

Metodologia para Avaliação da Qualidade Física do Solo – O Intervalo Hídrico Ótimo

1. Introdução

A avaliação da relação física do solo versus produtividade de culturas é complexa. Russel (1952) afirmou: **“Existe uma idéia popular reconhecendo a importância das propriedades físicas do solo no crescimento de plantas, mas grande parte das informações nessa área são vagas, qualitativas e freqüentemente carecem de dados científicos”**.

Vinte um anos após Low (1973) escreveu: **“Muitas tentativas tem sido feitas no sentido de correlacionar, quantitativamente, produtividade de culturas e a estrutura do solo. Entretanto, essas tentativas tem sido infrutíferas”**.

Hamblin (1985) comentou o progresso da pesquisa nessa área **“...praticamente todo trabalho ou livro escrito sobre estrutura do solo nos últimos quarenta anos começa reconhecendo a importância das propriedades físicas do solo no crescimento de plantas. Entretanto, logo em seguida, a maioria dos autores reconhece a extrema dificuldade de relacionar, quantitativamente, o desenvolvimento de plantas com propriedades físicas do solo...”**.

Nesse contexto, a proposta de Kay (1990) representou um avanço nessa área. O autor sugeriu a integração dos atributos físicos do solo que influenciam, diretamente, o crescimento de plantas em um único parâmetro para quantificar a qualidade física do solo.

Os atributos físicos do solo, relacionadas com a produtividade de culturas, podem ser divididos em duas categorias (Letey, 1985):

(i) atributos diretamente relacionados com o desenvolvimento de plantas, isto é, água, oxigênio, resistência do solo à penetração e temperatura e,

(ii) atributos indiretamente relacionadas com o desenvolvimento de plantas, tais como textura , densidade do solo, agregação e porosidade do solo.

Os atributos físicos do solo do item (i) afetam diferentes processos fisiológicos, como a fotossíntese e o crescimento radicular e foliar, enquanto que os mencionados no item (ii) afetam a produtividade das culturas devido a sua influência sobre a retenção de água, aeração, temperatura e resistência do solo à penetração das raízes.

Funcionalmente, a estrutura do solo ideal é aquela que permite uma grande área de contato entre as raízes e o solo, espaço poroso suficiente e contínuo para o movimento da água e gases, e resistência do solo à penetração não impeditiva ao crescimento das raízes e folhas (Kopi & Douglas, 1991). Vários fatores dificultam a definição, em termos quantitativos, de uma estrutura do solo ideal. Por exemplo, a relação entre o desenvolvimento e produtividade das culturas com a estrutura do solo é extremamente dependente das condições climáticas.

A variabilidade temporal e espacial dos atributos físicos do solo representam, também, um grande obstáculo para a quantificação da relação entre atributos físicos do solo e a produtividade de culturas. Outra dificuldade é que vários atributos físicos do solo são interdependentes. Por exemplo, a variação da umidade do solo (θ) altera o potencial matricial (ψ), a aeração e a resistência do solo à penetração de raízes.

Apesar das dificuldades, o entendimento do comportamento dos atributos físicos do solo, principalmente água e estrutura do solo, é fundamental para o entendimento de muitos processos de importância agrícola (Hadas, 1997).

2. Propriedades Físicas do Solo versus Crescimento de Plantas

Diversos estudos tem sido conduzidos para incrementar o conhecimento da relação entre as propriedades físicas do solo e a produtividade das culturas,. Entre os atributos físicos do solo, diretamente relacionados com o desenvolvimento de plantas, a curva de retenção da água no solo θ (ψ) tem sido o fator mais exaustivamente estudado.

Do total de água armazenada no solo, apenas uma fração pode ser utilizada pelas plantas. Próximo da saturação, parte da água é perdida, por drenagem, pela ação da

gravidade. Com o secamento do solo, a energia de retenção da água pelo solo (ψ) aumenta. A curva de retenção de água no solo é representada pela Figura 1(a).

No momento em que a drenagem se torna negligível, θ nesse ponto é definida como *capacidade de campo* (CC). Com o secamento do solo aumenta a dificuldade das plantas retirarem água do solo. Quando $|\psi|=1,5$ MPa a planta, devido ao estresse hídrico, murcha permanentemente. A umidade do solo (θ) nesse ponto foi definida como *ponto de murcha permanente* (PMP). A amplitude de θ entre CC e PMP é considerada como *água disponível para as plantas* (AD). Esse conceito está apresentado na Figura 1 (b).

