



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**APLICAÇÃO DO INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO NO
MONITORAMENTO DA QUALIDADE FÍSICA DE UM
LATOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRICO TÍPICO**

Laura Fernanda Simões da Silva

CAMPINAS
FEVEREIRO 2007



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

APLICAÇÃO DO INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO NO MONITORAMENTO DA QUALIDADE FÍSICA DE UM LATOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRRICO TÍPICO

Dissertação de Mestrado submetida à banca examinadora para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, na área de concentração: Água e Solo.

Laura Fernanda Simões da Silva

Orientadora: Dra. Mara de Andrade M. Weill

Co- orientador: Dr. Álvaro Pires da Silva

CAMPINAS
FEVEREIRO 2007

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

Si38a Silva, Laura Fernanda Simões da
Aplicação do intervalo hídrico ótimo no monitoramento da qualidade física de um latossolo vermelho distroférico típico / Laura Fernanda Simões da Silva. --Campinas, SP: [s.n.], 2007.

Orientador: Mara de Andrade Marinho Weill, Álvaro Pires da Silva

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Física do solo. 2. Plantio direto. 3. Milho. 4. Feijão. 5. Feijão irrigado. I. Weill, Mara de Andrade Marinho. II. Silva, Álvaro Pires da. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. IV. Título.

Título em Inglês: The least limiting water range applied to the monitoring of the physical quality of a rhodic hapludox

Palavras-chave em Inglês: LLWR, Soil mapping unit Barão Geraldo, Direct-drilling system, Conventional system, Maize, Bean

Área de concentração: Água e Solo

Titulação: Mestre em Engenharia Agrícola

Banca examinadora: Cássio Antônio Tormena e Edson Eiji Matsura

Data da defesa: 15/02/2007

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Agrícola

“... quando ando de meu consultório à estação de trem, com a idéia de chegar lá tão rápido quanto possível, não sinto mais que uma urgência para chegar o trem. Em nome da eficiência, transformo-me numa máquina até que o objetivo seja alcançado. As máquinas não tem sentimentos ou sensações, nem sensação de serem, mas podem fazer coisas. Por outro lado, é possível fazer ou produzir algo com sensação, com sentimentos. Para ter sentimento, o processo ou ação deve ser, pelo menos, tão importante quanto o objetivo. No caso de andar até a estação devagar e despreocupadamente, por ter tempo de sobra para isso, sinto o prazer da caminhada e aprecio observar as pessoas e olhar vitrines. Quando nos motivamos para produzir ou realizar coisas, tornamo-nos como máquinas e nosso ser fica reduzido. Contudo, se prestarmos pelo menos tanta atenção ao processo quanto ao objetivo, o fazer torna-se uma ação criativa ou auto-expressiva, aumentando a sensação do ser. No que diz respeito a ser, o que vale não é o que a pessoa faz, mas como o faz. O inverso vale para o fazer ”

(Lowen, Medo da vida: caminhos da realização pessoal pela vitória sobre o medo. Summus editorial, São Paulo, 1986,254p.).

DEDICO

Aos meus pais

Maria Adelaide Simões da Silva

Raimundo Nonato da Silva

Que apesar de todos obstáculos que a vida lhes proporcionou, nunca perderam as esperanças e continuaram lutando por uma vida melhor, e foram fontes de sabedoria, entusiasmo, carinho, confiança e formadores do meu caráter.

OFEREÇO

Às minhas irmãs

Amanda C. Simões da Silva

Bárbara C. Simões da Silva

Que nestes anos me apoiaram e acreditaram nesta conquista.

Agradecimento Especial

A Deus pela vida e por ter me dado força e disposição para enfrentar todas as barreiras ao longo da minha vida.

A Prof. Dra. Mara de Andrade M. Weill pela confiança e amizade depositada em minha pessoa, além da orientação, ensinamentos, paciência, dedicação e incentivo durante todos estes anos.

AGRADECIMENTOS

À vida, pois, através de sua grandiosa sabedoria e simples complexidade permitiu-me evoluir através de experiências, algumas vezes dolorosas, outras interessantes e até aquelas engraçadas.

Aos meus pais, Maria Adelaide Simões da Silva e Raimundo Nonato da Silva, que, durante toda minha vida, sempre estiveram disponíveis para ajudar quando fosse ou não preciso. Não posso deixar de mencionar, neste momento tão importante da minha vida, que eu os amo muito e que daria minha vida, se assim pudesse, como forma de demonstração desse imenso amor e carinho que sinto.

À minhas queridas irmãs, Amanda e Bárbara (minhas melhores amigas) uma mescla de alegria desordenada e sensibilidade com o que passei meus melhores momentos (infância, adolescência, graduação, pós-graduação, festas.....afinal considero que tenho amigas para sempre).

Ao Francisco Javier Blanco Bellón. É muito pouco um agradecimento para dizer-lhe o quanto ele é fundamental nessa minha jornada de vida. Atenção, carinho, amor, dedicação, paixão, simplicidade, humildade são atributos que o tornam uma pessoa brilhante, magnífica e digna de muita homenagem.

Aos meus orientadores e amigos, Prof. Dra. Mara de Andrade M. Weill e Dr.Álvaro Pires da Silva (ESALQ/Solos), pela confiança depositada e orientação, não somente na minha vida profissional, mas também pessoal.

Aos amigos da pós-graduação da FEAGRI/UNICAMP: Aline, Tânia, Douglas, Anderson, Evandro, Welligton, Eder, Roger, Sebastião, Vânia e Renata. Em especial agradeço ao Márcio, pois, de todas as pessoas que já conheci, sempre se mostrou fiel, dedicado e principalmente honesto. Desejo ao Márcio toda a felicidade que uma pessoa pode querer na vida. Te adoro!

Aos meus amigos de pós-graduação da ESALQ/ USP : Ceres, Brivaldo, Alex, Márcia, Fernando, Sérgio, Afrânio e Karina. Um agradecimento especial vai para o casal: Brivaldo e Ceres. Durante os estudos, foi possível conhecê-los e sem dúvida são pessoas maravilhosas e meigas, mostrando-

se enormemente capazes de vencer qualquer obstáculo que surja em suas vidas. A esses meus amigos, não vale apenas meus agradecimentos, mas principalmente meus parabéns.

A Raquel Capistrano Moreira pela hospedagem durante as disciplinas do curso de pós-graduação da ESALQ/USP.

As moradoras da república: Mariane, Teresita, Juliana, Queila, Pâmela e Paula pela amizade e apoio que recebi durante todos esses meses.

Não posso deixar de agradecer a algumas pessoas que conheci durante o trabalho de campo, que, com sua enorme simplicidade e carinho, me fizeram ficar apaixonada por elas: “Freire” e “Pequeno”.

Aos funcionários do Laboratório de Solos da FEAGRI/UNICAMP (Célia, Júnior e Lucarelli) pela colaboração e acompanhamento do referido trabalho e também pela atenção e carinho dispensados;

A todos os pesquisadores e funcionários da Faculdade de Engenharia Agrícola/FEAGRI pelos conhecimentos técnicos e de vida transmitidos;

À Pós-graduação da FEAGRI/UNICAMP, pela oportunidade de cursar o mestrado.

A Capes, pela bolsa de mestrado concedida para desenvolvimento do presente trabalho.

Enfim, a todos aqueles que direta ou indiretamente, colaboraram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xiii
RESUMO	xiv
SUMMARY	xvi
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1. Qualidade física do solo	4
2.2. Atributos físicos do solo que afetam o crescimento de plantas.....	7
2.3. Avaliação da qualidade física do solo	11
2.3.1. Indicadores de qualidade física do solo.....	14
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	20
3.1. Localização e descrição da área de estudo	20
3.2. Determinação do Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) para o Latossolo Vermelho Distroférico típico da região de Campinas-SP.....	27
3.2.1. Amostragem	27
3.2.2. Obtenção da curva de resistência do solo à penetração e da curva de retenção de água no solo	28
3.3. Monitoramento da qualidade e desempenho do solo utilizando o IHO como indicador	34
3.4. Análises Estatísticas dos dados.....	35
3.4.1. Densidade do solo.....	35
3.4.2. Produção da cultura e seus componentes	35
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
4.1. Intervalo Hídrico Ótimo (IHO).....	36
4.2. Avaliação do efeito do sistema plantio direto (SPD) e do sistema convencional (SC) na qualidade estrutural do Latossolo Vermelho Distroférico típico utilizando como indicador o IHO.....	45
4.2.1. Caracterização da densidade do solo nas safras 2003/04, 2004/05 e 2005/06.	45
4.2.2. Produção e atributos biométricos da cultura do milho em três safras agrícolas e sua relação com a qualidade estrutural do solo.....	55

4.3. Avaliação e quantificação da variação de umidade do solo sob sistema plantio direto (SPD) e sob sistema convencional (SC), irrigado e não irrigado de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico típico utilizando o IHO.	61
4.3.1. Caracterização da densidade do solo na safra 2005/06 na cultura de inverno (feijão)..	61
5. CONCLUSÕES	68
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
ANEXOS/ APÊNDICES	81

