manejo sustentável para os sistemas de produção agrícola. Quando outros atributos como a porosidade, a difusão de gases e a resistência à penetração se aliam à retenção de água, o seu desenvolvimento passa a influenciar diretamente o comportamento físico-hídrico do solo, sendo tal comportamento quantificado por medidas integradoras destas modificações, como por exemplo, o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO).

Os valores de cc variam de -0,033 MPa e -0,01 MPa para solos com textura fina e grossa, respectivamente, enquanto que o PMP assume o valor de 1500 MPa (BERNARDO, 2005). Em solos de regiões tropicais e úmidas, os valores de cc devem ser alterados para potenciais maiores, da ordem de -0,01 MPa e -0,006 MPa (REICHARDT, 1988).

Muitos fatores afetam a retenção de água em um solo, com efeitos diretos no seu comportamento. Dentre estes, a textura e a estrutura, pois determinam a área de contato entre as partículas sólidas do solo e a água e as proporções e distribuição de poros de diferentes tamanhos. A matéria orgânica (M.O.) apresenta-se como um elemento de grande importância nesse processo, por ser um material poroso que dificulta o arranjo entre as partículas, determinando assim o comportamento da porosidade total do solo (Kiehl, 1979). Desta forma, o carbono orgânico, aliado à textura do solo e às condições de clima e manejo, resulta em curvas de diferentes formatos e impactos (Rawls et al., 2003), com efeitos no nível de retenção de água no solo. A histerese e a temperatura também garantem sua influência sobre a retenção de água, uma vez que os poros sofrem a influência dos processos de secagem e reumedecimento do solo, ao mesmo tempo em que estão sujeitos à intensidade com que as

forças capilares ou sob tensão (adesão e coesão) retém a água no solo a um dado potencial (KLUTE, 1986; MORAES et al, 1993<sup>a</sup>).

Práticas de manejo como a roçagem, na época das chuvas e, a gradagem, no período seco, nas entrelinhas do pomar em conjunto com outras práticas mecânicas utilizadas em solos de tabuleiros costeiros na citricultura, tendem a compactar o solo na profundidade 0-0,10 m (Portela et al., 2001), restringindo a infiltração e aumentando a perda de água por evaporação (Paiva et al., 1998; Souza & Paiva, 2001). Essa situação faz com que o maior volume de água nesses solos, esteja disponível às plantas a partir de 0,90 m de profundidade (Souza et al., 2004a), ocorrendo deficiências hídricas por 10 a 20 semanas.

Portela et al. (2000) verificaram uma diminuição na retenção de água em um Latossolo Amarelo cultivado com citros em relação a mata quando submetido a baixas tensões, e um aumento relativo quando submetido a altas tensões, justificando tal comportamento através da baixa macroporosidade e condutividade hidráulica na área de citros. Klein & Libardi (2002b), comparando sistemas de sequeiro e irrigado com área de mata também observaram diferenças nas curvas de retenção de água no solo em função do uso de manejos inadequados, influenciando o comportamento reduzido da porosidade do solo.

## **2.8. Curva de resistência do solo à penetração das raízes (CRP)**

As restrições impostas ao crescimento do sistema radicular das plantas, como conseqüência da desestabilização estrutural do solo, envolve, direta e indiretamente, mudanças no comportamento de muitos outros atributos físicos do solo, como por exemplo, a drenagem, a retenção de água e a resistência à penetração (RP).

Aumentos excessivos na RP do solo obrigam a sistema radicular da plantas a se expandirem lateralmente, diminuindo a sua densidade em profundidade (Camargo & Alleoni, 1997). Letey (1985), considera o valor de 2,0 MPa como impeditivo a crescimento radicular. Mas muitos outros autores encontraram valores de RP limitante ao crescimento radicular, variando abaixo e acima desse valor (Topp et al., 1994; Rosolem et al., 1999; Klein & Camara, 2007), à medida que o solo vai perdendo umidade, sendo tal comportamento discriminado no gráfico do Intervalo Hídrico Ótimo (IHO).

Os valores de RP em função do aumento da  $D_s$  e da variação do conteúdo de água no solo ( $\theta$ ) podem ser estimados através de uma função matemática não-linear ( $RP = a \theta v^b D_s^c$ ), conhecida como função de pedotransferência (Busscher, 1990), gerando a curva de



resistência à penetração do solo (CRP), com aplicações práticas no conhecimento das condições estruturais do solo em relação às resistências críticas para o crescimento das plantas. Segundo Silva et al (2008), o uso de funções de pedotransferência e da CRP, ainda ocorrem de forma restrita, mas podem facilitar o entendimento do comportamento mecânico do solo, visto que a avaliação das propriedades físicas dos distintos solos está mais avançada (Suzuki et al., 2008), sendo utilizadas para orientar o manejo e o controle da qualidade física do solo (IMHOFF et al., 2000).

Beutler et al. (2007) verificaram uma diminuição da produtividade em cultivo de soja sequeiro e irrigado, a partir da RP de 1,30 e 1,64 MPa, respectivamente. Ribon et al. (2003), estudando um Latossolo Vermelho distrófico textura argilosa, em Jaboticabal, obtiveram menores valores de RP para a profundidade de 0-0,1 m e, valores superiores a 2,0 MPa a 0,2-0,3 m, para todos os tratamentos avaliados. E Minatel et al. (2006) verificaram menores valores de RP, em profundidade, sob projeção da copa de um pomar de citros, em relação a outras posições de cultivo, justificado pelo fato de haver um menor tráfego de máquinas e implementos agrícolas no local.

## **2.9. Intervalo Hídrico Ótimo (IHO)**

O desempenho atual dos diversos sistemas de manejo praticados em solos explorados economicamente tem afastado cada vez mais a agricultura brasileira da possibilidade de ser cultivada sobre os pilares da sustentabilidade agrícola, baseado, entre outros fatores, na manutenção da qualidade dos solos. Mas, neste sentido, novas abordagens tecnológicas têm sido propostas para avaliar a qualidade física do solo (Moraes et al, 2002), destacando-se entre elas, o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO).

O “non limiting water range” (NLWR), foi desenvolvido por Letey (1985) como uma tentativa de aliar em um único parâmetro as condições adequadas ao bom desenvolvimento e crescimento das plantas no campo (Zou et al., 2000; Silva & Kay, 2004; Beutler et al., 2005), mas deixou a desejar quando não considerou que tal desenvolvimento se definia apenas dentro dos seus limites. O que levou Silva et al. (1994) a aprimorarem este conceito, sendo posteriormente transformado no atual Least Limiting Water Range (LLWR), introduzido no Brasil por Tormena et al. (1998) como Intervalo Hídrico Ótimo (IHO).

O novo conceito de IHO passou a considerar o crescimento radicular das plantas fora dos seus limites mesmo que nem todas elas pudessem ser capazes de se desenvolver nesta condição (Silva & Kay, 2004). E assim, o IHO seguiu adiante, considerando a resistência à

penetração, a porosidade de aeração, a água disponível e o potencial mátrico do solo como parâmetros essenciais ao bom desenvolvimento radicular das plantas (Silva et al., 1994; Beutler et al., 2004), reafirmando a grande influência que a Ds exerce sobre tal desempenho.

Leão (2002) considera a capacidade de campo (CC), como limite superior e o ponto de murcha permanente (PMP), como o limite inferior do IHO a valores moderados de densidade do solo em condições de solos bem estruturados. Contudo, à medida que o solo sofre degradação física, esses limites podem ser substituídos pela porosidade de aeração como limite superior e pela resistência à penetração como limite inferior. Dentre esses atributos físicos, a RP é o que mais freqüentemente compromete o IHO, pois aumenta com a compactação do solo (Imhoff et al., 2001; Beutler et al., 2006).

Segundo Klein & Camara (2007), os valores limitantes do IHO correspondem a 0,01 MPa, para a umidade na capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ); a 1,5 MPa, para a umidade no ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ); à porosidade de aeração ( $\theta_{PA}$ ), a 10% (Letey, 1985) e à umidade de resistência à penetração das raízes ( $\theta_{RP}$ ) a 2,0 MPa (Silva et al., 1994).

De acordo com Imhoff et al. (2000) e Klein & Camara (2007), os valores de RP também podem alcançar valores superiores a 2,0 MPa, dependendo da espécie de planta.

A praticidade do conceito do IHO tem levado muitos pesquisadores a buscar formas de estimá-lo de maneira mais rápida e simples do ponto de vista operacional, consistindo este processo, na obtenção de funções de pedotransferência desenvolvidas para modelar as curvas de retenção de água (CRA) e de resistência à penetração do solo (CRS) (SILVA et al., 2008), cujo cálculo é aplicado na determinação dos valores limitantes para a capacidade de campo, o ponto de murcha permanente, a porosidade de aeração e a resistência à penetração, descrito pelas seguintes fórmulas:  $\theta_{CC} = (\exp(d + (e Ds)) 10^f)$ ;  $\theta_{PMP} = (\exp(d + (e Ds)) 1500^f)$ ;  $\theta_{PA} = (1 - (Ds/Dp) - 0.1)$  e a  $\theta_{RP} = ((2.0/(a.Ds^c))^{1/b})$ .

O IHO foi avaliado em solos com diferentes classes texturais e sob diferentes condições de cultivo e manejo, como por exemplo, sob pastejo contínuo e rotacionado (Leão et al., 2004), arroz de sequeiro (Beutler et al., 2004), soja (Beutler et al., 2006) e plantio direto (Tormena et al., 1998a; Tormena et al., 2007), e em absoluto, todos os resultados comprovaram que as áreas estudadas apresentavam limitações agrícolas do ponto de vista físico em função das alterações estruturais no solo.

Leão et al. (2006), observaram uma correlação positiva entre a  $\theta_{RP}$  e a Ds (Tormena et al., 1999), limitando inferiormente o IHO (Beutler et al., 2006, Leão et al., 2005) e, uma correlação negativa com a  $\theta$  (Klein & Camara, 2007), evidenciando que a diminuição da RP com o aumento desta última, está associada à redução da coesão e do ângulo de atrito interno

e que a sua relação com a  $D_s$  é atribuída à compactação da matriz do solo. A  $\theta_{cc}$  também apresentou correlação positiva com a  $D_s$  em todos os tratamentos avaliados. Pode-se dizer que este resultado comparado com os resultados encontrados por Silva et al. (1994), são contraditórios para solos franco siltosos, pois a  $\theta_{cc}$  correlacionou-se negativamente com a  $D_s$ .