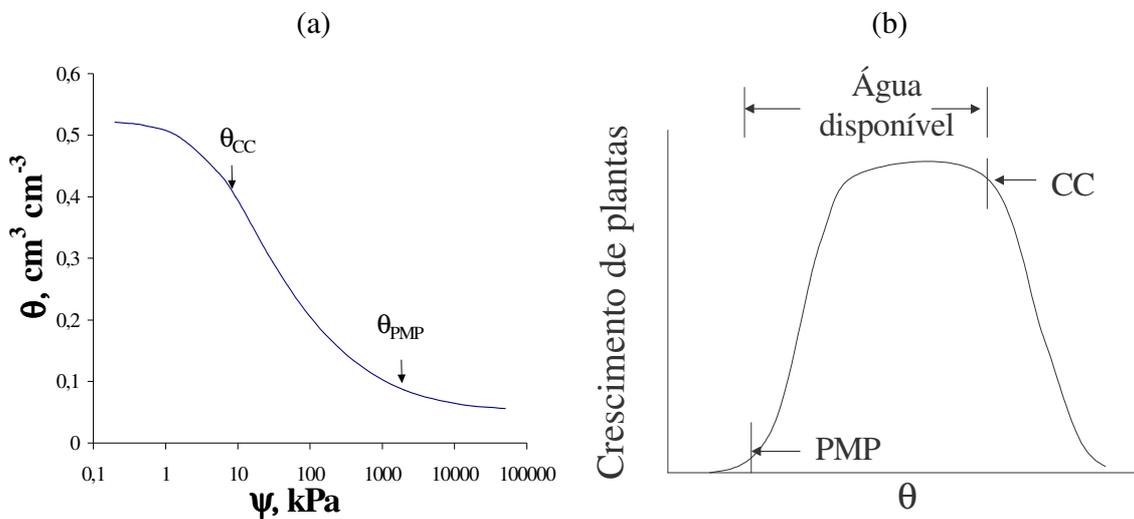


Figura 1. Curva de retenção de água no solo (a) e curva de crescimento de plantas em função da disponibilidade de água no solo (b).

O conceito de água disponível considera, apenas, θ (ψ) como fator físico do solo limitante para o crescimento de plantas. Entretanto, com valores de $|\psi|$ próximos de zero a taxa de difusão de oxigênio no solo pode ser baixa o suficiente para reduzir o crescimento radicular. Em solos com elevado grau de compactação a aeração do solo pode restringir o crescimento das plantas em valores de θ inferiores aquele correspondente a CC. Nessa situação, o secamento do solo é necessário para que o mesmo atinja um nível de aeração adequado.

Detalhes da relação entre o crescimento de plantas e a aeração do solo são apresentados em vários trabalhos, entre os quais destaca-se a revisão sobre o assunto apresentado por Cannell (1977). Condições físicas do solo favoráveis para o crescimento das plantas tem sido associadas com uma porosidade de aeração mínima (PA_L) de 10% (Figura 2 (a)). apresentou uma excelente revisão sobre os efeitos da aeração do solo no crescimento de plantas. A porosidade de aeração decresce linearmente com o aumento de θ (Figura 2 (b)).

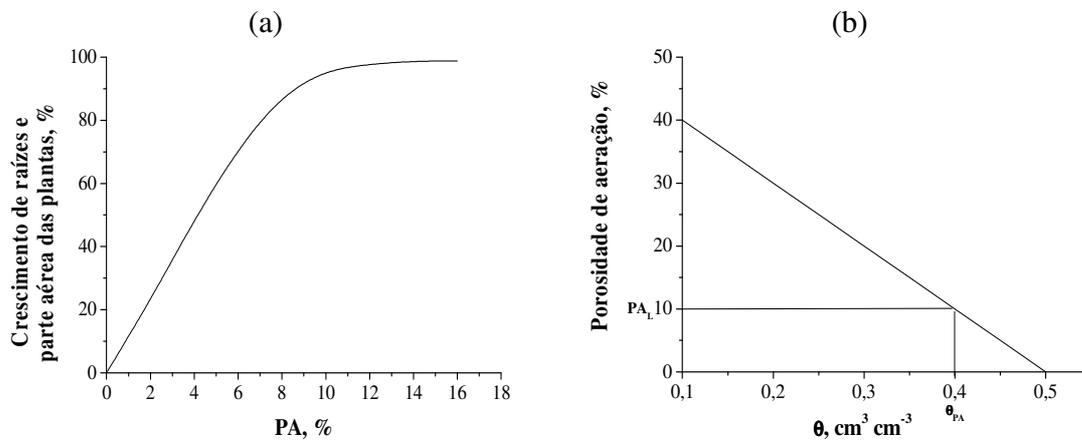


Figura 2. Relação entre porosidade de aeração (PA) e (a) crescimento de plantas e (b) umidade (θ).

Por outro lado, valores de resistência do solo à penetração (RP) restritivos ao crescimento das plantas (RP_L) podem ocorrer com θ superiores ao PMP. Um valor de 2,0 MPa tem sido associado com condições impeditivas para o crescimento das raízes e da parte aérea das plantas (Figura 3 (a)). Atwell (1993) faz uma excelente retrospectiva sobre a influência da resistência do solo à penetração no desenvolvimento de plantas. RP é inversamente proporcional a θ (Figura 3 (b)).

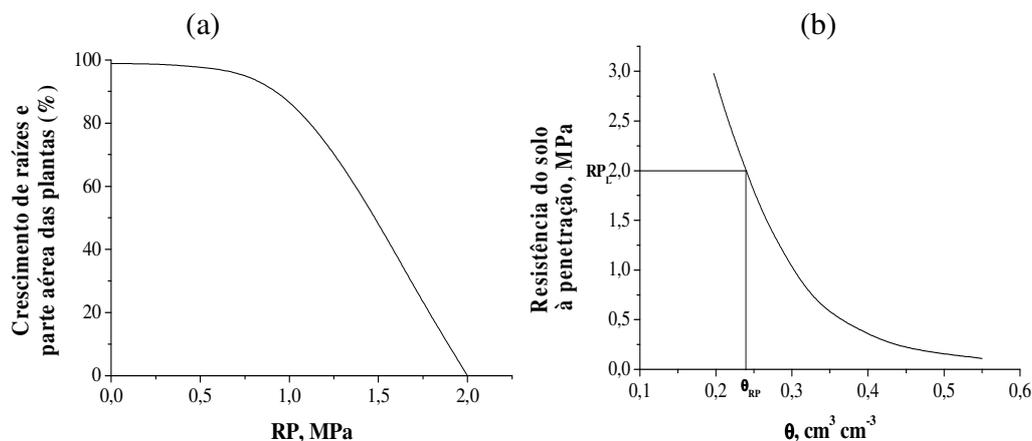


Figura 3. Relação entre resistência do solo à penetração (RP) e (a) crescimento de plantas e (b) umidade (θ).