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Localização da área experimental da Faculdade de Engenharia Agrícola – Unicamp, com detalhe de vista aérea das parcelas experimentais, destacando-se os seguintes sistemas: Plantio direto (SPD) e Convencional (SC). T1-T4 replicações do SPD; T5-T8 replicações do SC. 21
- Figura 2. Precipitação pluvial mensal no Campo Experimental da FEAGRI no período entre 2003 e 2006 (Dados do CEPAGRI). 22
- Figura 3. Esquema de amostragem utilizado nos talhões coletores na cultura de verão (milho): (a) Safra 2003/2004; (b) Safras 2004/2005 e 2005/2006. 25
- Figura 4. Esquema de amostragem utilizado nas parcelas experimentais na cultura de inverno (feijão), safras 2004/05 e 2005/06. 26
- Figura 5. (a) ilustração do equipamento, (b) detalhe da sonda utilizada para realização dos testes de resistência do solo à penetração; (c) distribuição dos pontos de determinação em um anel; (d) ilustração do sistema de aquisição de dados. 29
- Figura 6. Variação do teor de água (θ) em função da densidade do solo (Ds) nos limites críticos de capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), porosidade de aeração de 10% (PA) e resistência do solo à penetração de 2,0 MPa (RP). A área hachurada representa o Intervalo Hídrico Ótimo do solo (IHO) do solo para a profundidade 0,0-0,2 m. 41
- Figura 7. Variação do teor de água (θ) em função da densidade do solo (Ds) nos limites críticos de capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), porosidade de aeração de 10% (PA) e resistência do solo à penetração de 2,0 MPa (RP). A área hachurada representa o Intervalo Hídrico Ótimo do solo (IHO) do solo para a profundidade 0,20-0,40 m. 41
- Figura 8. Representação gráfica dos valores de densidade do solo no sistema plantio direto (SPD) ao longo de três anos agrícolas na profundidade de 0-0,20 m. A área hachurada corresponde ao intervalo Hídrico Ótimo (IHO) e as colunas correspondem ao valor mínimo e máximo da densidade do solo obtidos em cada safra: (a) safra 2003/04; (b) safra 2004/05; (c) safra 2005/06. 50
- Figura 9. Representação gráfica dos valores de densidade do solo no sistema convencional (SC) ao longo de três anos agrícolas na profundidade de 0-0,20 m. A área hachurada corresponde ao intervalo Hídrico Ótimo (IHO) e as colunas correspondem ao valor mínimo e máximo da

densidade do solo obtidos em cada safra: (a) safra 2003/04; (b) safra 2004/05; (c) safra 2005/06.	51
Figura 10. Representação gráfica dos valores de densidade do solo no sistema plantio direto (SPD) ao longo de três anos agrícolas na profundidade de 0,20-0,40 m. A área hachurada corresponde ao intervalo Hídrico Ótimo (IHO) e as colunas correspondem ao valor mínimo e máximo da densidade do solo obtidos em cada safra: (a) safra 2003/04; (b) safra 2004/05; (c) safra 2005/06.	52
Figura 11. Representação gráfica dos valores de densidade do solo no sistema convencional (SC) ao longo de três anos agrícolas na profundidade de 0,20-0,40 m. A área hachurada corresponde ao intervalo Hídrico Ótimo (IHO) e as colunas correspondem ao valor mínimo e máximo da densidade do solo obtidos em cada safra: (a) safra 2003/04; (b) safra 2004/05; (c) safra 2005/06.	53
Figura 12. Percentagem de amostras com D_s acima da densidade crítica ($D_{sc} = 1,31 \text{ kg dm}^{-3}$) na profundidade de 0,20-0,40 m, para cada sistema de preparo em três safras agrícolas. SPD= sistema plantio direto; SC= sistema convencional.	54
Figura 13. Representação gráfica dos valores de densidade do solo no sistema plantio direto não irrigado (SPDNI) ao longo de três anos agrícolas na profundidade de 0-0,20 m. A área hachurada representa a faixa de variação da densidade do solo e as colunas correspondem à distribuição dos valores de densidade do solo.	63
Figura 14. Representação gráfica dos valores de densidade do solo no sistema plantio direto não irrigado (SPDNI) ao longo de três anos agrícolas na profundidade de 0-0,20 m. A área hachurada representa a faixa de variação da densidade do solo e as colunas correspondem à distribuição dos valores de densidade do solo.	64
Figura 15. Variação temporal do teor de água no solo ($\theta \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) para cada um dos tratamentos analisados: sistema plantio direto não irrigado (SPDNI); sistema plantio direto irrigado (SPDI); sistema convencional não irrigado (SCNI) e sistema convencional irrigado (SCI).	65
Figura 16. Rendimento da cultura do feijoeiro obtido nos tratamentos em estudo na safra agrícola 2005/06. Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade ($p < 0,05$).	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Atributos do solo e métodos de avaliação sugeridos para avaliar a qualidade física do solo.	13
Tabela 2. Análise descritiva dos atributos físicos do solo utilizados nos ajustes dos modelos, nas duas camadas amostradas.	36
Tabela 3. Coeficientes do ajuste dos dados de resistência à penetração nas duas profundidades estudadas através do modelo proposto por BUSSCHER (1990).	38
Tabela 4. Coeficientes do ajuste não linear das curvas de retenção de água no solo em duas profundidades segundo o modelo proposto por Ross et al. (1991).	39
Tabela 5. Estatística descritiva da densidade do solo em dois sistemas de manejo, sistema plantio direto (SPD) e sistema convencional (SC) nas duas profundidades (0,00-0,20; 0,20-0,40 m). Campinas-(SP).	46
Tabela 6. Estatística descritiva da produtividade da cultura do milho (Mg ha ⁻¹) nas três safras agrícolas sob dois sistemas de preparo. Campinas-(SP).	56
Tabela 7. Estatística descritiva dos atributos biométricos da cultura do milho nas três safras agrícolas sob dois sistemas de preparo. Campinas-(SP).	60
Tabela 8. Estatística descritiva para os dados de densidade do solo (kg dm ⁻³) sob SPD e SC, com (I) e sem (NI) irrigação na profundidade de 0,00-0,20 m.	61

RESUMO

O manejo agrícola, visando a produção de culturas, afeta a qualidade física do solo. O monitoramento da qualidade estrutural do solo pode ser realizado empregando atributos físicos selecionados e tomando por base um indicador de qualidade. O intervalo hídrico ótimo (IHO) é um indicador que integra os atributos físicos do solo que influenciam diretamente sua qualidade física, em especial no que concerne ao crescimento das culturas. Neste trabalho, foi desenvolvida uma aplicação do conceito do IHO, como uma ferramenta de planejamento do uso agrícola, de maneira a permitir comparações entre sistemas agrícolas. O objetivo geral do trabalho foi o de quantificar o IHO para o Latossolo Vermelho Distroférrico típico da região de Campinas-SP (Unidade de Mapeamento Barão Geraldo), aplicando-o na avaliação de diferentes sistemas de manejo agrícola. A pesquisa foi conduzida no Campo Experimental da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP, em Campinas (SP), em parcelas experimentais cultivadas com milho e feijão sob Sistema Plantio Direto (SPD) e Sistema Convencional com Grade aradora (SC). Para determinação do IHO do solo, a curva de retenção de água (CRA), a curva de resistência do solo à penetração (RP) e a densidade do solo (Ds) foram determinadas para duas camadas, 0-0,20 m e 0,20-0,40 m. O monitoramento da qualidade física do solo foi efetuado com base em dados de densidade do solo, produtividade da cultura e indicadores biométricos do milho de três safras agrícolas consecutivas (2003/04; 2004/05; 2005/06). Na safra 2004/2005, também foram consideradas a densidade do solo, a umidade volumétrica e a produtividade da cultura de feijão, irrigado e não irrigado. Os resultados evidenciam que na camada 0,0-0,20 m, a umidade na capacidade de campo (θ_{CC}) determinou o limite superior do IHO e a umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) o limite inferior até a Ds de $1,2 \text{ kg dm}^{-3}$, quando então a umidade onde a resistência do solo à penetração atinge 2 Mpa (θ_{RP}) é que passou a definir o limite inferior. Na camada 0,20-0,40 m, o limite inferior do IHO foi determinado pela θ_{RP} em toda faixa de variação da Ds, sendo que a umidade a partir da qual a porosidade de aeração é inferior a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (θ_{PA}) e a θ_{PMP} não limitaram o valor do IHO. Os resultados indicam pior qualidade estrutural do solo em subsuperfície (0,20-0,40m). O monitoramento da cultura do milho indicou melhoria da qualidade física do solo sob SPD, a partir do segundo ano agrícola em relação ao solo sob SC, nas duas camadas estudadas. Os indicadores biométricos da cultura permitiram diferenciar os tratamentos desde o primeiro ano do ensaio, mostrando-se mais sensíveis às variações da qualidade física do solo. Para o feijoeiro o período em que o solo permaneceu fora das condições ideais de umidade

estabelecidas pelo IHO foi suficiente para afetar diferencialmente a produtividade da cultura nos tratamentos não irrigados, com vantagem para o SPD. Conclui-se que o IHO, determinado para uma dada classe taxonômica de solo, constitui-se um indicador aplicável na avaliação da qualidade estrutural desse solo quando submetido a diferentes sistemas de manejo. O IHO pode ser utilizado no monitoramento da qualidade física do solo em sistemas agrícolas auxiliando na definição da necessidade de intervenção. A determinação do IHO para duas camadas permitiu maior compreensão dos efeitos do manejo agrícola na qualidade física do solo e na produtividade dos sistemas.