Quando o IHO atinge valores críticos de  $D_s$ , ele assume um valor igual a zero (Reynolds et al., 2002; Beutler et al., 2006; Tormena et al., 2007). Dessa forma, os valores de  $D_s$  podem ser determinados no campo, rotineiramente, a baixo custo, e comparados com a  $D_{sc}$ , já que, potencialmente falando, os sistemas de manejo que propiciam maior frequência de  $D_s < D_{sc}$ , oferecem menores restrições físicas (Tormena et al., 2007), permitindo a tomada de decisões mais adequada sobre como proceder o manejo do solo em situações vindouras.

Lima et al. (2007) relatam que existem valores físicos restritivos para parâmetros como a RP, mas que ainda não existem valores restritivos específicos para a  $D_{sc}$ . Sabe-se apenas que a  $D_{sc}$  corresponde a 20% do crescimento radicular das plantas (Reynolds et al., 2002). Portanto, estes autores consideram que há necessidade de se ampliar o estudo das pesquisas que possibilitem prever o grau de degradação da estrutura nesse nível. No entanto, Reichert et al. (2003), em seu trabalho sobre qualidade dos solos e sustentabilidade dos sistemas agrícolas, consideram o valor de  $1,55 \text{ Mg m}^{-3}$  como o ponto G da densidade crítica para o bom crescimento do sistema radicular, pelo menos em solos de textura média. Resultado que também foi encontrado por Leão et al. (2005).

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1. Caracterização da área estudada**

A área experimental está localizada em uma fazenda situada no município de Capitão Poço, no Nordeste Paraense, pertencente à Empresa Cítricos do Pará S/A (Citropar). Suas coordenadas geográficas –  $01^{\circ}48'38''$  de latitude Sul e  $47^{\circ}11'38''$  de longitude Oeste de Greenwich (sede da fazenda), distanciam-se 200 km da capital, Belém. Na propriedade, há o predomínio de relevo plano a suave ondulado. O clima do município é do tipo Ami (Köppen), com precipitação média anual de 2.502 mm, com frequência média de 140 a 180 dias de chuvas, apresentando maiores índices de pluviosidade nos meses de janeiro a maio e os menores índices de agosto a novembro. A temperatura média anual é de  $26,9^{\circ}\text{C}$  e umidade relativa média do ar de 80% (Bastos, 1972).

O experimento foi conduzido em uma área de plantio convencional, cultivada com laranjeiras predominantemente da variedade pêra-rio (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck) (90%), sobre porta-enxerto tangerina “cleópatra” (*Citrus reshni* Hort. ex Tanaka), com doze anos de idade. As laranjeiras estão distribuídas em um talhão com 13, 8 ha., contendo uma faixa de 40 linhas, com 115 plantas cada uma, totalizando 4600 plantas no espaçamento de 4,30 m entre plantas e 7 m entre linhas.

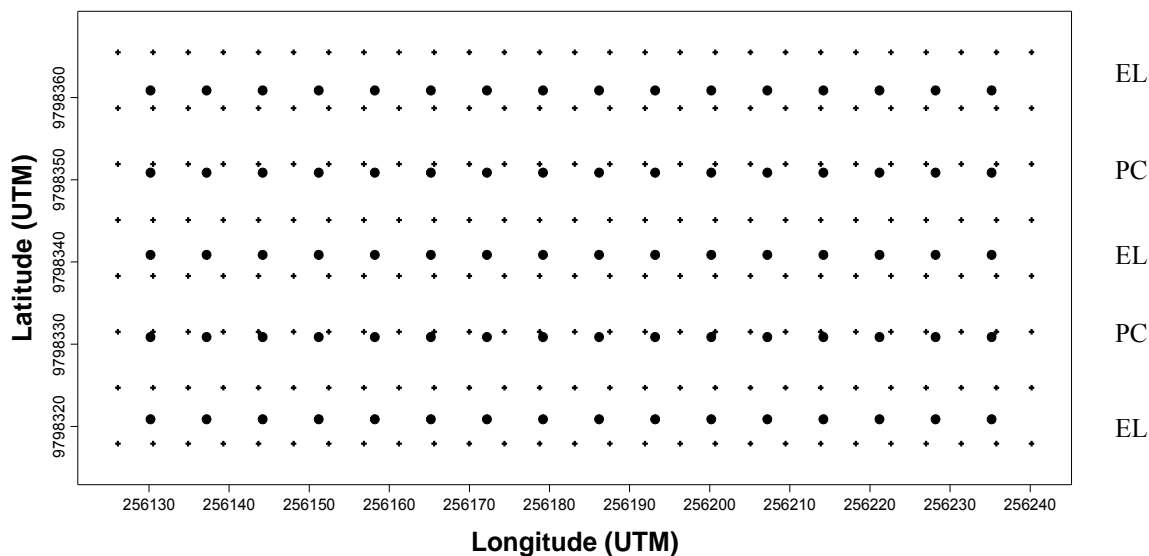
### **3.2. Histórico da área**

O manejo do citros no local era realizado com várias passagens de trator ao ano, objetivando os preparos de adubação, roçagem, gradagem, pulverização e colheita, usando maquinários das marcas kamac D60 GNCR, acoplado a um trator do tipo TL 90, pneus trazeiro (Goodyear 18.4-34) e dianteiro (Firestone 7.5018); Tatu modelo RC<sup>2</sup>E3100 (830kg) CL (corte lateral), Tatu Marchesan CR (controle remoto), acoplado a um trator do tipo Ford 7630; Newholland TL – 90 (3300kg) e uma carroça de 300kg pneu 900.20 acoplada ao trator TL 90, respectivamente. Há alguns anos atrás o trator também passava sobre as linhas de plantio na finalidade de rebaixar o mato, mas com o aumento da compactação do solo causado nessa área, tal prática foi descartada. O controle fitossanitário, a adubação mineral e a calagem são realizados de acordo com as recomendações técnicas para os citros, adotadas nos plantios de São Paulo, por falta de uma recomendação técnica adequada para o Estado do Pará. Sendo a adubação realizada três vezes ao ano. A caracterização física do solo da área, porém, não é de comportamento conhecido pelos técnicos e agrônomos da empresa, permitindo, portanto, a entrada dos tratores na área durante a época chuvosa para a realização de algumas operações de manejo, apesar de ser poucas vezes, segundo a opinião dos mesmos. O tratamento fitossanitário foi feito sempre que necessário e, as roçagens eram feitas periodicamente, para rebaixar as ervas daninhas nas entrelinhas de cultivo.

### **3.3. Coleta de campo**

A amostragem do solo foi realizada somente pela manhã dos dias 8 e 9 de abril de 2008, após a roçagem mecânica da vegetação, devido a ocorrência de chuva pelo período da tarde. A área foi georreferenciada com um receptor GPS V Plus, fabricado pela Garmin. As amostragens foram realizadas sistematicamente em cinco transeções paralelas aos troncos de oito fileiras de plantas localizadas a partir da 13<sup>a</sup> linha do talhão, utilizando um grid de

amostragem de malha regular equivalente a 10 x 7 m, totalizando assim 80 pontos, como ilustrado na figura 1 abaixo.



**Figura 1.** Croqui da área experimental- sinais positivos (+) indicam as linhas de plantio e os pontos (.) alinhados em (EL) e (PC), indicam, respectivamente, as posições de entrelinha e projeção de copa, onde foram feitas as amostragens do solo.

Cada transeção constou de 16 pontos, com uma amostra deformada e outra indeformada nas profundidades de 10 e 30 cm, escolhidas entre tantas outras ao longo do perfil do solo, pelo fato de que o sistema radicular das plantas se encontravam preferencialmente nestas profundidades. Recaindo as mesmas sobre as posições de amostragens seqüenciais entrelinha (EL) e Projeção de copa (PC) para destacar o efeito da compressão causada pela passagem do trator no local. Cada amostra indeformada foi coletada com o auxílio de um amostrador específico, utilizando cilindros de aço inoxidável com 5 cm de diâmetro e 5 cm de altura. Já as amostras deformadas, foram coletadas cavando-se um buraco no solo, para a profundidade de 10 cm, e o buraco aberto na profundidade de 30 cm, onde foram coletadas, anteriormente, as amostras indeformadas.

### 3.4. Análise granulométrica

A granulometria do solo foi determinada a partir da análise granulométrica, utilizando as amostras deformadas, conforme o método da pipeta (Gee & Bauder, 1986). Foi realizada a aplicação de pré-tratamento, consistindo da queima da matéria orgânica por meio do uso de

peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ), somente nas amostras da profundidade superficial, além da dispersão com solução de hidróxido de sódio (NaOH). A agitação foi lenta, durante 16h, rotacionada a 120 rpm. O solo foi classificado como um Argissolo Amarelo Distrocoeso textura média.

### **3.5. Curva de compactação do solo**

As curvas de compactação do solo, para as duas profundidades estudadas, foram determinadas a partir do teste de Proctor normal, sem reuso de material, utilizando o aparelho de Proctor adaptado para o uso na agronomia, a fim de determinar a densidade máxima do solo ( $D_{sm\acute{a}x.}$ ).

O solo foi preparado para a obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA) e, posteriormente levado ao laboratório, onde utilizou-se amostras deformadas pesando 2,5 kg, e diferentes teores de água pré-estabelecidos, para a obtenção de diferentes níveis de compactação do solo, cujos valores variaram de 50 a 250 ml, a 10 cm e; de 100 a 350 ml, a 30 cm. Foram usados ao total, aproximadamente 20 kg de solo para a realização do teste em cada profundidade.

As amostras foram submetidas à compactação por um soquete a 30 cm de altura por 25 vezes, a cada um terço de solo, de forma a completar todo o volume do cilindro aos poucos, sendo o excesso de solo removido do anel de Proctor, nivelando o volume do solo ao volume do anel. A seguir, as amostras foram pesadas, para a obtenção do peso úmido ( $P_{su}$ ) e secas em estufa de circulação de ar forçada a  $105^{\circ}C$ , por um período de 24 h, para a obtenção da massa de solo seco ( $P_{ss}$ ). Posteriormente, calculou-se a umidade gravimétrica e a densidade do solo. A partir da curva de ajuste polinomial, determinou-se a densidade máxima e a umidade volumétrica ótima para a compactação, construiu-se a curva de compactação dos solos, determinando a umidade ótima de compactação máxima, pelo estudo de regressão.

### **3.6. Curva de retenção de água (CRA)**

No laboratório, as amostras indeformadas foram saturadas por meio da elevação gradual de uma lâmina de água numa bandeja, durante 48 horas, conforme Silva et. al. (1994), até atingir cerca de  $2/3$  da altura da amostra. As amostras foram divididas em dez grupos de oito repetições, por profundidade. Cada grupo de amostras foi submetido a uma das seguintes potenciais: -1, -3, -6 e -10 kPa, em mesas de tensão e, -30, -70, -100, -300, -700 e -1300 kPa

em câmaras de pressão com placas porosas de Richards, conforme Klute (1986). Atingindo o equilíbrio dois a cinco dias após submetidas às tensões acima.