Todos os fatores físicos do solo diretamente, relacionados ao crescimento das plantas (Ψ , PA e RP), são dependentes de θ e condicionados pela compactação do solo (Figura 4 (a) e (b)). O efeito de θ sobre PA e RP é intensificado pelo aumento da densidade do solo e/ou quantidade de poros de pequeno tamanho, processos que caracterizam o incremento do grau de compactação do solo.

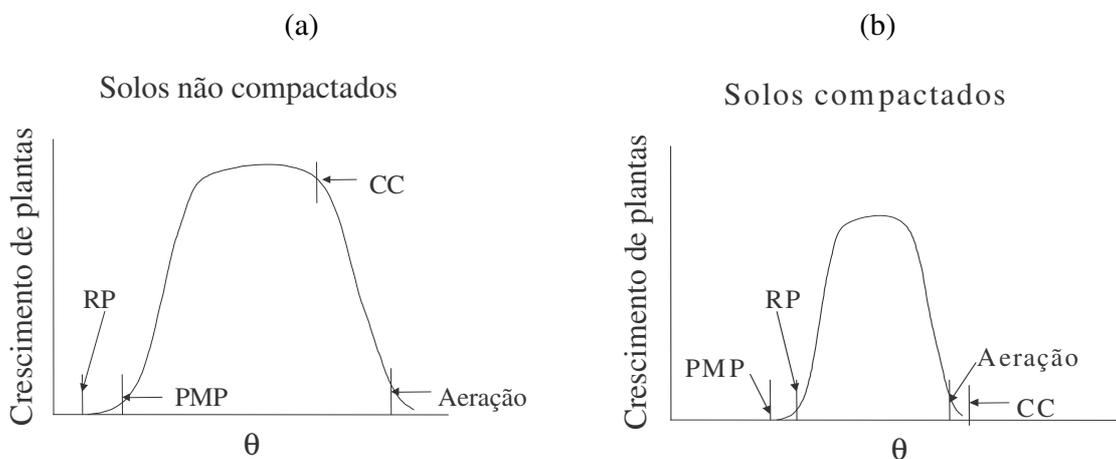


Figura 4. Influência da compactação na umidade do solo (θ) em que os fatores físicos do solo limitam o crescimento de plantas.

A compactação do solo determina a ordem em que esses fatores atuam como limitantes ao crescimento das plantas. Em solos com estrutura adequada, os fatores CC e PMP atuam como restritivos. Entretanto PA e RP, mais sensíveis à deterioração física do

solo do que a CC e o PMP, tornam-se limitantes quando a estrutura é degradada. A partir dessas relações de dependência é possível estabelecer uma faixa de θ na qual CC, PMP, PA e RP não restringem ao crescimento de plantas.

3. Intervalo Hídrico Ótimo

O conceito de um único parâmetro que descreve a amplitude de água do solo que incorpore limitações ao desenvolvimento de plantas relacionadas à aeração, resistência do solo à penetração e potencial matricial foi quantificado e identificado por Silva et al. (1994) como “*least limiting water range*” (LLWR). O termo Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) foi utilizado por Orellana et al. (1997) e Tormena et al. (1998) como expressão do termo LLWR em espanhol e português, respectivamente. A Figura 5 ilustra o conceito do IHO.

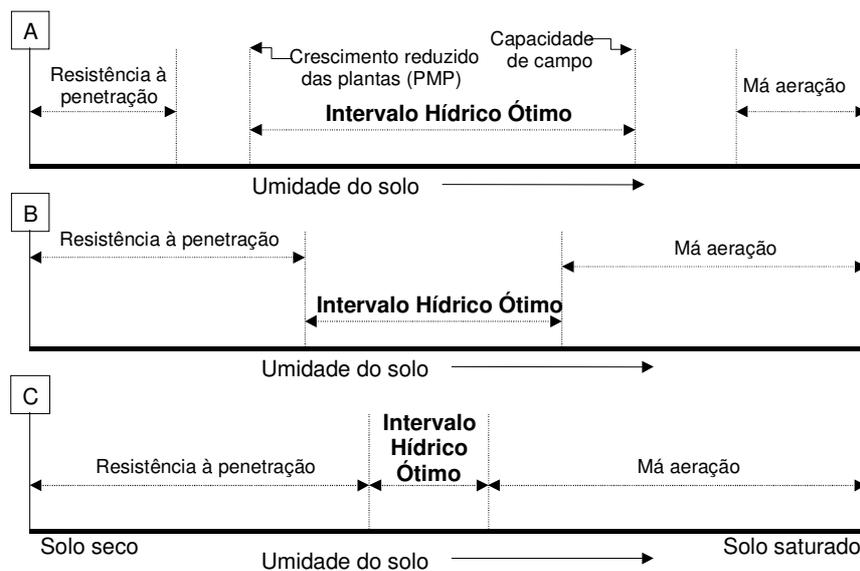


Figura 5. Relação entre a umidade do solo e os fatores físicos do solo que limitam o crescimento das plantas.