Palavras chave: IHO, unidade de mapeamento Barão Geraldo, sistema plantio direto; sistema convencional; milho; feijão.

SUMMARY

Agricultural management intended for field crop production affects physical soil quality. The monitoring of soil structural quality can be achieved using selected physical attributes and a quality indicator. The least limiting water range (LLWR) is an indicator that connects the physical soil attributes, which have influence on its physical quality especially for crop growth. In this work, it was developed an application of the LLWR concept as a tool for agricultural use planning, in order to making comparisons between agricultural systems. The central goal was to quantify the LLWR of the Red Latosol (*Typic Hapludult*) (Barão Geraldo Soil Mapping Unit) and to apply it on evaluation of different agricultural management systems. The research was conducted at the Experimental Station of the Agricultural Engineering College of UNICAMP in Campinas (SP), in experimental plots cultivated with maize under direct-drilling system (DDS) and conventional system with heavy harrow (CS) systems. For the LLWR determination, the soil water retention curve (WRC), the soil strength curve (SSC), and bulk density (Dd), were determined in two layers, 0-0,2m and 0,2-0,4m. The monitoring of soil physical quality was made using: bulk density data, maize productivities, and biometric indicators of maize from three consecutive production cycles (2003/04; 2004/05; 2005/06). The production cycle 2004/05, they were also considered the bulk density data, volumetric soil water content and bean productivity data, with and without irrigation.

At the layer 0,0-0,2m, the results show that soil water content at field capacity (θ_{CC}) and soil water content at the wilting point (θ_{PMP}) have determined respectively the superior and inferior limits of LLWR until the $D_s=1,2 \text{ kg m}^{-3}$, when soil water content at which the penetration resistance is 2 MPa (θ_{RP}) has determined the inferior limit of LLWR. At the layer 0,2-0,4m, the inferior limit of LLWR was defined by the θ_{RP} along the entire range of variation of bulk density, the water content when air-filled porosity 10% (θ_{PA}) and θ_{PMP} didn't reduce the LLWR. The results indicate that soil structural quality is worse at deeper layer (0,2-0,4m). The monitoring of crop maize shows improvement of soil physical quality under DDS, since the second production cycle in comparison with the CS in both layers. The biometric indicators of maize made possible the distinction between treatments since the first cycle of production; this suggests that they are more susceptible to the variations of physical soil quality than the productivity. The results

acquired from the monitoring of winter crop (bean) indicate that the time, which the soil remained outside of the ideal conditions of humidity of the LLWR, was sufficient to affect adversely the productivity in the no-irrigated treatments, with advantage for the DDS. In conclusion, the LLWR determined for a given soil taxonomic class is an indicator to structural quality evaluation of the soil under distinct management systems. And, the LLWR can be used in the monitoring of soil physical quality to define the need for intervention. The LLWR determination for two soil layers provided more comprehension about the effects of agricultural management on soil physical quality and systems productivities

Keys word: LLWR, soil mapping unit Barão Geraldo; direct-drilliny system; conventional system; maize; bean.

1. INTRODUÇÃO

O solo é um recurso natural finito, sendo que alguns de seus componentes requerem períodos de tempo muito prolongados para serem renovados. Esses períodos excedem várias vezes o tempo de vida do ser humano, razão pela qual a manutenção da qualidade do solo, sobretudo estrutural, tem-se tornado um tema de interesse geral nos estudos que visam o desenvolvimento de critérios ou indicadores de sustentabilidade em agricultura.

O termo qualidade do solo foi definido de várias formas por diversos autores, porém em todas as definições os autores ressaltam a importância da qualidade física do solo para a manutenção da produtividade e da qualidade ambiental em longo prazo.

Sabe-se que a qualidade dos solos agrícolas pode ser afetada pelo sistema de manejo, sendo a magnitude das alterações dependente do tempo de uso do solo e das condições edafoclimáticas. Do ponto de vista técnico, o sistema de manejo agrícola deve contribuir para manutenção ou melhoria da qualidade do solo, bem como para obtenção de adequadas produtividades das culturas em longo prazo, com segurança alimentar e sem degradação ambiental.

Em estudos de qualidade do solo, buscam-se indicadores que descrevam as interações entre os atributos biológicos, químicos e físicos do solo e o desempenho de funções, entre elas o crescimento das culturas. Entre todos os indicadores, os relacionados à qualidade física dos solos possuem especial importância visto que esta, quando deteriorada, é de difícil recuperação. Há consenso entre os pesquisadores de que um indicador adequado de qualidade do solo deve integrar os principais fatores de crescimento das plantas, ser de fácil medição ou estimativa e permitir a comparação de diferentes solos, regiões ou sistemas de cultivo, facilitando a identificação, avaliação e monitoramento das práticas de manejo do solo.

Diversos atributos são utilizados como indicadores de qualidade física dos solos, sendo que dentre esses atributos os mais frequentemente avaliados são a densidade do solo, a resistência do solo à penetração, a estabilidade de agregados, a distribuição de poros e a curva de retenção de água. LETEY (1985) propôs o conceito do “Non Limiting Water Range” (NLWR), ou “Intervalo Hídrico não Limitante”, como indicador da qualidade estrutural do solo para produtividade das culturas. Posteriormente, esse conceito foi aprimorado por SILVA et al. (1994), que o denominaram “Least Limiting Water Range” (LLWR), ou “Intervalo Hídrico de Menor Limitação”. No Brasil, o LLWR foi quantificado por

TORMENA et al. (1998), que traduziram o termo para Intervalo Hídrico Ótimo (IHO). O IHO é definido como sendo o volume de água retido no solo que configura mínima limitação ao desenvolvimento das raízes de plantas quanto à disponibilidade de água, de ar e de resistência do solo à penetração.

O IHO tem se mostrado uma ferramenta útil para avaliar a qualidade estrutural do solo e o impacto das práticas de manejo sobre a produtividade do sistema agrícola. No entanto, o IHO vem sendo determinado para combinações específicas de uso e manejo do solo da maneira como vem sendo utilizado, isto é caracterizando um IHO para cada combinação de uso e manejo do solo o que não permite a comparação objetiva entre diferentes sistemas de manejo, por se tratarem de intervalos também distintos.

Em vista de disso, identificou-se a necessidade de desenvolver uma aplicação do IHO, como uma ferramenta de planejamento do uso agrícola, de maneira a permitir o monitoramento da qualidade do solo e comparações do desempenho entre sistemas agrícolas.

Assim, a partir das informações da literatura levantaram-se as seguintes hipóteses de trabalho que nortearam o presente estudo:

(i) O IHO quando determinado para uma dada classe taxonômica de solo se constitui um indicador referencial aplicável na avaliação da qualidade estrutural desse solo quando submetido a diferentes sistemas de manejo.

(ii) O IHO viabiliza o monitoramento da qualidade física do solo e da produtividade de áreas agrícolas contribuindo para a tomada de decisões acerca do manejo.

Neste contexto, tendo em vista as considerações precedentes, o objetivo geral do trabalho foi o de quantificar o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) para o LATOSSOLO VERMELHO Distroférrico típico da região de Campinas-SP (Unidade Barão Geraldo), aplicando-o na avaliação de sistemas de manejo agrícola.

Os objetivos específicos foram:

- (i) Quantificar o IHO para duas camadas do LATOSSOLO VERMELHO Distroférico típico da região de Campinas-SP.
- (ii) Avaliar o efeito do sistema plantio direto (SPD) e do sistema convencional (preparo com grade aradora em nível) (SC) na qualidade estrutural do LATOSSOLO VERMELHO Distroférico Típico acima referido utilizando a metodologia do IHO.
- (iii) Analisar qualitativamente parâmetros de desenvolvimento das culturas e de produtividade biológica com a qualidade estrutural do solo caracterizada pelo IHO.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Qualidade física do solo

O entendimento atual do conceito de qualidade do solo compreende o equilíbrio entre os condicionantes geológicos, hidrológicos, químicos, físicos e biológicos do solo (BRUGGEN e SEMENOV, 2000; SPOSITO e ZABEL, 2003). Esse termo, muitas vezes utilizado como sinônimo de saúde do solo, refere-se à capacidade do solo sustentar a produtividade dentro das fronteiras do ecossistema, mantendo o equilíbrio ambiental e promovendo a saúde de plantas e animais e do próprio ser humano (DORAN e PARKIN, 1994; SPOSITO e ZABEL, 2003).