### 3.7. Curva de resistência do solo à penetração (CRP)

Para a determinação da resistência do solo à penetração foi utilizado um penetrômetro eletrônico, desenvolvido no Laboratório de Física do Solo da ESALQ/USP (Tormena et. al., 1998), consistindo no deslocamento vertical de uma haste metálica cônica de área de base  $0,1167 \text{ cm}^2$ , semi-ângulo de  $30^\circ$  e velocidade de penetração  $1,0 \text{ cm min}^{-1}$  (Bradford, 1980). O qual realizou 240 leituras por profundidade, com três repetições por amostra.

As leituras realizadas eram enviadas para o computador através da célula de carga do penetrômetro, o qual fornecia leituras em  $\text{kgf/cm}^2$ , sendo armazenadas em um arquivo com extensão txt. e trabalhadas em uma planilha do Excel, promovendo a transformação desta unidade para kPa. As cinco primeiras e as cinco últimas leituras foram descartadas, a fim de diminuir o erro experimental. Após a determinação da RP, as amostras foram secas em estufas a  $105^\circ \text{ C}$ , por 24 h, para determinação do conteúdo gravimétrico de água ( $\theta_g$ ) (Gardner, 1986) e densidade do solo ( $D_s$ ) (Blake & Hartge, 1986), a partir das quais foi obtido o conteúdo volumétrico de água ( $\theta_v$ ) em cada tensão aplicada.

### 3.8. Determinação do intervalo hídrico ótimo (IHO)

Para a determinação do intervalo hídrico ótimo (IHO), ajustou-se a curva de resistência do solo à penetração (CRS), de acordo com o modelo não-linear proposto por Busscher (1990), descritos na equação 1:

$$RP = a \theta_v^b D_s^c \quad (1)$$

em que RP é a resistência do solo à penetração (MPa);  $\theta_v$  é o conteúdo volumétrico de água ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ );  $D_s$  é a densidade do solo ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) e **a**, **b** e **c** são os parâmetros de ajuste do modelo. De forma que após ser linearizada a eq. 1, obteve-se a equação 2:

$$\ln RP = \ln a + b \ln \theta_v + c \ln D_s \quad (2)$$

A Curva de retenção de água (CRA), a qual relaciona uma ampla variação de umidade em função dos potenciais mátricos adotados, foi ajustada por meio do modelo não-linear

empregado por Silva et al. (1994), na forma de log neperiano transformada, descrita na equação 3:

$$\ln(\theta_v) = d + e D_s + f \ln |\psi| \quad (3)$$

em que  $\theta_v$  é o conteúdo volumétrico de água ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ );  $D_s$  é a densidade do solo ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ );  $|\psi|$  é o potencial mátrico aplicado e “**d**”, “**e**” e “**f**” são os parâmetros de ajuste do modelo.

Após estimados todos os parâmetros dos modelos (a,b,c,d,e,f), foram obtidos os valores críticos de umidade ou conteúdo de água na capacidade de campo, ponto de murcha permanente, porosidade de aeração e resistência à penetração, respectivamente, utilizando as equações abaixo:

$$\theta_{cc} = \exp(d + e D_s) 10^f \quad (4)$$

$$\theta_{PMP} = \exp(d + e D_s) 1500^f \quad (5)$$

$$\theta_{PA} = (1 - D_s/2,65) - 0.1 \quad (6)$$

$$\theta_{RP} = (2.0 / a D_s^c)^{1/b} \quad (7)$$

onde,  $\theta_{cc}$  é a umidade na capacidade de campo ou conteúdo de água no potencial 10 kPa;  $\theta_{PMP}$  é a umidade no ponto de murcha permanente ou conteúdo de água no potencial 1500 kPa;  $\theta_{PA}$  é o conteúdo de água em que a porosidade de aeração é de 10%, assumindo-se um valor de densidade de partícula em torno de 2,65  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ;  $\theta_{RP}$  é a umidade na resistência à penetração em que se atinge o valor crítico de 2,0 MPa.

Há quatro possibilidades para o cálculo do IHO, dependendo dos valores dos quatro parâmetros (Wu et al., 2003):

$$\mathbf{a)} \text{ Se } (\theta_{PA} \geq \theta_{CC}) \text{ e } (\theta_{RP} \leq \theta_{PMP}) \longrightarrow \text{ IHO} = \theta_{CC} - \theta_{PMP};$$

$$\mathbf{b)} \text{ Se } (\theta_{PA} \geq \theta_{CC}) \text{ e } (\theta_{RP} \leq \theta_{PMP}) \longrightarrow \text{ IHO} = \theta_{CC} - \theta_{RP};$$

$$\mathbf{c)} \text{ Se } (\theta_{PA} \leq \theta_{CC}) \text{ e } (\theta_{RP} \geq \theta_{PMP}) \longrightarrow \text{ IHO} = \theta_{PA} - \theta_{PMP};$$

$$\mathbf{d)} \text{ Se } (\theta_{PA} \leq \theta_{CC}) \text{ e } (\theta_{RP} \leq \theta_{PMP}) \longrightarrow \text{ IHO} = \theta_{PA} - \theta_{RP}.$$



## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Intervalo Hídrico Ótimo (IHO)

A estatística descritiva dos dados utilizados para a determinação do cálculo do Intervalo Hídrico Ótimo (IHO), especificada na Tabela 1, independente da posição de amostragem, demonstrou que os parâmetros: conteúdo volumétrico de água ( $\theta_v$ ), densidade do solo (Ds) e resistência à penetração (RP) tiveram amplos valores de distribuição, sendo que a Ds, juntamente com a areia, o silte e a argila, apresentaram baixos coeficientes de variação (CV) para as duas profundidades, enquanto que, a umidade volumétrica ( $\theta_v$ ) e a resistência à penetração (RP) apresentaram valores de CV variando de médio a alto nas duas profundidades, respectivamente, segundo o critério de Warrick & Nielson (1980).

**Tabela 1.** Classificação textural e distribuição estatística dos atributos físicos utilizados nos ajustes do modelo do intervalo hídrico.

Atributos Analisados	N	Prof. (cm)	média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão	CV(%)	Classe Textural
Ds (g. cm <sup>-3</sup> )	80	10	1,58	1,36	1,79	0,105	6,6	—
RP (kPa)	80	10	3292,78	426,18	11347,2	2238,167	67,9	—
Uv (cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup> )	80	10	0,25	0,04	0,46	0,111	44,3	—
Areia (g. kg <sup>-1</sup> )	80	10	757	710,55	801,05	2,603	0,3	Fr. Ar
Silte (g. kg <sup>-1</sup> )	80	10	67	32,73	107,25	1,989	2,9	Fr. Ar
Argila (g. kg <sup>-1</sup> )	80	10	176	140,87	211,71	2,082	1,1	Fr. Ar
Ds (g. cm <sup>-3</sup> )	80	30	1,76	1,58	1,92	0,06	3,4	—
RP (kPa)	80	30	5118,18	1158,98	15510,64	4309,888	84,2	—
Uv (cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup> )	80	30	0,27	0,14	0,44	0,053	19,5	—
Areia (g. kg <sup>-1</sup> )	80	30	660	628,49	697,73	1,927	0,2	Fr. Arg. Ar
Silte (g. kg <sup>-1</sup> )	80	30	91	61,42	117,4	1,443	1,5	Fr. Arg. Ar
Argila (g. kg <sup>-1</sup> )	80	30	249	206,83	289,55	2,317	0,9	Fr. Arg. Ar

<sup>(1)</sup> N = número de determinação; Ds = densidade do solo; RP = resistência do solo à penetração; Uv = umidade volumétrica.

A densidade do solo ( $D_s$ ) apresentou maior homogeneidade na profundidade subsuperficial (30 cm), condição que se reflete em amostras com CV menor que 40%. Segundo Andriotti (2004), isso indica que a área está compactada uniformemente. Porém, Andrade et al.(2005) verificaram uma pequena variabilidade espacial dessa propriedade em profundidade, mesmo com valores de CV menores que 40%.

Os valores de CV apresentados pela RP, para duas profundidades, tidos como valores altos, estão associados à variação da umidade ( $\theta_v$ ) e de densidade do solo ( $D_s$ ), ocasionando, uma maior amplitude de variação deste parâmetro em profundidade. Cunha et al. (2002), por sua vez, encontraram valores baixos de CV para a resistência à penetração (CV=1,13%), em um solo de textura argilosa sob profundidade superficial, podendo ser explicado pelo fato do conteúdo de água e a  $D_s$  serem mantidos uniformes ao longo da profundidade.

O aumento da  $D_s$  e de RP em profundidade, representado pelos seus valores médios, na Tabela 2, e pela  $D_s$  em relação as posições de amostragem, entrelinha (EL) e projeção de copa (PC), na Tabela 3, está relacionado, provavelmente, ao efeito do acúmulo de pressões pelo tráfego de máquinas nas épocas de adubação, limpeza da área e colheita, com o tráfego realizado em condições de umidade inadequadas, ocasionando maiores níveis de compactação, principalmente, na posição de amostragem referente à entrelinha de cultivo. Tais resultados concordam com Fidalski (2004) e Fidalski et al. (2007), que também encontraram maiores valores de  $D_s$  na entrelinha (EL) em um Argissolo Vermelho distrófico latossólico, e com. Soares et al. (2005), que observaram que o aumento da  $D_s$ , em um pomar de laranja, foi mais acentuado em subsuperfície, para solos arenosos.

Goh (2001) e Negro (2003) relatam que valores superiores de  $D_s$  na entrelinha (EL), em relação a outras posições de cultivo, são tidos como característica padrão para essa variável em pomares mecanizados.

**Tabela 2.** Valores médios de resistência do solo à penetração (RP), densidade do solo ( $D_s$ ) e umidade volumétrica ( $\theta_v$ ) nas diferentes posições de amostragem coletadas.

Profundidade (cm)	Média					
	RP (kPa)	DS (g. cm <sup>-3</sup> )	$\theta_v$ (cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup> )	RP (kPa)	DS (g. cm <sup>-3</sup> )	$\theta_v$ (cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup> )
	Entrelinha			Projeção de copa		
10	3544,19	1,60	0,26	2915,68	1,54	0,24
30	5609,35	1,77	0,26	4381,42	1,74	0,28

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

Para determinação do Intervalo Hídrico Ótimo, os coeficientes dos modelos das curvas de resistência do solo à penetração (CRP) e da curva de retenção de água (CRA) são apresentados na Tabela 2.