Em solos com estrutura adequada o IHO é igual a AD, sendo o limite superior do IHO igual a capacidade de campo e o inferior equivalente ao ponto de murcha permanente (Figura 5 A). Entretanto, o IHO é diminuído quando a aeração substitui a capacidade de campo como limite superior do IHO e a resistência do solo à penetração substitui o ponto

de murcha permanente como o limite inferior do IHO. A diminuição do IHO, de A para C na Figura 5, indica um processo de degradação da qualidade estrutural do solo para o crescimento das plantas, o que pode ser induzido pela compactação do solo.

A metodologia para a determinação do IHO requer a retirada de amostras com estrutura indeformada a partir de anéis volumétricos. A amostragem deve incorporar a variabilidade natural da estrutura do solo, quantificada pela densidade do solo (D_s). As amostras devem ser levadas ao laboratório onde são determinadas a curva de retenção da água no solo $\theta(\Psi)$ e a curva de resistência do solo à penetração $RP(\theta, D_s)$.

Os valores de θ na CC (θ_{CC}), PMP (θ_{PMP}), RP_L (θ_{RP}) e PA_L (θ_{PA}) são então calculados. θ_{CC} e θ_{PMP} são obtidos utilizando a curva de retenção de água. θ_{RP} é calculado a partir da curva de resistência do solo à penetração. θ_{PA} é estimado pela relação $[(1-D_s/D_p) - 0,1]$, onde D_p é a densidade de partículas ($g\ cm^{-3}$). Um gráfico é construído relacionando θ_{CC} , θ_{PMP} , θ_{RP} e θ_{PA} com a D_s . Para cada valor de D_s o IHO é então computado como a diferença entre o limite superior e o inferior. O limite superior é o menor valor de θ considerando θ_{CC} ou θ_{PA} . O limite inferior é o maior valor de θ considerando θ_{RP} ou θ_{PMP} .

Valores críticos para o crescimento de plantas associados com Ψ , resistência do solo à penetração e porosidade de aeração são selecionados a partir da literatura. Normalmente θ_{CC} é calculado para $\Psi = 0,01$ MPa (Haisse et al., 1955), θ_{PMP} para $\Psi = 1,5$ MPa (Richards e Weaver, 1944), θ_{RP} para um valor de resistência do solo à penetração igual a 2 MPa (Taylor et al., 1966) e θ_{PA} para uma porosidade de aeração igual a 10% (Grabler e Siemer, 1968). Outros valores podem ser utilizados sem alterar a aplicabilidade do conceito.

4. Aplicações do Intervalo Hídrico Ótimo na Avaliação da Qualidade Física do Solo.

4.1. Primeiras avaliações

A primeira quantificação do IHO foi feita por Silva et al. (1994) em dois solos com textura contrastante. Em ambos os solos, o IHO foi bastante sensível a variações da densidade do solo. As quatro umidades limitantes, isto é, a umidade do solo na capacidade de campo (θ_{CC}), a umidade do solo no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), a umidade do solo equivalente a resistência à penetração igual a 2 MPa (θ_{RP}) e a umidade do solo equivalente a porosidade de aeração igual a 10% (θ_{AR}) são mostradas na Figura 6 (a) e (b) para os solos estudados.

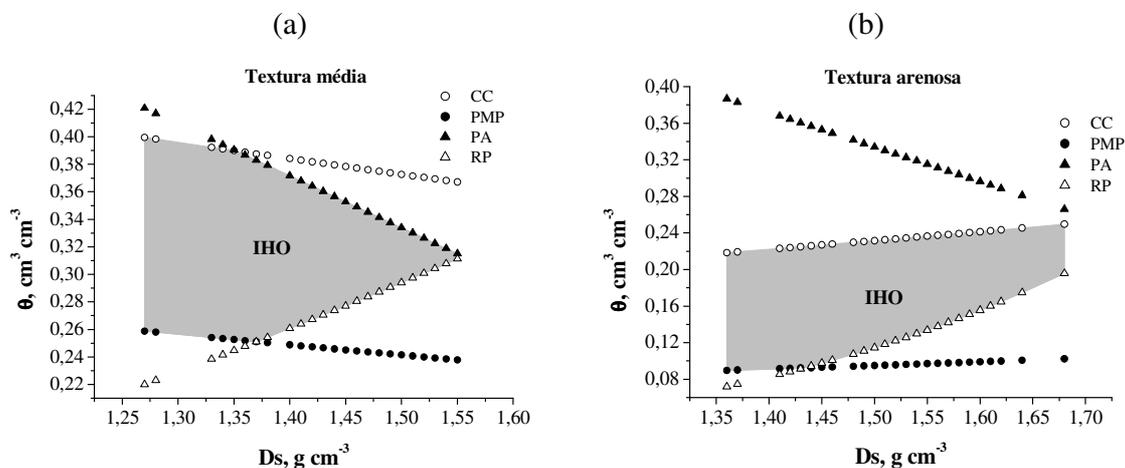


Figura 6. Variação do conteúdo de água (θ) com a densidade do solo (D_s) nos níveis críticos da capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), porosidade de aeração (PA) e resistência à penetração (RP) nos dois solos

estudados. (a) textura média (b) textura arenosa. A área hachurada representa o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO).

A variação da densidade do solo (D_s) teve um pequeno impacto na θ_{CC} e θ_{PMP} , bem como na água disponível ($\theta_{CC} - \theta_{PMP}$). A θ_{CC} e θ_{PMP} foram negativamente relacionadas com a D_s para o solo de textura média e positivamente relacionadas para o solo de textura arenosa. O aumento da D_s coincidiu com a diminuição da θ_{AR} para os dois solos (Figura 6 (a) e (b)). θ_{AR} substituiu θ_{CC} como fator limitante no solo com textura média quando a $D_s > 1,35 \text{ g cm}^{-3}$ (Figura 6 (a)). Por outro lado, a θ_{RP} substituiu a θ_{PMP} , como fator limitante, quando a $D_s > 1,37 \text{ g cm}^{-3}$. No solo com textura média o IHO foi definido por θ_{AR} e θ_{RP} na maioria dos valores de D_s medidos. As limitações convergiram na D_s de $1,56 \text{ g cm}^{-3}$ e o IHO foi considerado como sendo zero (Figura 6 (a)).