Embora tenha havido algum debate relativo à definição de conceitos e quantificação de qualidade de solo (DORAN et al., 1994; KARLEN et al., 1997; SINGER e SOJKA, 2001), a maioria dos cientistas do solo considera a qualidade de solo como algo crítico para o ser humano e para a sustentabilidade ambiental (WEBB et al., 2000; SOUTHORN e CATTLE, 2000).

Sabe-se que a qualidade física do solo se manifesta em vários de seus aspectos, sendo que manifestações de empobrecimento da qualidade física incluem a perda da capacidade de infiltração de água com conseqüente aumento do escoamento superficial, a perda da capacidade de aeração, a baixa permeabilidade às raízes, a maior susceptibilidade a erosão entres outros (WILLIAMS e KALMBACHER, 1996; IMHOFF et al., 2000).

Segundo LETEY (1985) um solo de textura média, apresentando níveis intermediários de densidade, boa agregação, taxa de infiltração adequada e sem impedimento à drenagem seria um solo com boas condições físicas, a partir do qual altas produtividades poderiam ser esperadas caso não haja limitações químicas.

Porém, a introdução de sistemas agrícolas em substituição a vegetação natural causa desequilíbrio ao ecossistema, modificando os atributos do solo, cuja intensidade varia com a natureza do solo e as condições de clima, uso e manejo adotados (GODEFROY e JACQUIN, 1975). Com o uso intensivo dos solos, geralmente ocorre a deterioração das suas propriedades físicas (COOTE e RAMSEY, 1983). Modificações na densidade e na porosidade do solo

podem variar consideravelmente, dependendo da textura, dos teores de matéria orgânica do solo (CURTIS e POST, 1964) e da frequência de cultivo (HAJABBASI et al., 1997).

Segundo VIEIRA e MUZILLI (1995), os efeitos diferenciados sobre os atributos físicos devidos ao tipo de preparo de solo adotado em cada sistema de manejo são dependentes da intensidade de revolvimento, do trânsito de máquinas, do tipo de equipamento utilizado, do manejo dos resíduos vegetais e das condições de umidade do solo no momento do preparo. O manejo incorreto de máquinas e equipamentos agrícolas leva à formação de camadas subsuperficiais compactadas. Esse manejo tem sido apontado por CAMPOS et al. (1995), como sendo uma das principais causas de degradação da estrutura do solo e da redução da produtividade dos sistemas agrícolas.

Os diferentes sistemas de manejo do solo alteram as propriedades físicas e mecânicas do solo, podendo causar compactação (SILVA et al., 2000; SECCO, 2003). Assim, os diferentes sistemas de manejo podem gerar diferentes níveis de compactação em função da classe de solo e da época de realização das operações mecanizadas.

A compactação do solo é um processo em que a porosidade e a permeabilidade são reduzidas, a resistência à penetração é aumentada e muitas mudanças ocorrem na estrutura do solo (SOANE e OUWERKERK, 1994).

Em sistemas convencionais a compactação ocasionada pela mobilização intensiva acarreta conseqüências negativas na qualidade física do solo para o crescimento das plantas (TORMENA et al., 1998b), em virtude das modificações deletérias na disponibilidade de água do solo às plantas, na capacidade de difusão gasosa do solo e na resistência do solo à penetração das raízes (STONE et al., 2002; SECCO et al., 2004). Segundo CARPENEDO e MIELNICZUK (1990), os preparos convencionais rompem os agregados na camada preparada e aceleram a decomposição da matéria orgânica, refletindo-se negativamente na resistência dos agregados do solo. Esses sistemas de preparo aumentam o volume de macroporos dentro da camada preparada (BERTOL et al., 2000), favorecendo a permeabilidade, o armazenamento de ar e o crescimento das raízes das plantas nessa camada (BRAUNACK e DEXTER, 1989), em relação à semeadura direta e ao campo nativo. No entanto, abaixo da camada preparada, contrariamente ao que ocorre na semeadura direta e no campo nativo, esses atributos apresentam comportamento oposto ao da superfície (BERTOL et al., 2000). Além disso, os aspectos positivos dos preparos convencionais são perdidos, quando o solo

descoberto pelo efeito do preparo é submetido ao impacto das gotas de chuva, que o desagregam superficialmente, o que diminui a taxa de infiltração de água (BERTOL et al., 2001) e aumentam o escoamento superficial e a erosão hídrica (BERTOL et al., 1997), em relação ao sistema conservacionista.

Segundo NEGI et al. (1980) e HAKANSSON e VOORHEES (1991), a compactação do solo leva ao aumento da densidade do solo, ao aumento da resistência do solo à penetração radicular, à redução da aeração, à alteração do fluxo de calor, além de afetar diversos atributos do solo como a condutividade hidráulica, a permeabilidade do solo, a infiltração da água e outros atributos ligados à porosidade. MEROTTO JR. e MUNDSTOCK (1999) relatam que com a compactação, ocorrem reduções significativas, principalmente no volume de macroporos, enquanto os microporos permanecem praticamente inalterados. SILVA e KAY (1997) salientaram que a microporosidade do solo é fortemente influenciada pela textura e pelo teor de carbono orgânico e muito pouco influenciada pelo aumento da densidade do solo decorrente do tráfego de máquinas e implementos, etc.

Segundo COSTA et al.(2003) o sistema de preparo convencional degradou as propriedades relacionadas com a forma e com a estabilidade da estrutura do solo em relação a mata nativa, indicada pelo aumento da densidade do solo e da resistência do solo à penetração e pela diminuição da estabilidade de agregados. Estes resultados estão de acordo com os obtidos por ISLAM e WEIL (2000), que constataram um valor médio da densidade do solo significativamente maior em área cultivada comparada com solo sob floresta natural. Também SILVA e RIBEIRO (1992) obtiveram resultados similares, comparando solo cultivado com cana e sob mata nativa. SANCHES et al. (1999) constataram que, independentemente da posição da amostragem, seja linha ou entrelinha da cultura da laranja, a densidade do solo foi maior do que no solo sob mata nativa.

Os sistemas conservacionistas, tal como a semeadura direta, com menor revolvimento do solo, mantém, parcial ou totalmente, os resíduos vegetais na superfície e aportam continuamente matéria orgânica ao solo, a qual é responsável pela manutenção e melhoria de suas propriedades físicas (LAL e GREENLAND, 1979; CASTRO FILHO et al., 1998). Na maioria dos sistemas de semeadura direta, a ausência quase que completa de preparo por longo tempo reduz o volume de macroporos e eleva a densidade do solo (BERTOL et al., 2001) e a

estabilidade dos agregados na superfície (COSTA et al., 2003), refletindo-se em boa qualidade do solo em relação ao preparo convencional e ao campo nativo (D'ANDRÉA et al., 2002).

2.2. Atributos físicos do solo que afetam o crescimento de plantas

O crescimento e a produtividade das culturas são fortemente influenciados pelas condições físicas do solo. Esta relação é complexa devido às interações entre os diferentes atributos físicos, combinados aos efeitos do clima e à resposta diferencial das espécies vegetais.

Segundo LETEY (1985), os atributos físicos do solo que influenciam o crescimento de plantas podem ser subdivididos em dois grupos:- aqueles diretamente relacionados com o desenvolvimento de plantas, os quais determinam o fornecimento de água, de oxigênio, a temperatura e a resistência do solo à penetração; e aqueles indiretamente relacionados com o desenvolvimento de plantas, tais como: granulometria, densidade, agregação e porosidade do solo. Os atributos de influência direta são determinantes dos processos fisiológicos ligados com o crescimento radicular, com o crescimento foliar e a fotossíntese; já os efeitos dos atributos com influência indireta na produtividade das culturas decorrem de suas influências sobre a retenção de água, a aeração, a temperatura e a resistência do solo à penetração das raízes.

Vários trabalhos demonstram que há uma interdependência entre esses atributos. Por exemplo, uma variação na umidade do solo influencia a taxa de difusão de oxigênio no solo, a resistência do solo à penetração, a tensão e a disponibilidade de água no solo às plantas, entre outras propriedades. Neste sentido, a resistência do solo à penetração varia inversamente com a umidade e positivamente com a densidade do solo (TORMENA et al., 1998; IMHOFF et al., 2001).

Segundo LETEY (1985) e HAMBLIN (1985), os solos agrícolas funcionam como um sistema complexo que retém e transmite água, ar, nutrientes e calor às sementes e plantas, de maneira que é fundamental um ambiente físico favorável ao crescimento radicular, para maximizar a produção das culturas. Nesse contexto, os sistemas de preparo do solo devem oferecer condições favoráveis ao crescimento e desenvolvimento das culturas. No entanto, dependendo do solo, do clima, da cultura e de seu manejo, eles podem promover a degradação da qualidade física do solo, com restrições ao crescimento da planta (KLUTE, 1982).