**Tabela 3.** Distribuição estatística dos coeficientes resultantes dos ajustes lineares das curvas de resistência do solo à penetração ( $\ln RP = \ln a + b \ln \theta v + c \ln D_s$ ) e de retenção da água no solo ( $\ln(\theta v) = d + e D_s + f \ln |\psi m|$ ).

Parâmetros	Estimativa	Erro- padrão	Prof. (cm)	Probabilidade
<b>Curva de resistência do solo à penetração</b>				
a	0,130775	0,281898	10	0,0001
b	-1,379968	0,085365	10	0,0001
c	2,043278	0,620608	10	0,001
<b>Curva de retenção de água</b>				
d	0,262343	0,313406	10	0,4
e	-0,667294	0,199971	10	0,001
f	-0,188771	0,008725	10	0,0001
<b>Curva de resistência do solo à penetração</b>				
a	0,001426	0,541315	30	0,0001
b	- 4,6689	0,180608	30	0,0001
c	3,1733	0,965416	30	0,001
<b>Curva de retenção de água</b>				
d	-1,32876	0,160432	30	0,0001
e	0,159472	0,092746	30	0,08
f	-0,06824	0,002115	30	0,0001

Prof<sup>a</sup> a discussão não tá errada. Aconteceu apenas de eu ter ajeitado a tabela e a discussão dos parâmetros, mas ter esquecido de trocar a legenda. Tudo está de acordo com as equações daquela folha de cálculos do Excel.

O modelo ajustado explicou 83% ( $R^2 \geq 83\%$ ) da variabilidade dos dados para a RP e 89% ( $R^2 \geq 89\%$ ) da variabilidade dos dados da CRA na camada de 10 cm, enquanto que, na camada de 30 cm esses valores aumentaram para 89% ( $R^2 \geq 89\%$ ) e 93% ( $R^2 \geq 93\%$ ), respectivamente, sendo tais coeficientes, em sua maioria, significativos a 1% de

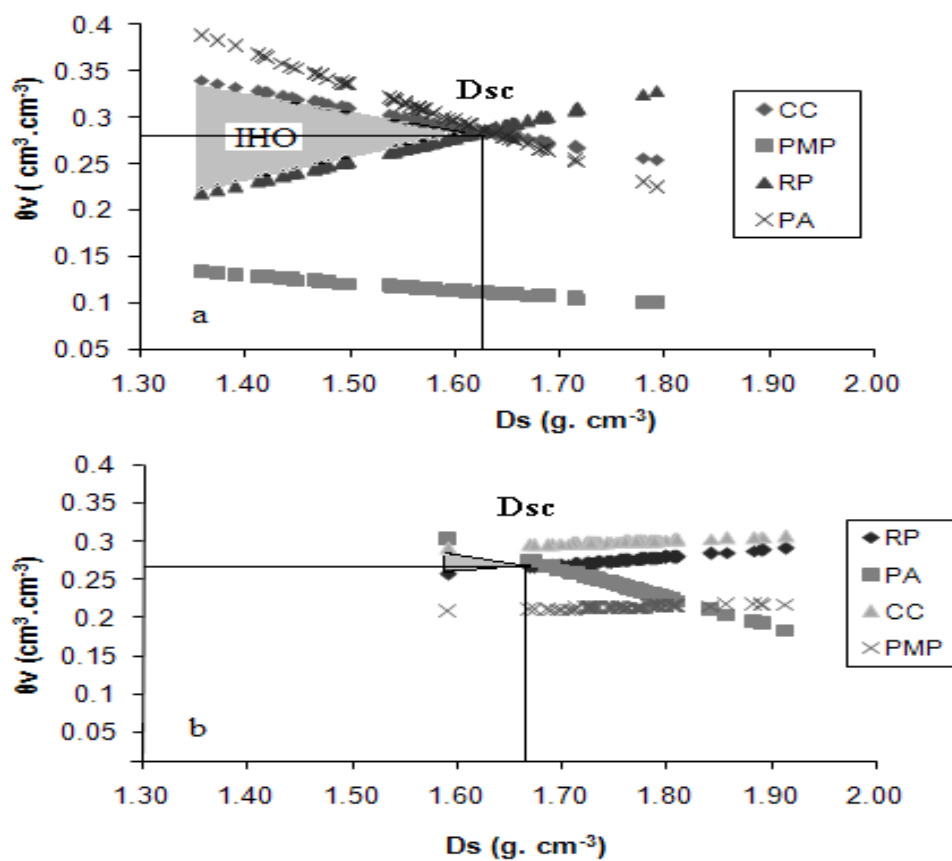
probabilidade, com exceção dos parâmetros **d** e **e**, nas profundidades de 10 e 30 cm, respectivamente.

O sinal dos coeficientes **b** e **c**, referentes à CRP, indica que houve uma variação negativa da umidade com a Ds e a RP, e que o aumento da densidade do solo, principalmente, na camada subsuperficial, alterou negativamente a quantidade de macroporos e a porosidade total, com um aumento do número de poros de tamanho menores, contribuindo para o incremento da RP, com valores restritivos para o crescimento do sistema radicular dos citros. Efeitos semelhantes também foram observados por Silva et al.(1994), Tormena et al. (1998), Tormena et al. (1999b), Imhoff et al. (2001), Araújo et al.(2004) e Blainski et al.(2008).

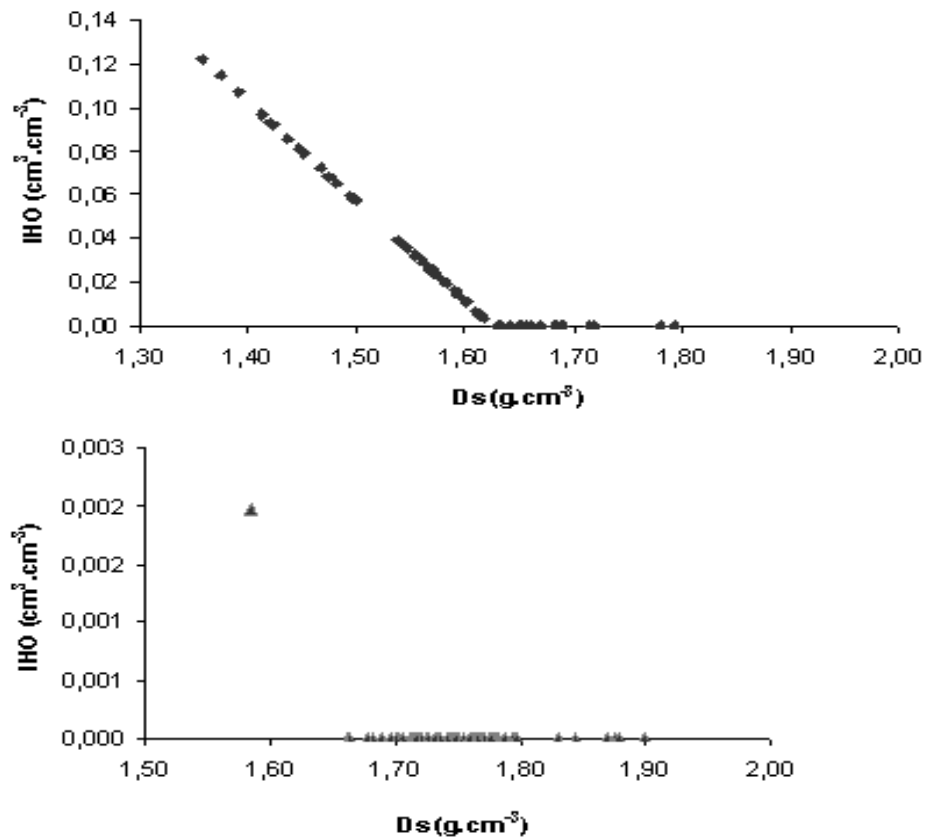
Segundo Sojka et al. (2001), o aumento da RP com o aumento da Ds está, provavelmente, relacionado ao efeito de maior coesão que a umidade do solo proporciona entre as partículas do solo, aproximando-as cada vez mais à medida que o solo é compactado. Contrariamente, sistemas de manejo que promovam a redução da resistência à penetração, resultam no incremento do desenvolvimento radicular e da produção de frutos.

O sinal dos coeficientes **e** e **f** do modelo da CRA indica que o potencial mátrico ( $\Psi_m$ ) variou positivamente com o aumento da Ds, para a profundidade de 10 cm e, negativamente para a profundidade de 30 cm, diferentemente dos resultados encontrados por Leão (2002), trabalhando com solo sob pastagem, e Negro (2003), trabalhando em área de laranja, os quais constataram um efeito positivo da Ds na retenção de água do solo. Por outro lado, concordam com os resultados obtidos por Silva (1994) e Benjamin (2003). Tal acontecimento pode ser explicado pelo fato de que sob elevados potenciais, a retenção é fortemente influenciada pela porosidade total e pela distribuição dos tamanhos dos poros (Tormena et al., 1998a) que diminui com o aumento da Ds, enquanto que, sob baixos potenciais, a retenção é controlada pelo volume de microporos, os quais têm correlação positiva com a mesma (Gupta & Larson, 1979; Silva & Kay, 1997a).

O conteúdo volumétrico de água ( $\theta_v$ ), nos limites críticos do Intervalo Hídrico Ótimo (IHO), bem como, o IHO para cada valor de densidade do solo (Ds), encontra-se plotado nos gráficos das Figuras 2a e b e 3a e b. Estas Figuras representam a variação da umidade do solo nos limites críticos definidos pela capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ), ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ), resistência a penetração ( $\theta_{RP}$ ) e porosidade de aeração ( $\theta_{PA}$ ) em função da densidade do solo.



**Figura 2.** Variação do conteúdo de água em função da densidade do solo em um Argissolo Amarelo Distrocoeso, nas profundidades de 10 cm (a) e 30 cm (b). A área em tom de cinza representa o Intervalo Hídrico Ótimo do solo (IHO). Dsc = densidade crítica do solo.



**Figura 3.** Variação do IHO em função da densidade do solo ( $D_s$ ) em um Argissolo Amarelo Distrocoeso textura média sob sistema convencional, nas profundidades de 10 cm (a) e 30 cm (b).

Na profundidade de 10 cm (Figura 2a), o IHO foi limitado superiormente pela umidade na capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ), a 0,01 MPa, e pela umidade de resistência à penetração ( $\theta_{RP}$ ) a 2,0 MPa, como limite inferior (TORMENA et al., 1999b; LEÃO et al., 2004). Tormena et. al. (1998a) e Freddi et al. (2007) também encontraram situação semelhante ao estudarem Latossolos Roxo e Vermelho, respectivamente. A diminuição da umidade na capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ) em função do aumento da densidade do solo, contradiz os resultados encontrados por Silva et al. (1994), em um solo arenoso e, Betz et al. (1998), em um solo franco.