No solo com textura arenosa o IHO foi definido por θ_{CC} e θ_{PMP} quando a $D_s < 1,44 \text{ g cm}^{-3}$ (Figura 6 (b)). A densidades do solo maiores, a θ_{RP} substituiu a θ_{PMP} como limitação. A θ_{AR} não foi o fator limitante no solo com textura arenosa, uma vez que a θ_{CC} foi o limite superior do IHO no intervalo de densidades do solo observadas.

A incorporação da aeração do solo, da resistência do solo à penetração na definição do Intervalo Hídrico Ótimo para o crescimento de plantas resultou num parâmetro mais sensível a alterações da estrutura do solo do que água disponível. Para o solo de textura média o IHO variou de 0 a $0,1408 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ enquanto a água disponível variou de $0,1255$ a $0,1408 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. No solo arenoso a variação do IHO foi de $0,0537$ a $0,1326 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ enquanto que os valores de água disponível variaram de $0,1288$ a $0,1471 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$.

4.2. Avaliações em solos brasileiros

4.2.1. Caracterização num Latossolo Roxo sob Plantio Direto

No Brasil, o primeiro estudo do IHO foi conduzido por Tormena et al., (1998) num Latossolo Roxo, textura muito argilosa, na região de Guaíra, SP. A amostragem foi

realizada num talhão cultivado no sistema de plantio direto e irrigado por aspersão através de pivô-central. Foram retiradas amostras com estrutura indeformada da camada de 0-0,10 m de profundidade para as determinações físicas necessárias. Os pontos de amostragem foram localizados numa transeção transversal às linhas da cultura, seqüencialmente nas posições linha (L) e entrelinha (EL) da cultura.

A metodologia seguiu o procedimento descrito por Silva et al. (1994). A resistência do solo foi determinada em cada amostra após estabelecer-se um gradiente de umidade entre as amostras. Utilizou-se um penetrômetro desenvolvido no Laboratório de Física de Solos da ESALQ-USP. O penetrômetro é composto por um atuador linear elétrico com motor de passo, um painel para controle da velocidade e direção de deslocamento, uma base metálica para sustentação do conjunto mecânico e da amostra durante o teste e uma célula de carga com capacidade nominal de 20 kg acoplada na extremidade do braço mecânico do atuador. Uma haste metálica com diâmetro de 4 mm e com um cone na sua extremidade foi utilizada para determinar a resistência do solo à penetração. As medidas de resistência à penetração foram obtidas por meio de um sistema automatizado de aquisição de dados e armazenadas num arquivo de dados próprio do sistema. Uma ilustração do sistema utilizado é mostrada na Figura 7.

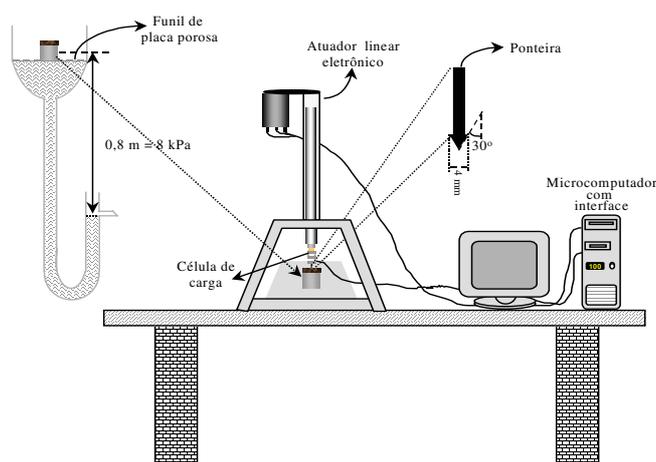


Figura 7. Descrição do equipamento utilizado para a determinação da resistência do solo à penetração das raízes.

O resultado é resumido na Figura 8, onde o IHO é mostrado em função da D_s . O IHO variou positivamente para valores de $D_s \leq 1,1 \text{ g cm}^{-3}$ e negativamente para valores de $D_s \geq 1,1 \text{ g cm}^{-3}$, com amplitude de variação de $0,0073 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} - 0,125 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Em 85% das amostras o limite inferior do IHO foi a umidade do solo na qual a resistência à penetração correspondente a 2,0 MPa. A capacidade de campo foi o limite superior em 97% das amostras. Com o aumento da compactação do solo ($\uparrow D_s$) a resistência à penetração determinou a redução no IHO. Concluiu-se que o IHO foi mais sensível às variações da estrutura do solo do que a água disponível, refletindo melhor a qualidade física do solo para o crescimento das culturas. A importância da RP na limitação do IHO corrobora com os resultados apresentados por Silva et al. (1994) em solos canadenses.