Os sistemas de preparo do solo promovem modificações nos atributos físicos como a agregação do solo (CASTRO FILHO et al., 1998), a densidade e a porosidade do solo (DE MARIA et al., 1999). De acordo com DIAS JR. e PIERCE, (1996) a macroporosidade é drasticamente reduzida com a compactação do solo. Segundo PALMEIRA et al., (1999), a estrutura do solo é alvo do manejo físico do solo, e embora esses autores não considerem influência sobre a disponibilidade de água e ar para as raízes das plantas e, no suprimento e desenvolvimento do sistema radicular.

Segundo LETEY (1985), no que se refere à disponibilidade de O₂ no ambiente radicular, o fator predominante não é a sua quantidade volumétrica e sim a taxa de difusão de oxigênio (TDO), ou seja, a capacidade do solo em permitir uma difusão adequada deste gás da atmosfera até as raízes. O mesmo autor propõe uma TDO de 0,20 ug cm⁻² como o valor mínimo requerido para um crescimento radicular adequado. No entanto, a difusão de oxigênio no solo depende da porosidade de aeração (P_A), que por sua vez é dependente do conteúdo de água no solo. Para fins práticos, considera-se o valor de P_A= 0,1 m³ m⁻³ como sendo o mínimo para que a TDO seja adequada para o satisfatório desenvolvimento dos vegetais. Vários trabalhos demonstraram que a macroporosidade é uma medida diretamente relacionada com a difusão de oxigênio no solo para as raízes e que esta determina a capacidade de aeração do solo (GRABLE e SIEMER, 1968).

Valores de porosidade de aeração abaixo de 0,1 m³ m⁻³ são, geralmente, adotados como restritivos para o crescimento e produtividade da maioria das culturas, apesar da dependência da espécie de planta e da atividade biológica do solo. O valor de 0,1 m³ m⁻³ de (P_A) foi assinalado nos trabalhos de MEREDITH e PATRICK JR. (1961); DEXTER (1988); XU et al. (1992); como sendo o limite crítico inferior, a partir do qual as raízes começam a reduzir seu crescimento. Valores adequados de capacidade de aeração são dependentes das condições climáticas e sob condições mais úmidas os valores críticos de porosidade de aeração devem ser ampliados (THOMASSON, 1978).

ERICKSON (1982), em revisão detalhada a respeito do assunto, citou vários autores e concluiu que, para a maioria das culturas, o valor mínimo de espaço poroso livre de água deve ser ao redor de 0,10 m³ m⁻³. No entanto, esses valores são apenas uma referência, pois a taxa de difusão gasosa no solo depende da profundidade e densidade do sistema radicular, temperatura do solo, tortuosidade do espaço poroso, dentre outros (VAN LIER, 2001).

A temperatura do solo é um outro fator importante no crescimento e desenvolvimento vegetal (LETEY,1985). A temperatura do solo afeta a germinação das sementes, o desenvolvimento das raízes e da planta ,a atividade dos microorganismos, a difusão de solutos e de gases, as reações químicas, e uma série de outros processos relevantes que ocorrem no ambiente do solo. Existem diversas publicações que abordam o efeito da temperatura sobre os processos que ocorrem nos solos e plantas, dentre os quais citam-se os de BRADY e WEIL (1999).

Apesar de existirem evidências dos efeitos da temperatura sobre o crescimento vegetal, principalmente em regiões temperadas com invernos rigorosos, em regiões tropicais a temperatura do solo raramente é um fator limitante ao desenvolvimento das culturas (SANCHEZ, 1976).

Além da aeração e temperatura do solo, o crescimento, morfologia e profundidade atingida pelo sistema radicular num dado perfil são também diretamente afetados pela resistência mecânica do solo à penetração, ou simplesmente, resistência à penetração (RP) (LETEY, 1985).

A resistência do solo à penetração é uma das propriedades físicas do solo diretamente relacionadas com o crescimento das plantas (LETEY, 1985) sendo modificada pelos sistemas de preparo do solo e pelo conteúdo de água no solo. Esta propriedade geralmente aumenta com a compactação do solo (incremento da densidade) e com a redução da umidade do solo, sendo restritiva ao crescimento das plantas, em função da redução do crescimento do sistema radicular (BENGHOUGH e MULLINS, 1990).

Diversos autores relataram que em solos compactados, o desenvolvimento das plantas é menor (MEROTTO e MUNDSTOCK, 1999; GUIMARÃES et al., 2002), atribuindo o fato ao impedimento mecânico condicionado pelo solo, que determina menor crescimento radicular, que resulta em menor volume de solo explorado, menor absorção de água e nutrientes e, conseqüentemente, menor produção das culturas. A compactação do solo pode causar redução de até 60% do crescimento radicular de algumas espécies mais sensíveis (BENGOUGH e MULLINS, 1991).

O crescimento das raízes pode causar a deformação do solo numa zona próxima à ponta das raízes e a pressão exercida contra as partículas e/ou agregados deve ser suficiente para propiciar a penetração e o alongamento das raízes (BENNIE, 1996). Valores excessivos

de resistência do solo à penetração podem influenciar o crescimento das raízes em comprimento e diâmetro (MEROTTO e MUNDSTOCK, 1999) e na direção preferencial do crescimento radicular (IIJIMA e KONO, 1991). Além disso, estudos recentes indicam que a resistência do solo à penetração das raízes tem efeitos diretos no crescimento da parte aérea das plantas (MASLE e PASSIOURA, 1987) e na partição de carboidratos entre a raiz e parte aérea (MASLE e FARQUHAR, 1988).

TAYLOR e GARALNER (1963) observaram que o aumento da resistência do solo reduziu a penetração de raízes de algodão para valores próximos a zero. VEEN e BOONE (1990) relataram que as raízes de milho cessaram o crescimento quando a resistência à penetração alcançou 4,7 MPa ou quando o potencial matricial da água foi inferior a -1,7 MPa. Em Latossolo Argiloso, CINTRA e MIELNICZZUK (1983) e ALVARENGA et al. (1996) observaram restrição ao crescimento das raízes quando a resistência à penetração foi de 1,08 e 1,47 MPa, respectivamente. Para o Latossolo Vermelho Distroférico típico (70% de argila), localizado no município de Coronel Barros, RS a amplitude relatada dos valores de RP varou de 0,305 MPa a 9,48 MPa. Já para a Ds, a amplitude relatada variou entre 1,08 Mg m⁻³ e 1,58 Mg m⁻³ (SILVA, 2003).

Os valores críticos experimentais e citados na literatura de resistência mecânica à penetração nos quais ocorre impedimento mecânico ao desenvolvimento do sistema radicular são divergentes e variam com o tipo de solo, equipamento utilizado na avaliação, com o sistema de manejo do solo (EHLERS et al., 1983) e com a espécie vegetal em estudo (MATERECHERA et al., 1991). Genericamente, são apresentados valores que vão de 1,5 a 4,0 MPa (TOPP et al., 1994; TORMENA et al., 1998; IMHOFF et al., 2000; TAVARES FILHO et al., 2001). Muitos pesquisadores, contudo, utilizam o valor de 2 MPa como limite crítico, conforme SILVA et al. (1994); TARDIEU (1994); TORMENA et al. (1998).

O conteúdo de água no solo, ou mais precisamente o potencial em que a água está retida no solo, exerce um efeito ainda mais crítico sobre o crescimento vegetal. Segundo LETEY (1985), a água atua como uma “variável de equilíbrio”, amenizando ou agravando os efeitos da temperatura, da aeração e da resistência do solo à penetração.

Segundo JENSEN et al. (1998), o potencial da água no solo está mais diretamente ligado ao crescimento das plantas do que o conteúdo de água disponível. ACEVEDO et al.

(1971) verificaram que o crescimento de folhas de milho foi drasticamente reduzido, em função de pequenas modificações no potencial da água no solo.

No entanto, como o conteúdo de água no solo é dependente da textura e da estrutura do solo, limitações ao crescimento das plantas por reduzida aeração ou elevada resistência à penetração podem ocorrer dentro da faixa de água disponível (AD) (TOPP et al., 1994). Segundo BORGES et al. (1999), o incremento da compactação acarreta o aumento da umidade do solo e a redução da porosidade de aeração (PA), que podem alterar o suprimento de oxigênio para as plantas. Por sua vez, o aumento da compactação do solo aumenta a resistência do solo à penetração (RP), acarretando situações em que, mesmo havendo água disponível às plantas, o sistema radicular cessa o crescimento, afetando o desenvolvimento das plantas e sua produção.

2.3. Avaliação da qualidade física do solo

DORAN e PARKIN (1994) citam que a relação entre o manejo e a qualidade do solo pode ser avaliada pelo comportamento das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. Para a avaliação da qualidade física de um solo, tem sido postulada a necessidade de identificação de parâmetros indicativos do seu estado de conservação e/ou degradação.