Na profundidade de 30 cm (Figura 2b), o IHO foi limitado inicialmente pela  $\theta_{CC}$ , a 0,01 MPa, quando a  $D_s$  foi de  $1,58 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  e a umidade ( $\theta_v$ ) foi de  $0,28 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ , sendo imediatamente substituída pela umidade na porosidade de aeração ( $\theta_{PA}$ ), a 10%, a partir desse valor de  $D_s$ . Como limite inferior, o IHO foi limitado pela umidade de resistência à penetração ( $\theta_{RP}$ ) a 2,0 MPa (Beutler et al., 2006 e Blainski et al, 2008), quando a  $D_s$  foi de

1,56 g. cm<sup>-3</sup> e a  $\theta_v$  foi de 0,25 cm<sup>3</sup>.cm<sup>-3</sup>, respectivamente, adotado como impeditivo ao crescimento radicular das plantas. Apesar do IHO ter sido limitado pela RP nas duas profundidades, tal limitação foi mais severa em subsuperfície. A porosidade de aeração e a resistência à penetração são mais sensíveis às alterações na estrutura do solo do que o conteúdo de água disponível. Tanto é que para a maioria dos solos cultivados e avaliados pelo Intervalo Hídrico Ótimo, as restrições físicas na área são representadas por esses parâmetros como limites superior e inferior deste índice de qualidade.

O IHO foi negativamente correlacionado com a Ds (figura 3a e b), apresentando-se mais restritivo na profundidade subsuperficial, indicando que, antes mesmo que o solo atingisse a umidade no PMP ( $\theta_{PMP}$ ), como limite inferior, a laranja já apresentava restrições em relação ao seu desenvolvimento radicular, em função do manejo proporcionado pelo uso intensificado de operações mecânicas, afetando principalmente a entrelinha de cultivo, concordando com Silva et al. (1994); Leão et al. (2005) e Tormena et al. (2007). Contudo, Tormena et al. (1999b) encontraram resultados contrários, onde houve um incremento do IHO, variando positivamente com a Ds até o valor de 1,10 Mg m<sup>-3</sup>, 1,02 Mg m<sup>-3</sup>, em PD e no cultivo convencional (PC).

A amplitude total de variação do IHO foi maior na profundidade de 10 cm, em relação a de 30 cm, indo de 1,36-1,62 g.cm<sup>-3</sup>, para a Ds, e de 0,22-0,33 cm<sup>3</sup>.cm<sup>-3</sup>, para a  $\theta_v$ . Na profundidade subsuperficial, o IHO variou de 1,58-1,66 g.cm<sup>-3</sup>, para a Ds e de 0,25-0,28 cm<sup>3</sup>.cm<sup>-3</sup>, para a umidade volumétrica.

O estreitamento do IHO evidenciado na figura 2b, caracteriza a perda da qualidade física do solo em função de estresses físicos impostos às culturas manejadas, como constatado por Silva & Kay (1996), proporcionando um crescimento radicular menos espesso em profundidade. Solos que têm uma estreita faixa de IHO são mais vulneráveis à seca e ao excesso de umidade do que solos que têm um amplo IHO (Silva et al., 1994).

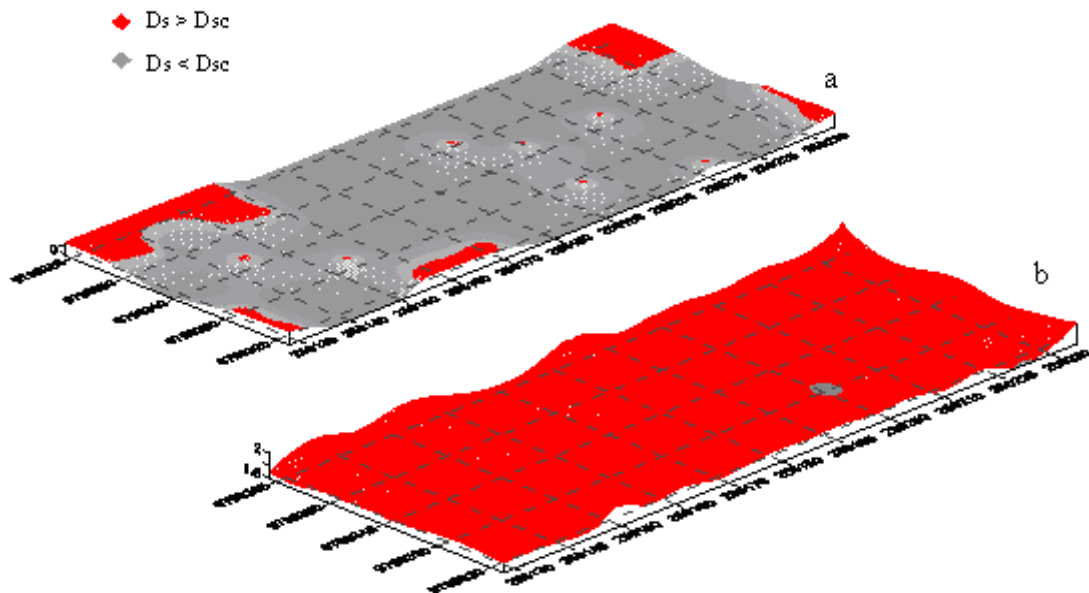
Alguns autores relatam que a tendência do IHO, em solos tropicais, é ter a  $\theta_{CC}$  como seu limite superior, uma vez que a água na capacidade de campo demora uns dois dias para diminuir de volume e, que dentro deste intervalo de tempo, chove novamente, mas há de se convir que esta é uma consideração infundável, uma vez que as áreas agrícolas cultivadas nessa região são passíveis de terem o limite superior do IHO substituído pela  $\theta_{PA}$  em função do manejo do solo com o uso intensivo de maquinário, principalmente nas grandes áreas frutícolas, como é o caso da área estudada neste trabalho.

A densidade crítica do solo (Dsc), que corresponde ao valor de Ds onde o IHO é igual a zero, assumiu valores de 1,62 g. cm<sup>-3</sup> e de 1,66 g.cm<sup>-3</sup>, para as profundidades de 10 e 30 cm

(Figura 2a e b), respectivamente. Na figura 4a e b são apresentadas as superfícies de densidade do solo nas duas profundidades estudadas. Valores de  $D_s$  superiores a  $D_{sc}$  são representados pela tonalidade vermelha, salientando o agravamento do problema de compactação do solo na profundidade de 30 cm.

Esse efeito pode ser atribuído aos vários anos de cultivo da área sob o mesmo sistema de manejo (convencional) em monocultura, propiciando maiores compressões do solo na profundidade subsuperficial, quando das várias passagens do trator na área para a realização de práticas como adubação e colheita em épocas muitas das vezes inadequadas, como é o caso de condições em que o solo encontra-se com excesso de umidade. Leão (2002) relata que este comportamento deve ser tratado como uma advertência a partir da qual devem ser tomadas maiores precauções no que se refere ao manejo do solo, de modo a evitar o agravamento do problema de compactação.

Segundo Arshad et al. (1996), os valores de  $D_{sc}$  determinados neste estudo estariam abaixo do limite crítico de 1,70 a 1,75  $Mg\ m^{-3}$ , considerado como restritivo ao desenvolvimento radicular em um Argissolo Vermelho distrófico cultivado sob o mesmo sistema de manejo, o plantio convencional (PC).



**Figura 4.** Distribuição espacial da densidade do solo ( $D_{sc}$ ) representativo para as profundidades de 10 cm (a) e a 30 cm (b), avaliadas sob plantio convencional, em um pomar de citros em Capitão Poço (PA).



Valores de Dsc inferiores aos encontrados neste trabalho foram obtidos por Beutler et al. (2004a) para a cultura do arroz cultivado em vasos, preenchidos com Latossolo Vermelho de textura média, mantidos nas tensões de água de 0,05 e 0,01 MPa (Dsc = 1,55 e 1,63 Mg. m<sup>-3</sup>) e Leonel et al. (2007), trabalhando com a cultura do amendoim, também em um Latossolo Vermelho de textura média, nas camadas de 0,02–0,05, 0,08–0,11 e 0,15–0,18 m (Dsc = 1,40 Mg. m<sup>-3</sup>). Já em condições de campo, Beutler et al. (2004b) verificaram a Dsc de 1,63 Mg m<sup>-3</sup> para a cultura do arroz de sequeiro utilizando o mesmo tipo de solo. Araújo et al. (2004) também observaram valores de Ds > Dsc para um solo sob cultivos anuais e nenhum valor de Ds > Dsc foi observado para o mesmo solo sob vegetação natural. Klein & Camara (2007) encontraram valores de Dsc variando de 1,34 Mg.m<sup>-3</sup> para o PD e de 1,33 Mg.m<sup>-3</sup> para o PDE quando a RP limitante foi de 2,0 MPa.

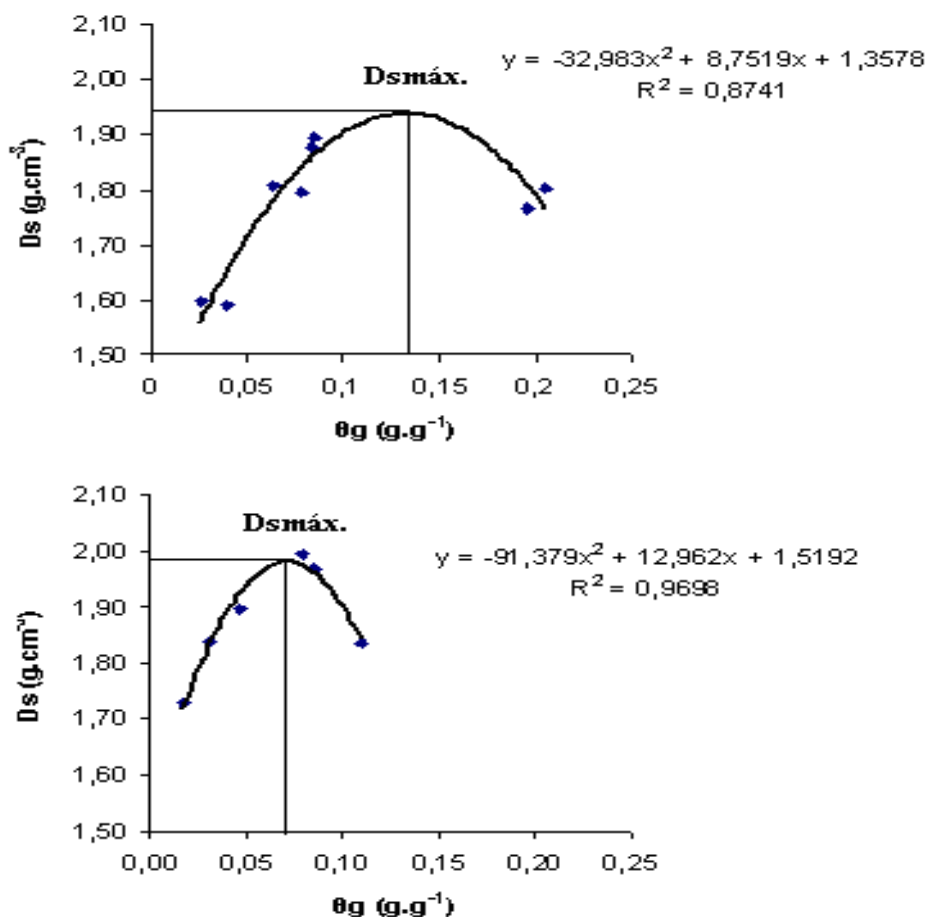
A caracterização do processo de degradação do solo iniciada pelo IHO ao considerar elevados valores de Ds e menores valores de  $\theta_v$ , determinando valores de RP restritivos até o nível da Dsc, pode ser complementada pelos resultados de densidade máxima do solo (Dsmáx) expressa no gráfico de compactação do solo, realizado através do Teste de Proctor normal, em que a máxima compactação é alcançada através do ponto de conteúdo de água ótimo para a compactação.