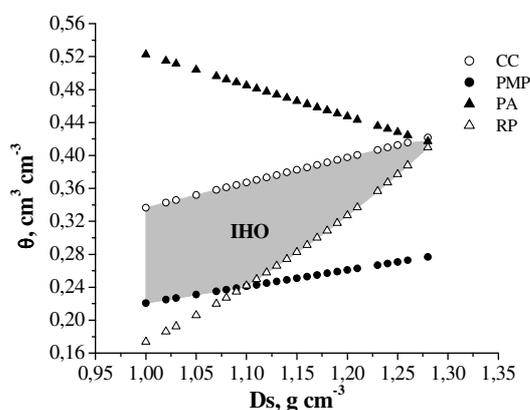


Figura 8. Variação do conteúdo de água (θ) com a densidade do solo (D_s) nos níveis críticos da capacidade de campo (CC), ponto de murcha (PMP), porosidade de aeração de 10% (PA) e resistência à penetração de 2,0 MPa (RP). A área hachurada representa o Intervalo Hídrico Ótimo do Solo (IHO).

4.2.2. Avaliação em Latossolos com variação de textura

A relação entre o IHO e D_s foi estudada em solos com variação de textura, cultivados com cana de açúcar. O trabalho foi desenvolvido em uma área pertencente a Usina Barra Grande, localizada no município de Lençóis Paulista-SP.

Na Figura 9 a variação do IHO com a D_s é mostrada para solos de textura média (26% de argila) e argilosa (47% de argila). O IHO variou com a textura do solo. Em ambos os solos o IHO foi negativamente relacionado com D_s . Em toda a amplitude de D_s o IHO foi maior no solo de textura média comparado ao solo de textura argilosa. Para a $D_s=1,64 \text{ g cm}^{-3}$ o solo de textura argilosa tem o $IHO=0$, enquanto que no solo de textura média, para a mesma D_s , o $IHO=0,095 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Apesar dos dois solos possuírem idêntico valor de D_s , os mesmos apresentam distintos níveis de compactação, o que fica claramente evidenciado pelos diferentes valores do IHO (IHO solo argiloso < IHO solo textura média). Para esse valor de D_s , o solo argiloso apresenta um grau de compactação maior quando comparado ao do solo de textura média. Isso demonstra que a D_s como um parâmetro isolado não deveria ser utilizada como indicador da qualidade física do solo para o crescimento de plantas.

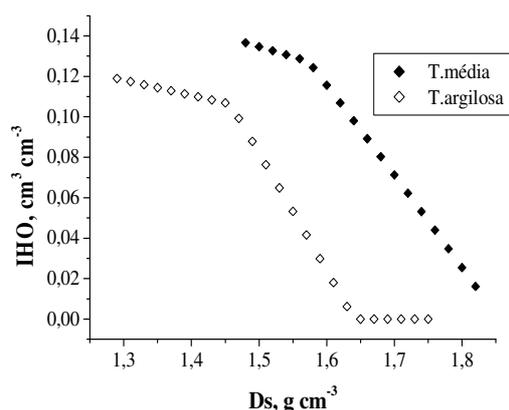


Figura 9. Variação do Intervalo Hídrico Ótimo com a densidade do solo, para um solo de textura média e um de textura argilosa.

4.2.3. O Intervalo Hídrico Ótimo como Indicador da Eficiência da Subsolagem

O IHO foi empregado como critério diagnóstico para avaliar a eficiência da subsolagem no alívio da compactação do solo em pomares de laranja. O trabalho foi conduzido em solos de textura média da Fazenda Cambuhy, localizada no município de Matão, SP. A amostragem foi conduzida em 2 pomares com plantas de 15 anos, sendo um subsolado (AS) e outro não subsolado (AC). Os quatro limites (CC, PMP, RP e PA) e o

IHO, para as Ds medidas em AC e AS, podem ser observados na Figura 10. PA não foi limitante em AC e AS devido a facilidade de drenagem do solo condicionada pela textura. Por outro lado, RP foi o fator limitante na maior faixa de Ds avaliada. Na AS as Ds e o IHO foram menores do que na AC. A redução da Ds, avaliada isoladamente, não indica a magnitude do efeito da subsolagem, em termos de melhoria da qualidade física do solo para o desenvolvimento das plantas. Essa quantificação só foi possível a partir da constatação de que a redução da Ds ampliou o IHO. As plantas responderam positivamente ao incremento do IHO advindo da subsolagem uma vez que a produtividade da laranja na área subsolada foi 1,5 caixa/planta maior do que na área não subsolada.

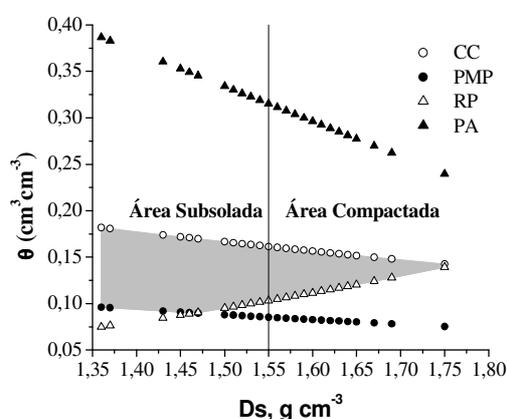


Figura 10. Variação da umidade do solo com a densidade do solo em valores críticos de capacidade de campo ($\Psi=0,01$ MPa), ponto de murcha permanente ($\Psi=1,5$ MPa), porosidade de aeração (10%) e resistência do solo à penetração (2,2 MPa).

4.2.4. Definição de Densidades Críticas do Solo pelo Intervalo Hídrico Ótimo

O estudo da relação entre o IHO e a Ds pode ser aprofundado considerando os valores de Ds nos quais há alterações dos limites do IHO. A partir da relação IHO versus Ds, duas densidades do solo relevantes para o manejo físico do solo podem ser identificadas, a saber: (i) a Ds na qual o limite superior do IHO cruza o limite inferior, isto

é, $IHO=0$ ($D_{S_{IHO=0}}$) e, (ii) a D_s a partir da qual o $IHO < AD$ ($D_{S_{IHO < AD}}$), devido a limitações associadas a resistência do solo à penetração e/ou aeração.