Segundo SEYBOLD et al.(1999) o efeito do manejo sobre os atributos físicos do solo é dependente da sua textura e mineralogia as quais influencia a resistência e a resiliência do solo a determinada prática agrícola. Dentre os atributos físicos do solo, a estrutura é uma característica sensível ao manejo e pode ser analisada segundo parâmetros relacionados à sua forma e/ou à sua estabilidade (CAMPOS et al., 1995).

LAL (1999) cita alguns importantes indicadores físicos de qualidade do solo e os respectivos métodos de avaliação (Tabela 1). O autor salienta também que a maioria dos atributos físicos do solo devem ser medidos *in situ*, ou em amostras indeformadas, devido à alta variabilidade espacial e às alterações decorrentes, conforme o processo de obtenção das amostras.

De modo geral, com o aumento da intensidade de cultivo tem sido observada alteração no tamanho dos agregados do solo (ALEGRE et al., 1991), aumento da densidade do solo (DE MARIA et al., 1999), redução da porosidade total (MEROTTO e MUNDSTOCK, 1999;

STONE et al.,2002), aumento da resistência do solo à penetração (BEUTLER et al., 2002; COSTA et al., 2003;) e redução da infiltração.

Tabela 1. Atributos do solo e métodos de avaliação sugeridos para avaliar a qualidade física do solo.

Indicador/ atributo	Método	Referência
Textura	Método da pipeta ou método do hidrômetro, com correção para cascalho;	GEE e BAUDER, 1986 LAL, 1979a
Cultivo	Índices e processos de cultivo;	SINGH et al., 1992 KARLEN et al., 1990
Estrutura do solo	1. Porcentagem de agregados estáveis em água > 1 mm e diâmetro geométrico médio;	KEMPER e ROSENAU, 1986
	2. Densidade do solo usando amostras indeformadas;	EDWARDS e BREMNER, 1967
	3. Permeabilidade ao ar;	BLAKE e HARTGE, 1986 MANRIQUE e
	4. Condutância da crosta;	JONES, 1991
	5. Índices estruturais;	COREY, 1986 FALAYI e BOUMA, 1975 HANKS e THORP, 1956 LAL, 1991
Capacidade de água disponível	1. Capacidade de campo <i>in situ</i> ; 2. Ponto de murcha permanente;	KLUTE, 1986 BRUCE e LUXMOOR, 1986 KLUTE, 1986
Profundidade de enraizamento	Método dos torrões de solo indeformados;	BOHM, 1979
Transmissão de água	1. Condutividade hidráulica saturada em amostras não deformadas;	KLUTE e DIRKSEN, 1986
	2. Taxa de infiltração (método dos anéis);	KLUTE, 1986 BAVER et al., 1972
Resistência do solo	Resistência à penetração em teor de umidade conhecido;	BLAKE e HARTGE, 1986 BRADFORD, 1986

Fonte: LAL, 1999.

2.3.1. Indicadores de qualidade física do solo

A palavra indicador deriva do latim *indicare*, verbo que significa apontar ou proclamar. Em português, indicador significa aquilo que indica, torna patente, revela, propõe, sugere, expõe, menciona, aconselha (FERREIRA,1988).

Um indicador, segundo ABBOT e GUIJT (1999), é algo que auxilia a transmitir um conjunto de informações sobre processos, eventos ou tendências. Para MITCHELL (1997), um indicador é uma ferramenta que permite a obtenção de informações sobre uma dada realidade, podendo sintetizar um conjunto complexo de informações e servir como um instrumento de previsão.

Para BRENBROOK e GROTH III (1996) os indicadores permitem apenas constatar uma dada situação. Já BEAUDOUX et al. (1993) afirmam que os indicadores servem para medir e comparar, sendo ferramentas que auxiliam na tomada de decisões.

Aplicado a solos, segundo LAL (1999), os indicadores relacionados a processos e/ou propriedades permitem estimar a qualidade de um dado solo.

No presente trabalho, o termo indicador é usado para designar um atributo simples ou complexo do solo, utilizado para caracterizar, monitorar e comparar a qualidade do solo sob diferentes sistemas agrícolas. Neste contexto, o uso de indicadores deve permitir interpretar quanto à condição presente do solo, bem como, tecer previsões acerca de sua condição futura, pelo estabelecimento de cenários.

De acordo com ISLAM e WEIL (2000), os indicadores se distinguem em efêmeros, intermediário e permanentes. Os indicadores efêmeros se relacionam com alterações no solo de curto prazo, sendo modificados pelas práticas de manejo. Exemplos de indicadores efêmeros incluem a umidade do solo, a densidade do solo, o pH, e a disponibilidade de nutrientes, dentre outros. A profundidade, a granulometria, a presença de contato lítico, a mineralogia são exemplos de indicadores permanentes. Segundo os autores, os indicadores intermediários são os de maior importância na avaliação da qualidade do solo. Nesta categoria se destacam o estado de agregação do solo, a atividade microbiana, o carbono orgânico ativo e o total.

Conforme WALKER et al., 1996 e OAKLEY, 1991, ambos citados por LAL (1999), e DORAN e PARKIN (1994), independentemente de sua categoria, os indicadores devem ser

vistos como ferramentas de informação, podendo ser qualquer variável ou componente do ecossistema. O indicador ideal deve ser preciso e exato em descrever uma função particular, e servir para assinalar mudanças desejáveis ou indesejáveis que tenham ocorrido ou que possam ocorrer no futuro em um dado sistema.

De acordo com LAL (1999), a avaliação das limitações e do potencial do solo para diferentes usos se baseia no conhecimento dos níveis críticos de indicadores do solo e de seus respectivos padrões de controle de qualidade, definindo um nível ou condição além do qual a produção declina rapidamente.

Segundo o mesmo autor, os níveis críticos de indicadores do solo devem ser definidos em termos de retornos quantificáveis de bens e serviços, a exemplo da produção e da capacidade de regulação ambiental. Já os padrões de controle de qualidade são dados acurados e confiáveis, devendo ser comparados com padrões de referência estabelecidos para técnicas de campo e de laboratório. Porém, até o momento, níveis críticos e padrões de qualidade não são conhecidos para a maioria dos solos e ecorregiões dos trópicos e mesmo para países tecnologicamente avançados da América do Norte e Europa Ocidental (LAL, 1999).

A pesquisa de indicadores de qualidade do solo se reverte de importância na promoção do uso agrícola em fases sustentáveis, atuando como ferramenta do planejamento conservacionista.

No Brasil, os estudos de indicadores de qualidade do solo em sistemas agrícolas são recentes. Os primeiros trabalhos foram realizados (KARLEN e STOTT, 1994; HUSSAIN et al.,1999; GLOVER et al.,2000; SOUZA et.al.,2003).

2.4. Conceito e Aplicações do Intervalo Hídrico Ótimo (IHO)

Sabe-se que a avaliação da qualidade física do solo tem sido baseada na quantificação de atributos do solo de difícil aquisição em termos de análises laboratoriais, dispêndio de tempo e recursos, e de baixa correlação em termos práticos e aplicáveis ao manejo físico do solo. Dentre estes atributos os mais freqüentemente determinados são: densidade do solo, granulometria, estrutura, estabilidade de agregados, distribuição de poros e características de retenção de água.

Em vista das dificuldades citadas anteriormente, LETEY (1985) propôs um modelo, considerando atributos físicos do solo que podem ser obtidos em prazo relativamente curto, integrando-os em função de uma única variável, no caso a densidade do solo (D_s). Este modelo corresponde ao “Non Limiting Water Range” (NLWR), ou “Intervalo Hídrico não Limitante”. Posteriormente, esse conceito foi aprimorado por SILVA et al. (1994), que o denominaram “Least Limiting Water Range” (LLWR), ou “Intervalo Hídrico de Menor Limitação”. ORELLANA et al. (1997) e TORMENA et al. (1998) traduziram o termo LLWR para o espanhol e português, respectivamente, passando a utilizar a expressão “Intervalo Hídrico Ótimo” (IHO).

Esse indicador, que expressa o efeito combinado do potencial matricial, da aeração do solo e da resistência do solo à penetração, possibilita estabelecer as condições de umidade ou de densidade do solo nas quais se configura limitação ao crescimento das plantas. O LLWR foi definido como sendo a faixa de conteúdo de água no solo determinada por dois limites (SILVA, 1994), sendo o limite superior a umidade do solo na capacidade de campo (θ_{cc}) ou, no limite, a umidade do solo na qual a porosidade de aeração (θ_{PA}) é de no mínimo $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, e o limite inferior a umidade do solo no ponto de murchamento permanente (θ_{PMP}) ou, no limite, a umidade do solo na qual a resistência do solo à penetração (θ_{RP}) atinge o valor crítico de 2,0 MPa. Valores críticos para o crescimento das 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 $|\Psi| 0,01 \text{ MPa}$ (HAISSE et al., 1955), θ_{PMP} para $\Psi 1,5 \text{ MPa}$ (RICHARDS e WEAVER, 1944), θ_{RP} para um valor de resistência à penetração igual a 2 MPa (TAYLOR et al., 1966) e θ_{PA} para uma porosidade de aeração igual a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (GRABLER e SIEMER, 1968), porém outros valores críticos podem ser utilizados sem alterar a aplicabilidade do conceito.