O comportamento da densidade do solo (Ds) varia de acordo com o tipo de solo e com o estado de compactação atuante no mesmo. Desta forma, um determinado valor de Ds que indique elevado estado de compactação para um solo argiloso, pode representar um menor estado de compactação para solos arenosos (Hakansson, 1990; Lipiec & Hakansson, 2000). A umidade do solo também tem um papel importante, uma vez que solos muito secos e solos muito úmidos tendem a apresentar maiores níveis de compactação, influenciando o comportamento das outras propriedades físicas do solo (Camargo & Alleoni, 1997).

Segundo Carter. (1990), o grau de compactação de um solo pode ser um parâmetro útil para indicar as mudanças no comportamento físico de parâmetros como a macroporosidade, a condutividade hidráulica, a permeabilidade ao ar e a resistência à penetração do solo, além do rendimento relativo das culturas no campo. Porém, Suzuki et al. (2007) relata que a relação entre o grau de compactação e as propriedades físicas do solo em relação as culturas, ainda deve ser testada para que sejam definidos os valores críticos de grau de compactação encontrado no desenvolvimento das plantas.

A modelagem dos resultados obtidos com o teste de Proctor resume a potencialidade produtiva de um solo diante de condições adversas de cultivo proporcionadas pela

desestruturação da qualidade física do solo medida pelo IHO. Os resultados obtidos neste trabalho para as duas profundidades avaliadas estão descritos nos gráficos de compactação das figura 5a e b.



**Figura 5.** Curvas características de compactação do solo em um Argissolo Amarelo Distrocoeso textura média, sob cultivo de laranja, em Capitão Poço (PA), nas profundidades de 10 cm (a) e 30 cm (b).  $D_{s\text{máx.}}$  = densidade do solo máxima.

Foi observado um valor de densidade do solo máxima, na subsuperfície, de  $1,94 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , para a profundidade de 10 cm e de  $1,98 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , para a profundidade de 30 cm, sendo 0,87 ( $R^2 \geq 87\%$ ), e, 0,96 ( $R^2 \geq 96\%$ ) da variabilidade do nível de degradação do solo explicado pela regressão quadrática polinomial. Enquanto que, a umidade ótima para a compactação foi de  $0,13 \text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ , a 10 cm e de  $0,054 \text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ , a 30 cm. Esses valores de  $D_s$  associados aos resultados obtidos nos gráficos de IHO descritos na figura 2a e b, evidenciam que a degradação da estrutura do solo pelo cultivo impõe limitações ao crescimento radicular das plantas, determinando o grau de alteração das propriedades físicas do solo e, com isso,

possibilitando um possível declínio da produtividade do pomar, conforme relata Lima et al.(2004).

O maior valor de densidade do solo (tabela 1), na profundidade de 30 cm, se aproxima do valor de densidade máxima do solo ( $D_{sm\acute{a}x.}$ ) ( $1,98 \text{ g.cm}^{-3}$ ), evidenciando que a compactação do solo já comprometeu bastante o desenvolvimento radicular da laranja, principalmente em subsuperfície, como conseqüência do uso intensivo maquinário no pomar, reduzindo a macroporosidade e porosidade total do solo, a disponibilidade de água e nutrientes para as plantas e da difusão de gases nesta profundidade. Diferentemente dos resultados apresentados por Sanches et al. (1999) que não identificaram efeitos de compactação do solo em subsuperfície, em pomares de laranja e; dos resultados apresentados por Bordin et al. (2005) e Lima et al. (2005), que também não encontraram efeitos da compactação sobre as posições de amostragem referentes ao centro da entrelinha, rodado da entrelinha e projeção de copa.

Tavares Filho et al. (1999), por sua vez, observaram um aumento da  $D_s$  com efeitos no surgimento da compactação vertical do solo na camada de 0–0,30 m sob o rodado da EL e horizontal com tendência à compactação na camada de 0,10–0,30 m sob a projeção da copa (PC) das plantas e o centro da entrelinha (CEL) em um solo argiloso cultivado com tangerineira Poncã. Tal compactação foi atribuída ao tráfego de máquinas por ocasião das operações de roçagem e colheita da produção.

Se não forem tomadas medidas urgentes para descompactar o solo, o cultivo da laranja no local ficará cada vez mais enfraquecido, visto que há maior incidência de  $D_s < D_{sc}$  nesta profundidade, contribuindo para um possível declínio do pomar.

Como no sistema de produção agrícola a  $D_s$  interage com a produtividade da cultura, torna-se muito importante conhecer os valores de  $D_s$  determinados pela curva de compactação do solo, a fim de tomar decisões adequadas para a manutenção da qualidade estrutural e física do solo antes mesmo que a  $D_s$  atinja valores máximos de restrição ao desenvolvimento vegetal.

Nos pomares cítricos a compactação do solo pode ocorrer por toda a área ou apenas em determinados locais, como fator resultante de fatores internos como textura, estrutura e ciclos de secagem e umedecimento, limitando a sua produtividade, mas sem dúvida o tráfego de máquinas agrícolas em diferentes tipos, intensidades e frequências, representado pelo elevado número de operações como adubações, pulverizações e controle de plantas daninhas, tendem a se agravar na colheita das variedades tardias, coincidindo muitas vezes com o

período chuvoso, facilitando a compactação pela passagem das carretas e caminhões (Seixas, 1988; Tersí & Rosa, 1995).

Lima et al. (2006), trabalhando em um Argissolo Vermelho Distrófico Arênico, de textura franco arenosa no RS, observaram níveis de compactação do solo diferenciados para os sistemas de plantio direto (PD), plantio direto escarificado (PDE) e plantio direto com quatro passadas de máquina na área, apresentando maiores valores de  $D_s$  no PD com compactação adicional. Em outro trabalho, os mesmos autores, observaram um aumento na compactação do solo no sentido das posições de amostragem: linha de plantio, entre rodado, rodado das máquinas e implementos agrícolas e projeção da copa das plantas de laranja pêra (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck) sobre o porta-enxerto limão “cravo” (*Citrus limonia* (L.) Osbeck).

As zonas compactadas, restringem o crescimento radicular das plantas em função da redução da infiltração e da retenção de água e da consistência do solo (Godson et al., 2000), impondo as mesmas um crescimento menos vigoroso e restrito as camadas subsuperficiais. A porosidade do solo, o número e tamanho dos poros e a difusão de gases também é afetada (Foloni et al., 2003). Neste sentido, Vomocil & Flocker (1966), consideram que a porosidade de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , tida mínima para o crescimento e desenvolvimento satisfatório das plantas, corresponde a um grau de compactação de aproximadamente 89% para solos com 10% de argila, 80% para solos com 20-30% de argila e 75% para solos com 30-70% de argila.

Mahl et al (2008), relatam que a compactação causada pelo aumento da resistência à penetração pode ter seus efeitos minimizados com a utilização de sistemas de rotação de culturas, inserindo-se espécies que funcionam como descompactadores biológicos.

A subsolagem também se apresenta como um processo de descompactação eficiente, dependendo da profundidade em que o solo for prejudicado, contribuindo na melhoria da circulação de ar, água e nutrientes e aumentando o volume de solo explorado pelas raízes, como foi observado em limão Cravo sob laranja Pêra (Resende et al., 2002). Esses métodos, porém, não adotam um critério definido em relação à distância mínima das plantas cítricas para a passagem do implemento sem causa de danos ao sistema radicular (Castro & Lombardi neto, 1992). Segundo Minatel et al. (2006), para minimizar os efeitos da compactação do solo, como a redução da macroporosidade na região trafegada pelos rodados, o citricultor tem como opções evitar trabalhar com o solo úmido ou encharcado, manter a vegetação no solo e direcionar o trânsito na colheita dos frutos cítricos.

Áreas cultivadas sob sistema convencional apresentam uma tendência maior à compactação do solo, devido a mecanização intensiva e a uma menor cobertura do solo, como também ao adensamento deste em profundidade, reduzindo a porosidade total, a macroporosidade e a disponibilidade de água as plantas. Mas isso não significa que esse efeito negativo do manejo não seja sentido em áreas sob plantio direto. E, em ambas as circunstâncias, os resultados proporcionados pelo IHO em relação à qualidade física do solo, reafirmam a importância deste como um índice de avaliação do comportamento do solo quando manejado.

## 5. CONCLUSÕES

1. A qualidade física do Argissolo Amarelo mostrou-se sensível ao manejo do solo, principalmente, na posição da entrelinha de cultivo, devido os valores de RP e Ds apresentarem-se restritivos ao crescimento das plantas.
2. O intervalo de água disponível às plantas medido pelo IHO é nulo para valores de densidade do solo iguais ou maiores que 1,62 e 1,66 g.cm<sup>-3</sup> para as profundidades de 10 e 30 cm, respectivamente.
3. O IHO foi negativamente correlacionado com a Ds, apresentando-se mais restrito na profundidade superficial.
4. O manejo do solo sob sistema convencional, adotado na área de citrus estudada, tem favorecido a compactação do solo, principalmente, na profundidade de 30 cm.
5. A Dsmáx. foi maior na profundidade de 30 cm, correspondendo ao valor de 1,98 g.cm<sup>-3</sup> e a respectiva umidade ótima para compactação de 5%.
6. Os resultados deste trabalho sugerem que o IHO é um parâmetro importante no monitoramento da qualidade física do solo quando submetido ao manejo porque possibilita indicar e medir os níveis de compactação e/ou adensamento do solo.