Seguindo a indicação de Silva & Kay (1997) e Hakansson & Lipiec (2000), $D_{S_{IHO=0}}$ pode ser definida como a densidade crítica de um determinado solo; ou seja, aquela em que ocorrem limitações severas ao desenvolvimento de plantas associadas à qualidade física do solo.

O valor de D_s em que a umidade (θ) para o IHO se torna diferente de θ para a AD, sendo a $\theta_{IHO} < \theta_{AD}$ ($D_{S_{\theta_{IHO}}} < D_{S_{\theta_{AD}}}$), pode ser identificada como a densidade máxima aceitável para que as plantas se desenvolvam sem problemas de restrição física do solo. $D_s > D_{S_{\theta_{IHO} < \theta_{AD}}}$ indicam problemas associados a resistência do solo à penetração e/ou aeração.

Valores de $D_{S_{IHO=0}}$ e $D_{S_{\theta_{IHO} < \theta_{AD}}}$ poderiam ser utilizadas no monitoramento da qualidade física do solo, uma vez que dados de D_s podem ser obtidos rotineiramente e com baixo custo. O procedimento (i) foi utilizado para avaliar o grau de compactação de áreas sob pastagem. O estudo foi conduzido numa Terra Roxa Estruturada da área experimental do Departamento de Zootecnia da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, no município de Piracicaba, São Paulo. Foram escolhidos dois sistemas distintos de manejo de pastagem: sistema rotacionado e sistema extensivo.

No sistema rotacionado a pastagem foi estabelecida no ano 1963/64 com capim elefante (*Pennisetum purpureum* Shum). A lotação da pastagem consiste em 15-18 unidades animais por hectare (UA/ha) durante o verão e 2,5-3 UA/ha durante o inverno. A relação pastejo/pousio é de 1/45 dias. No sistema extensivo a pastagem, estabelecida em 1985, é formada por capim colônia (*Panicum maximum*). O pastejo é efetuado com uma lotação de 1,5-2 UA/ha, sem um período definido de repouso.

Em cada sistema de pastagem foi estabelecida uma malha retangular com 60 pontos espaçados de 3,4 m x 5 m. A área de cada malha correspondeu a 765 m². Em cada ponto da malha de amostragem foi coletada uma amostra com estrutura indeformada a partir de anéis volumétricos na camada superficial 0-10 cm. O IHO e a $D_{S_{IHO=0}}$ foram determinados (Figura 11), sendo a $D_{S_{IHO=0}} = 1,4 \text{ g cm}^{-3}$.

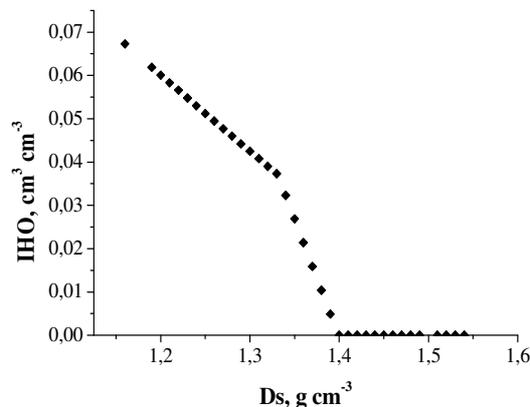


Figura 11. Variação do Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) com a densidade do solo (D_s).

A distribuição espacial da densidade do solo foi quantificada e a representação tridimensional dessa distribuição, para os dois sistemas de manejo, é mostrada nas Figuras 12 (a) e (b).

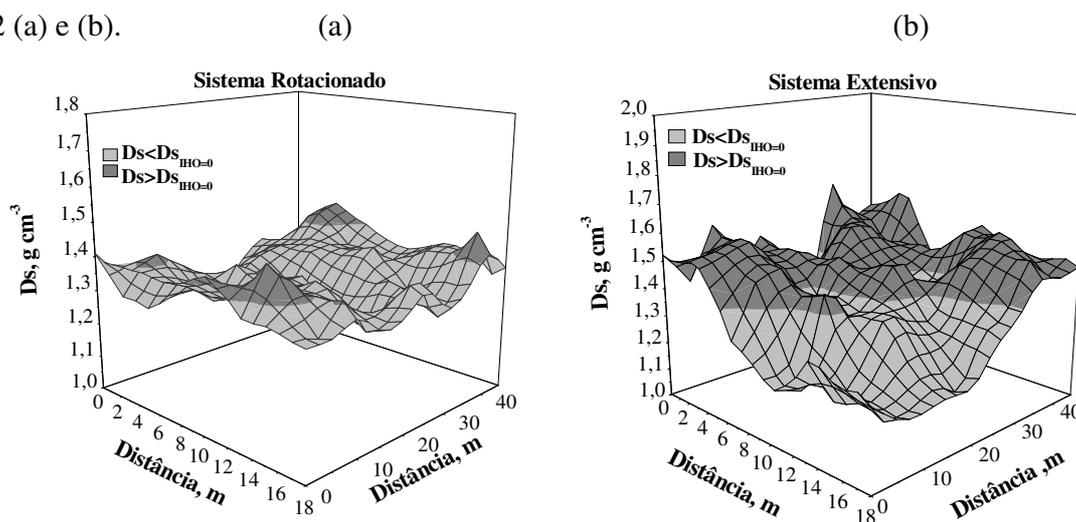


Figura 12. Representação tridimensional dos valores de densidade do solo (D_s), no sistema de pastejo rotacionado (a) e de pastejo extensivo(b).