Segundo ARAUJO et al. (2004) no solo sob mata nativa, o IHO foi igual à capacidade de água disponível (máxima disponibilidade hídrica). Já no solo cultivado, o aumento da densidade do solo (D_s) condicionou redução do valor do IHO decorrente do efeito simultâneo sobre a porosidade de aeração (P_A) e sobre a resistência do solo à penetração (RP). De acordo com KAY (1989), o decréscimo do IHO caracteriza a perda da qualidade física do solo, considerando a maior probabilidade de as culturas serem expostas a estresses físicos, o que foi constatado por SILVA e KAY (1996). Estes resultados evidenciam que, comparativamente ao

solo sob mata nativa, a degradação da estrutura do solo pelo cultivo impõe limitações ao crescimento das plantas pela redução da água disponível, pela restrição de aeração sob elevada umidade do solo ou pela elevação da resistência do solo à penetração até níveis críticos durante o secamento do solo. TORMENA et al. (1998) observaram que a resistência do solo é o limite crítico que, com maior frequência, reduz o IHO, sob condições de secamento do solo. SILVA e KAY (1997) complementam que quanto menor a magnitude do IHO, maior o risco de expor as culturas a condições físicas do solo inadequadas por falta ou por excesso de água.

BETZ et al. (1998) nos EUA, empregaram o IHO na avaliação do impacto do preparo do solo e do tráfego sobre o desenvolvimento das raízes de milho e de soja, num experimento de longa duração. Concluíram que o limite superior do IHO foi definido pela (CC) no tratamento com preparo anual do solo e sem tráfego de máquinas nas entrelinhas, enquanto que a (P_A) foi o limite superior do IHO no tratamento em que foi realizado o plantio direto, na camada compactada e nos tratamentos onde houve tráfego nas entrelinhas. A umidade em que o solo atingiu o valor limitante de RP atuou como limite inferior do IHO na camada compactada e nos tratamentos com plantio direto, enquanto que o PMP foi o limite inferior do IHO nos demais tratamentos. Os resultados demonstraram que nos sistemas de manejo que aumentaram a D_s ocorreu a redução do IHO e do volume do solo explorado pelo sistema radicular das culturas.

TORMENA et al. (1998), trabalhando com LATOSSOLO ROXO encontraram que o IHO foi influenciado positivamente até a densidade de 1,1 Mg.ha⁻¹ e negativamente para densidades superiores. Os autores também verificaram maior IHO no sistema de preparo convencional do que no sistema plantio direto, e que a umidade do solo quando a RP alcançou 2 MPa foi o limite inferior em 89% das amostras no sistema plantio direto e 46 % no sistema de preparo convencional. SILVA e KAY (1996) verificaram que o crescimento de milho foi correlacionado positivamente com o IHO e negativamente com a frequência de dias que o conteúdo de água no solo ficou fora dos limites do IHO.

O valor de D_s associado com condições estruturais do solo restritivas para o crescimento radicular foi definido por SILVA et al. (1994) como densidade do solo crítica (D_{sc}), correspondendo ao valor de D_s em que o IHO é igual a zero.

SILVA (2003) observou sob sistema plantio direto em um LATOSSOLO VERMELHO Distrófico, que o conteúdo de água do solo em que a porosidade de aeração

(θ_{PA}) é de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ somente provoca restrição ao desenvolvimento das plantas quando a D_s é próxima do valor crítico (D_{sc}), em torno de $1,40 \text{ kg dm}^{-3}$. Nas menores densidades, a quantidade de água no solo é limitada pelo conteúdo de água estimado na tensão de $0,01 \text{ MPa}$, considerada como a capacidade de campo. Até a D_s de $1,25 \text{ kg dm}^{-3}$, o limite inferior do IHO é o conteúdo de água na tensão de $1,5 \text{ MPa}$; após essa condição de D_s , o conteúdo de água do solo em que a resistência do solo à penetração (θ_{RP}) atinge $2,0 \text{ MPa}$ passa a provocar restrição ao crescimento das plantas. Para *TORMENA et al. (1999)*, em um Latossolo sob plantio direto, a variação de D_s foi de $0,95 \text{ kg dm}^{-3}$ até $1,25 \text{ kg dm}^{-3}$. Nessa condição, o limite inferior do IHO foi o conteúdo de água na tensão de $1,5 \text{ MPa}$ até a D_s de $1,10 \text{ kg dm}^{-3}$, a partir deste valor de D_s , o conteúdo de água do solo em que a resistência do solo à penetração (θ_{RP}) atinge $2,0 \text{ MPa}$ passa a ser o limite inferior do IHO. Os autores encontraram que na D_s de $1,25 \text{ kg dm}^{-3}$ o IHO é zero, ou seja, é o limite crítico para este tipo de solo. *SILVA (2003)* constatou no LATOSSOLO VERMELHO Distroférico típico sob sistema plantio direto, nas D_s de $1,1 \text{ kg dm}^{-3}$ a $1,2 \text{ kg dm}^{-3}$, que os valores do conteúdo de água do solo em que a porosidade de aeração (θ_{PA}) é de $0,10 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ e o conteúdo de água estimado na tensão de $0,01 \text{ MPa}$ são bastante próximos, o mesmo acontecendo para conteúdo de água na tensão de $1,5 \text{ MPa}$ e o conteúdo de água do solo em que a resistência do solo à penetração (θ_{RP}) atinge $2,0 \text{ MPa}$ no limite inferior do IHO. A partir da D_s de $1,2 \text{ kg dm}^{-3}$, a curva de resistência do solo é o limite inferior do IHO e o limite superior é conteúdo de água do solo em que a porosidade de aeração (θ_{PA}) é de $0,10 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$. Para este solo, a D_s crítica é próximo a $1,4 \text{ kg dm}^{-3}$.

BENJAMIN et al. (2003), nos EUA, desenvolveram um estudo para demonstrar a utilidade do IHO na escolha das práticas de manejo mais adequadas para maximizar a produtividade de culturas anuais como trigo, milho, milheto e girassol. A partir do conhecimento dos limites do IHO, os autores desenvolveram um novo indicador, chamado “Water stress day” (dias de estresse hídrico). Este novo indicador apresentou uma elevada correlação com o rendimento de grãos das culturas. Esse indicador permite identificar a quantidade de água que deve ser adicionada, via irrigação, e o período em que deve ser adicionada para remover os problemas que limitam a produção. Segundo os autores, o conhecimento do IHO permitiu também auxiliar na escolha das atividades de preparo e da profundidade de trabalho necessários para atenuar os problemas de compactação de solo.

A partir do trabalho de SILVA et al. (1994), foram feitos avanços em relação à avaliação do IHO como indicador de qualidade estrutural do solo para o crescimento das plantas. Vários trabalhos têm indicado que o IHO pode também ser expresso em termos de potencial matricial em vez do conteúdo de água do solo (BOONE et al., 1987; BOONE, 1988; HAKANSSON e LIPIEC, 2000). Desta forma, o termo IHO pode ser expresso como "Intervalo Ótimo de Potencial da Água no Solo" (IOP), com o mesmo significado e definição do IHO (TORMENA et al., 1999a; JENSEN et al. 1998).

Finalmente, é necessário mencionar que um grande número de pesquisas foi desenvolvido em solos utilizando este indicador com as mais variadas características físico-químicas, em diferentes sistemas de produção e condições climáticas, demonstrando ser este um indicador mais sensível às variações da condição estrutural dos solos representada pelas variações na densidade do solo, do que o parâmetro água disponível. Tais particularidades tornam o IHO uma ferramenta útil para avaliar a qualidade estrutural do solo e o impacto das práticas de manejo sobre a produtividade sustentável, com a vantagem de relacionar as limitações do solo diretamente com os fatores de resposta das culturas.

Sua aplicabilidade como índice da qualidade física e estrutural sob diferentes solos e sob diversos sistemas de manejo foi relatado em diversos trabalhos (SILVA et al., 1994; SILVA e KAY, 1996; SILVA e KAY, 1997a; BETZ et al., 1998; ZOU et al., 2000; TORMENA et al., 1998; SHARMA e BHUSHAN, 2001; IMHOFF, 2002; LEÃO, 2004; ARAÚJO et al., 2004; BEUTLER et al., 2004).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Localização e descrição da área de estudo

A pesquisa foi desenvolvida no Campo Experimental da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP, situado no município de Campinas (SP), com coordenadas geográficas 22° 48' 57" de latitude sul e 47° 03' 33" de longitude oeste, e altitude média local de 640 m (Figura 1).