## 6. BLIOGRAFIA

ABEcitrus. Associação Brasileira de Exportadores de Cítricos. 2009. [http://www.abecitrus.com.br/produção\\_br.html](http://www.abecitrus.com.br/produção_br.html). Acesso em: 02/01/2009.

ARAÚJO, M.A.; TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. **R. Bras.Ci. Solo**, v.28:337-345, 2004.

ARSHAD, M.A. et al. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J.W.; JONES, A.J. (Eds.). **Methods for assessing soil quality**. Madison : **Soil Science Society of América**, 1996. p.123-141.

BASTOS, T.X. **O estado atual dos conhecimentos das condições climáticas da Amazônia brasileira**. Belém: IPEAN, 1972. p.68-122. (Boletim Técnico, 54).

BENJAMIN, J. G. et al. Quantifying effects of soil conditions on plant growth and crop production. **Geoderma**, New York, v. 116, p. 137-148, 2003.

BERNARDO, A. N.; Manual de irrigação. 6ed. Viçosa: UFV, Imprensa Universitária. 657p.2005.

BEUTLER, A. N.; CENTURION.; ROQUE, C.G. Relação entre alguns atributos físicos do solo e a produção de grãos de soja e arroz de sequeiro em Latossolos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n.2, p.365-371, mar-abr, 2004.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SILVA, A. P. Intervalo hídrico ótimo e produção de soja e arroz em dois latossolos. **Irriga**, Botucatu, v.9, n.2, p.181-192, 2004a.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SILVA, A. P.; ROQUE, C. G.; FERRAZ, M. V. Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo na produtividade de arroz de sequeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, n.6, p.557-580, 2004b.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SILVA, A.P. Soil Resistance to Penetration and Least Limiting Water Range for Soybean Yield in a Haplustox from Brazil. **Braz. Arch. Biol. Technol.**, 48: 863- 871, 2005.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SILVA, A.P. da. & BARBOSA, J.C. Intervalo hídrico ótimo e produtividade de cultivares de soja. **Rev. Brás. Eng. Agríc. Ambiental**, v.10, n.3, p. 639-645, 2006.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; CENTURION, M.A.P.C.; LEONEL, C.L.; SÃO JOÃO, A.C.G.; FREDDI, O.S. Intervalo hídrico ótimo no monitoramento da compactação e da qualidade física de um Latossolo Vermelho cultivado com soja. **Rev. Bras. Ci. Solo**, v.31, p.1223-1232, 2007.

BORDIN, I.; NEVES, C.S.V.J.; AIDA, F.T.; SOUZA, W.R.; DAVOGLIO JÚNIOR, A.C.; FURLANETO, T.L.R.; TAVARES FILHO, J. Sistema radicular de plantas cítricas e atributos físicos do solo em um Latossolo Argiloso submetido à escarificação. **Ci. Rural**, v.35, P. 820-825, n.4, P jul-ago, 2005.

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

BRADY, NYLE C. 1999: The nature and properties of soil/Soil architecture and physical properties. Pág 117 a 169. 12ª ed. 881p.

BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. *Trans. Am. Soc. Agron. Eng.*, v.33: 519-524, 1990.

CAMARGO, O.A.; ALLEONI, L.R.F. Compactação e desenvolvimento das plantas. Piracicaba: Ed. Autores, 1997.132p.

CARVALHO, J.E.B.; SOUZA, L.S.; JORGE, L.A.C.; RAMOS, W.F.; NETO, A.O.C.; ARAÚJO, A.M.A.; LOPES, L.; JESUS, M. Manejo de coberturas do solo e sua interferência no desenvolvimento do sistema radicular da laranja Pêra. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 21, n.2, p.140-145. 1999.

CARVALHO, J.E.B.; JORGE, L.A.C.; RAMOS, W.F.; ARAÚJO, A.M.A. Manejo da cobertura do solo e desenvolvimento do sistema radicular da combinação laranja “Pêra”/limão “Cravo” na Bahia e em Sergipe. *Laranja*, 22: 259-269, 2001.

CARVALHO, M.P.; SORATTO, R.P.; FREDDI, O.S. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo Vermelho Distrófico sob preparo convencional em Selvíria, estado de Mato Grosso do Sul. *Acta. Sci.* 24: 1353-1361, 2002.

CASTRO, O.M.; LOMBARDI NETO, F. Manejo e conservação do solo em citrus. *Laranja*, v.13, n.1, p.275- 305, 1992.

CAVALIERI, K.M. Aspectos metodológicos da pesquisa sobre compactação e qualidade física do solo. Tese (doutorado). ESALQ. Piracicaba, 2007.

CINTRA, F.L.D.; LIBARDI, P.L.; JORGE, L.A. de C. Distribuição do sistema radicular de porta-enxertos de citros em ecossistema de Tabuleiro Costeiro. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.21,p.313-317, 1999.

COLLARES, G.L.; REINERT, D. J.; REICHERT, J.M. & KAISER, D.R. Compactação de um Latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa , v. 32, n. 3, junho 2008 .

CUNHA, J.P.A.R.; VIEIRA, L.B.; MAGALHÃES, A.C. Resistência Mecânica do solo à penetração sob diferentes densidades e teores de água. *Engenharia na Agricultura*, v.10, n. 1-4, Jan-Dez., 2002.

DAVOGLIO JÚNIOR, A.C.; BORDIN, I.; NEVES, C.S.V.J. Sistema radicular e desenvolvimento de plantas cítricas provenientes de viveiro telado e aberto. **Rev. Bras. Frutic.**, Jaboticabal –SP, v.28, n.2, p. 172-175, Agosto. 2006.

DEMATTE, J. L.; VITTI, G. C. Alguns aspectos relacionados ao manejo de solos para os citros. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE CITROS, 2., 1992, Campinas. **Anais...** Campinas: Fundação Cargill, 1992. p.67-99.

DEXTER, A.R. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density and organic matter and effects on root growth. **Geoderma**, Amsterdam, v.120, n.3, p. 201-214, 2004a.

EMBRAPA SOLOS: Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Rio de Janeiro, RJ 2006, 312p.

FAEAPA. Agronegócio Paraense. <http://www.faeapanet.com.br>. 2008. Acesso em: 22/12/2008.

FIDALSKI, J. Propriedades físico-hídricas de um Argissolo Vermelho Distrófico Latossólico em diferentes sistemas de manejo das entrelinhas de citros. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Maringá, 2004.

FIDALSKI, J. Qualidade física do solo sob sistemas de manejo nas entrelinhas de citros. Tese (doutorado). Maringá, PR, 2007. 84 p.

FIDALSKI, J. & TORMENA, C. A. Homogeneidade da qualidade física do solo nas entrelinhas de um pomar de laranja com sistemas de manejo da vegetação permanente. **R. Bras. Ci. Solo**, 31: 637- 645, 2007.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C.A.; SCAPIM, C.A. Espacialização vertical e horizontal dos indicadores de qualidade para um Latossolo Vermelho cultivado com citros. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, MG, v. 31, n. 1, p. 9-19, 2007.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C. A & SILVA, A.P. Qualidade física do solo em pomar de laranja no Nordeste do Paraná com manejo da cobertura permanente na entrelinha. **R. Bras. Ci. Solo**, 31: 423-433, 2007.

FREDDI, O.S.; CENTURION, J.F.; BEUTLER, A.N.; ARATANI, R.G.; LEONEL, C.L. & SILVA, A.P. Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo no crescimento e na produtividade da cultura do milho. **Bragantia**, 66:477-486, 2007.

FOLONI, José Salvador Simoneti; CALONEGO, Juliano Carlos; LIMA, Sérgio Lázaro de. Efeito da compactação do solo no desenvolvimento aéreo e radicular de cultivares de milho. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v. 38, n. 8, agosto 2003 .

GARDNER, W.H. Water content. In: KLUTE, A., ed, Methods of soil analysis, Parte I: Physical and mineralogical methods. Ed. Madison, Wisconsin (USA), American Society of Agronomy & Soil Science Society of America, 1986. p. 493-544.

GODSON, R.; LETLOW, R.; RESTER, D.; STEVENS, J. Use of precision agriculture technology to evaluate soil compaction. Disponível em: <[http:// www. ag.auburn.edu/auxiliary/nsdl/scasc/Proceedings/2000/Godson.pdf](http://www.ag.auburn.edu/auxiliary/nsdl/scasc/Proceedings/2000/Godson.pdf)>. Acesso em: 02 ja. 2009.



GUPTA, S. C. & LARSON, W.E. Estimating soil water characteristics from size distribution, organic carbon and bulk density. *Water Res. Res.*, 15: 1633-1635, 1979.

HÅKANSSON, I. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. *Soil & Tillage Research*, v.16, p.105-120, 1990.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e estatística. Levantamento de Lavouras permanentes (2007). Disponível em: [http:// www.ibge.org.br](http://www.ibge.org.br). Acesso em: 31/12/2008.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; TORMENA, C.A. Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. *Pesq. Agropec. Bras.* v. 35, P. 1493-1500. 2000.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; DIAS JÚNIOR, M.S. & TORMENA, C.A. Quantificação das pressões críticas para o crescimento das plantas. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:11-18, 2001.

IMHOFF, S. Indicadores de qualidade estrutural e trafegabilidade de Latossolos e Argissolos Vermelhos. 2002. 94f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiróz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

KIEHL, E.J. Manual de Edafologia: relações solo – planta. São Paulo, Agronômica Ceres, 1979. 262p.

KLEIN, V.A. & CAMARA, R.K. Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em Latossolo Vermelho sob plantio direto escarificado. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 31: 221-227, 2007.

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

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: BLACK, C. A., *Methods of Soil analysis. I. Physical and mineralogical methods.* 2 ed. Madison, American Society of Agronomy, **Soil Science Society of American**, 1986, p. 635-662.

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

LEÃO, T.P. Intervalo hídrico ótimo em diferentes sistemas de pastejo e manejo de pastagem. Dissertação (Mestrado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 2002.

LEÃO, T.P.; SILVA, A. P.; MACEDO, M. C. M.; IMHOFF, S. & EUCLIDES, V. P. B. Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. *R. Bras. Ci. Solo*, 28: 415- 423, 2004.

LEÃO, T.P.; SILVA, A. P.; PERFECT, E.; TORMENA, C.A. An algorithm for calculating the Least Limiting Water Range of soils. *American Society of Agronomy*, 2005, p.1210-1215.

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

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

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

LIPIEC, J.; HÅKANSSON, I. Influences of degree of compactness and matric water tension on some important plant growth factors. **Soil & Tillage Research**, v.53, p.87-94, 2000.

LIMA, C.R.L.; SILVA, A.P.; IMHOFF, S. LIMA, H.V.; LEÃO, T.P. Heterogeneidade da compactação de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob pomar de laranja. **R. Bras. Ci. Solo**, 28: 409-411, 2004.