No sistema pastejo extensivo a densidade do solo foi maior do que $D_{s_{IHO=0}}$ em um 67% da área. Entretanto, no sistema pastejo rotacionado somente 7% da área apresentou valores de D_s maiores do que $D_{s_{IHO=0}}$.

Esse comportamento da D_s nos dois sistemas está associado com as condições de pastejo. A melhor qualidade física do solo sob pastejo rotacionado, em comparação ao pastejo extensivo, pode ser resultante do menor tempo de permanência dos animais na área,

reduzindo as chances de pisoteio excessivo. Por outro lado, o período de descanso (45 dias) possibilita a intensa renovação e crescimento do sistema radicular. Decorrente da atividade do sistema radicular, eficiente na recuperação da qualidade estrutural do solo, os efeitos da compactação na degradação da estrutura podem ser atenuados.

A densidade crítica do solo, estimada a partir do IHO, é uma ferramenta útil no controle da qualidade física do solo para o crescimento das culturas em qualquer sistema produtivo, já que permite quantificar a percentagem da área total que apresenta condições severas de compactação, restritivas ao crescimento das plantas.

5. Considerações finais

A primeira quantificação do IHO foi realizada em 1994. Desde então o volume de pesquisas sobre o assunto tem crescido consideravelmente. Grupos de pesquisa na África do Sul, Argentina, Austrália, Brasil, Canadá, Estados Unidos, Holanda e Nova Zelândia vem desenvolvendo trabalhos com o IHO. No entanto, há um consenso generalizado sobre a necessidade de ampliar as pesquisas nessa área de conhecimento e desenvolver modelos e funções de pedotransferência que possibilitem prever as taxas de mudança das características estruturais induzidas pelos diferentes sistemas de cultivos e sob diferentes condições de clima e solos. A nível operacional empresas da área florestal, no Brasil, vem utilizando o IHO para quantificar a compactação do solo e orientar as práticas de manejo do solo.

Pesquisas tem demonstrado que o IHO é um parâmetro que pode ser utilizado com segurança, devido a sua sensibilidade, na quantificação das alterações que ocorrem na condição estrutural dos solos quando os mesmos são submetidos a algum tipo de estresse e, também, na determinação de outros parâmetros físicos, como a densidade crítica do solo e as pressões críticas. Essas características demonstram o elevado potencial do IHO para avaliar a qualidade física de solos, sob diferentes manejos e condições ambientais.

Referências Bibliográficas

- ATWELL, B. Response of roots to mechanical impedance. *Environmental and Experimental Botany*, 33 (1): 27-40, 1993.
- CANNELL, R.Q. Soil aeration and compaction. **Appl. Biol**, v.2, p.1-86, 1977.
- DEXTER, A.R. Advances in characterization of soil structure. **Soil Tillage Res.**, 11:199-238, 1988.
- DIAS JUNIOR, M.S. & PIERCE, F.J. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. **Soil Technol.**, 8:139-151, 1995.
- GRABLE, A.R.; SIEMER, E.G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v.32, p.180-186, 1968.
- HADAS, A. Soil tilth - the desired soil structural state obtained through proper soil fragmentation and reorientation processes. **Soil Tillage Res.**, v.43, p.7-40, 1997.
- HAISE, H.R.; HAAS, H.J.; JENSEN, L.R. Soil moisture studies of some great plains soils. II. Field capacity as related to 1/3-atmosphere percentage, and "minimum point" as related to 15- and 26- atmosphere percentage. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, v.34, p.20-25, 1955.
- HAKANSSON, I. & LIPIEC, J. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. **Soil Tillage Res.**, v.53, p.71-85, 2000.
- HAMBLIN, A.P. The influence of soil structure on water movement, crop root growth and water uptake. **Adv. Agronomy**, v.38, p.95-158, 1985.
- KAY, B.D. Rates of changes of soil structure under different cropping systems. **Adv. Soil Sci.**, v.12, p.1-51, 1990.
- KOPI, A.J.; DOUGLAS, J.T. A rapid inexpensive and quantitative procedure for assessing soil structure with respect to cropping. **Soil Use Manag.**, v.7, p.52-56, 1991.
- LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Adv. Soil Sci.**, v.1, p.277-294, 1985.
- LOW, A.J. Soil structure and crop yield. **J. Soil Sci.**, v.24, p.249-259, 1973.

- ORELLANA, J.A. de; PILATTI, M.A.; GRENÓN, D.A. Soil quality: an approach to physical state assessment. **J. Sustainable Agric.**, v.9, n.2, p.91-108, 1997.
- RICHARDS, L.A.; WEAVER, L.R. Fifteen atmosphere percentage as related to the permanent wilting point. **Soil Sci.**, v.56, p.331-339, 1944.
- RUSSEL, M.B. **Soil Physical Conditions and Plant Growth**. Academic Press, 491p. 1952.
- 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, 1997.
- SILVA, A.P.; KAY, B.D. & PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 58:1775-1781, 1994.
- TAYLOR, H.M.; ROBERSON, G.M.; PARKER JR, J.J. Soil strength-root penetration relations to medium to coarse-textured soil materials. **Soil Sci.**, v.102, n.1, p.18-22, 1966.
- TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. & LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Rev. Bras. Ci. Solo**, 22:573-581, 1998.