LIMA, C.R.L.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S. Compressibilidade de um Argissolo sob plantio direto escarificado e compactação. **Ciência Rural**, v.36, n.6, Novembro, 2006.

LIMA, C.L.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; SUZUKI, L.E.A.S.; DALBIANCO, L. Densidade crítica ao crescimento de plantas considerando água disponível e resistência à penetração de um Argissolo Vermelho distrófico arênico. **Ciência Rural**, v.37, n.4, jul-ago, 2007.

LIMA, C.G.R.; CARVALHO, M.P.; MELLO, L.M.M.; LIMA, R.C. Correlação linear entre a produtividade de forragem, a porosidade total e a densidade do solo de Pereira Barreto (SP). **R. Bras. Ci. Solo**, 31: 1233-1244, 2007.

MAHL, D.; SILVA, R.; GAMERO, C.; SILVA, P. Resistência do solo à penetração, cobertura vegetal e produtividade do milho em plantio direto escarificado. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Brasil, 30 dez. 2008.

MINATEL, A.L.G.; ANDRIOLI, I.; CENTURION, WILLIAM, N. Efeito da subsolagem e da adubação verde nas propriedades físicas do solo em pomar de citros. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, V.26, N.1, P.86-95, JAN/ABR. 2006.

MORAES, S.O.; LIBARDI, P.L.; NETO, D. Problemas metodológicos na obtenção da curva de retenção de água pelo solo. *Sci. Agríc.*, Piracicaba, v.50, n.3, p.383-392, out./dez., 1993a.

MORAES, M. H.; BENEZ, S. H. Efeitos de diferentes sistemas de preparo do solo em algumas propriedades físicas de uma Terra Roxa Estruturada e na produção de milho para um ano de cultivo. **Engenharia Rural**, Jaboticabal, v.16, n.2, p.31-41, 1996.

NEVES, C.S.V.; MURATA, I.M.; STENZELA, N.M.C.; MEDINA, C.C.; BORGES, A.V.; OKUMOTO, S.H.; LEE, R.H.C.; KANAI, H.T. Root distribution of rootstocks for 'Tahiti' lime. **Sci. agric. (Piracicaba, Braz.)**, Piracicaba, v. 61, n. 1, fev. 2004.

NEVES JUNIOR, A. F. Avaliação da qualidade física de solos em pastagens degradadas da Amazônia. Dissertação (Mestrado), Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2005. 65p.

NEGRO, S. R. L. Propriedades físicas e químicas de um latossolo vermelho distrófico cultivado com laranja. 2003. 60 f. Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2003.

PAIVA, A.Q.; SOUZA, L.S.; RIBEIRO, A.C.; COSTA, L.M. Disponibilidade de água de uma topossequência de solos de tabuleiro do Estado da Bahia e sua relação com os indicadores do crescimento da laranjeira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, p.367-377, 1998.

PORTELA, J.C.; LIBARDI, P.L.; LIER, Q. de J. van. Retenção da água em solo sob diferentes usos no ecossistema Tabuleiro Costeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.5, n.1, p.49-54, 2001.

QUAGGIO, J.A. Análise de solos para citros: Métodos e critérios para a interpretação de resultados. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE CITROS, 4., Bebedouro, 1996. p.95-113.

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

REICHARDT, K. Capacidade de Campo. **R. Bras. Ci. Solo**, v.12, p.211-216, 1988.

REICHARDT, K.; TIMM, L.C. **Solo, Planta e Atmosfera**: conceitos, processos e aplicações. São Paulo: Manole, 2004. 478 p.

REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade dos sistemas agrícolas. **Ci. Ambiente**, v.27: 29-48, 2003.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; SILVA, V.R. *Propriedades físicas de solos em sistema plantio direto irrigado*. Organizado por: Reimar Carlesso; Mirta T Petry; Genésio M Rosa; Carlos A Ceretta. Irrigação por aspersão no Rio Grande do Sul:ed. 1 ed., Santa Maria:, Palloti, v. 1, p. 114-133, 2001.

REZENDE, J. de O.; MAGALHÃES, A.F. de J.; SHIBATA, R.T.; ROCHA, E.S.; FERNANDES, J.C.; BRANDÃO, F.J.C.; REZENDE, V.J.R.P. **Citricultura nos solos coesos dos Tabuleiros Costeiros**: análise e sugestões. Salvador: SEAGRI/SPA, 2002. 97p. (Série Estudos Agrícolas, 3).

REYNOLDS, W.D.; BOWMAN, B.T.; DRURY, C.F.; TAN, C. S.; LU, X. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. **Geoderma** 110 (2002) 131-146.

RICHARDS, L.A. Physical conditions of water in soil. In: BLACK, C.A.; EVANS, D.D.; WHITE, J.L.; ENSMINGER, L.E.; CLARK, F.E. (Ed.). **Methods of soil analysis**: physical and mineralogical properties, including statistics of measurements and sampling. Madison: American Society of Agronomy, 1965. p.128-152.

ROSOLEM, C.A. et al. Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, v.34, p.821-828, 1999.

SAEAFS. Sociedade Autônoma de Estudos Avançados em Física do Solo. Aeração do Solo (2002). Disponível em: <<http://www.members.tripod.com/estudonline/saeafs.htm>. Acesso em: 23 dez 2008.

SANCHES, A.C.; SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; RIGOCIN, A.T. Impacto do cultivo de citros em propriedades químicas, densidade do solo e atividade microbiana de um Podzólico Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.23, n.1, p.91-9, 1999.

SEIXAS, F. COMPACTAÇÃO DO SOLO DEVIDO À MECANIZAÇÃO FLORESTAL: Causas, Efeitos e Práticas de Controle. Piracicaba: IPEF, 1988. 11p. (Circular técnica, 163).

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

SILVA, A. P. & KAY, B. D. **Estimating the least limiting water range of soil from properties and management. Soil Sci. Soc. Am. J.**, 61:877-883, 1997a.

SILVA, A.P.& KAY, B.D. Linking process capability analysis and least limiting water range for assessing soil physical quality. **Soil & Tillage Research** (2004), 167-174.

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

SILVA, A.P.; IMHOFF, S.; KAY, B. Plant response to mechanical resistance and air-filled porosity of soils under conventional and no-tillage system. **Sci. agric. (Piracicaba, Braz.)**, Piracicaba, v. 61, n. 4, 2004.

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

SINDIFRUTAS. Sindicato dos produtores de frutas do Pará. 2008. <http://www.sindifrutas.org.br/potencial.html>. Acesso em 22/12/2008.

SOARES, J.L.N.; ESPINDOLA, C.L.; FOLONI, L.L. Alteração física e morfológica em solos cultivados com citros e cana-de-açúcar, sob sistema tradicional de manejo. **R. Ci. Rural**, v.35, n.2, mar - abr, 2005.

SOJKA, R.E.; BUSSCHER, W.J & LEHRSCHE, G.A. In Situ strength, bulk density, and water content relations of a durinodic xeric haplocalcid soil. **Soil Sci.**, 166:520-529, 2001.

SOUZA, L. da S.; PAIVA, A. de Q. Variação do potencial total da água em uma topossequência de solos de tabuleiro, durante dois anos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, p.349-355, 2001.

SOUZA, L.D.; SOUZA, L. da S.; LEDO, C.A. da S. Disponibilidade de água em pomar de citros submetido à poda e subsolagem em Latossolo Amarelo dos Tabuleiros Costeiros. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.26, p.69-73, 2004a.

SOUZA, L.D.; CUNHA SOBRINHO, A.P. da; RIBEIRO, L. da S.; SOUZA, L. da S.; LEDO, C.A. da S. Avaliação de plantas cítricas, em diferentes profundidades de plantio, em Latossolo Amarelo dos Tabuleiros Costeiros. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.26, p.241-244, 2004b.

SOUZA, L.D.; SOUZA, L.S.; SILVA LEDO, C.A. Sistema radicular dos citros em Neossolo Quartzarênico dos Tabuleiros Costeiros sob irrigação e sequeiro. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, v.42, n.10, p. 1373-1381, out. 2007.

SUZUKI, L.E.A.S.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; LIMA, C.L.R. Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, v.42, n.8, p. 1159-1167, agos. 2007

SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; LIMA, C.L.R. Estimativa da susceptibilidade à compactação e do suporte de carga do solo com base em propriedades físicas de solos do Rio Grande do Sul. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 32: 963-973, 2008.

STOLF, R. A compactação do solo e perspectivas da subsolagem em citros. *Laranja*, v.8, n.2, p.283-308, 1987.

TAVARES FILHO, J.; RALISH, R.; GUIMARÃES, M.F.; MEDINA, C.C.; BALBINO, L.C. & NEVES, C.S.V.J. Método do perfil cultural para avaliação do estado físico de solos em condições tropicais. **R. Bras. Ci. Solo**, 23: 393-399, 1999.

TAYLOR, H.M.; BRAR, G.S. Effect of soil compaction on root development. *Soil and Tillage Research*, v.19, p. 111-119, 1991.

TERSI, F.E.A.; ROSA, S.M. A subsolagem no manejo de solo para os pomares de citros. *Laranja*, v.16, n.2, p.289-298, 1995.

TOPP, G.C. et al. **Non limiting water range (NLWR): an approach for assessing soil structure**. Ottawa: Soil Quality Evaluation Program, Ottawa, Agriculture and Agri-Food Canadá, 1994. 36p. (Technical report, 2).

TORMENA, C.A. Caracterização e avaliação do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo. Tese (Doutorado)- Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. & LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 22: 573-581, 1998a.

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

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

TORMENA, C. A.; ARAÚJO, M.A.; FIDASKI, J. & COSTA, J. M. da. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférico sob sistemas de plantio direto. . R. Bras. Ci. Solo, 31: 211-219, 2007.

TORMENA, C. A.; SILVA, A.P.; IMHOFF, S.D.C.; DEXTER, R. Quantification of the soil physical quality of a tropical oxissol use the index. Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.), v.65, n.1, p.6656-60, January/February. 2008.

VOMOCIL, J.A.; FLOCKER, W.J. Effect of soil compaction on storage and movement of soil, air and water. Transactions of the Am. Soc. Agric. Eng., v.4, p.242-246, 1966.

ZOU, C.; SANDS. R.; BUCHAN. G.; HUDSON, I. Least limiting water range: a potential indicator of physical quality of forest soils. Aust. J. Soil Res. 38: 947-958.2000.

WU, L.; FENG, G.; LETEY, J.; FERGUSON, L.; MITCHELL, T.; McCULLOUGH-SANDEN, B & MARKEGARD, G. Soil management effects on the nonlimiting water range. Geoderma, 114:401-414, 2003.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)