O tipo climático local pela classificação de Köppen é uma transição entre os tipos Cwa e Cfa, com média anual da umidade relativa do ar entre 72,2 % e 47,6%. A temperatura média anual é de 22,4 °C, sendo que a temperatura do mês mais quente (Fevereiro) superior a 22°C e a do mês mais frio (Junho) inferior a 18°C. A precipitação média anual é de 1382 mm, com o período chuvoso compreendido entre os meses de outubro a março (1048 mm). Já o período mais seco ocorre de junho a setembro. As precipitações pluviométricas mensais ocorridas no período da pesquisa são apresentadas na Figura 2, destaca-se a ocorrência de baixa precipitação em Fevereiro de 2005.

O solo da área experimental corresponde ao LATOSSOLO VERMELHO Distroférico típico (EMBRAPA, 1999), tendo sido enquadrado no levantamento semidetalhado de solos realizado por OLIVEIRA et al. (1979) na unidade de mapeamento Barão Geraldo. Caracteriza por ser muito argiloso (granulometria no Apêndice 1), espesso, friável e poroso (Apêndice 1). Os LATOSSOLOS VERMELHOS representam cerca de 14% da área do estado de São Paulo, sendo a possibilidade de transposição de escala dos resultados obtida uma das justificativas para realização da pesquisa.

As parcelas experimentais possuem uma área útil de 600 m² cada (20 m de largura x 30 m de comprimento), e estão situadas em vertente de 9 % de declividade com exposição oeste e orientação norte-sul. E o delineamento experimental foi constituído por dois sistemas de manejo (sistema convencional com grade aradora e sistema plantio direto) com 4 replicações (Figura 1).

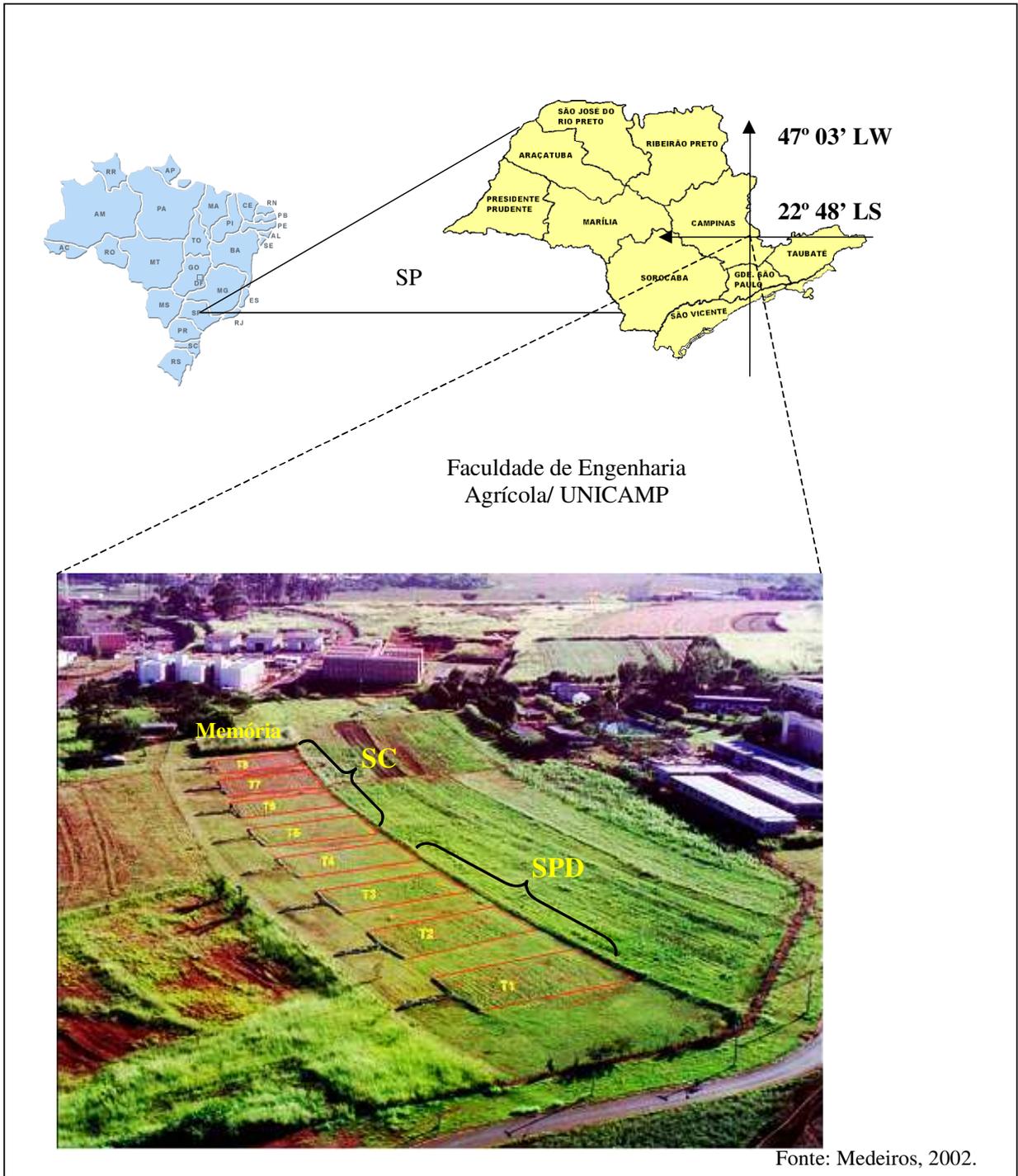
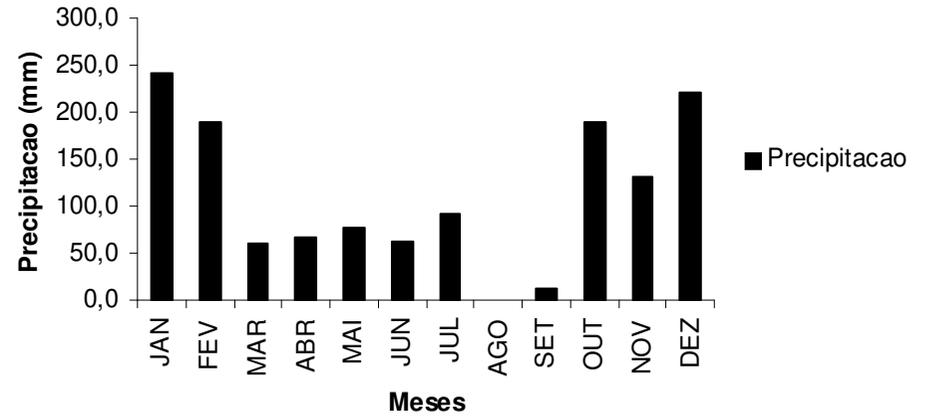
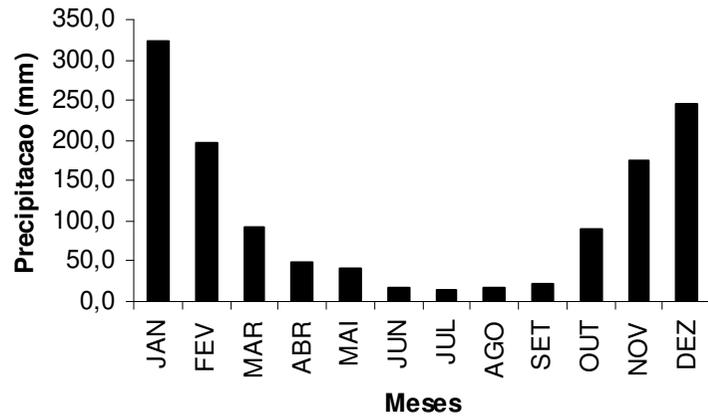
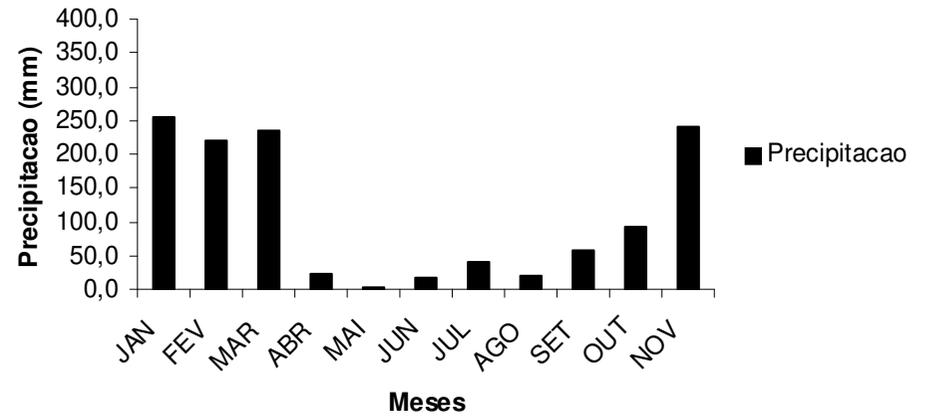
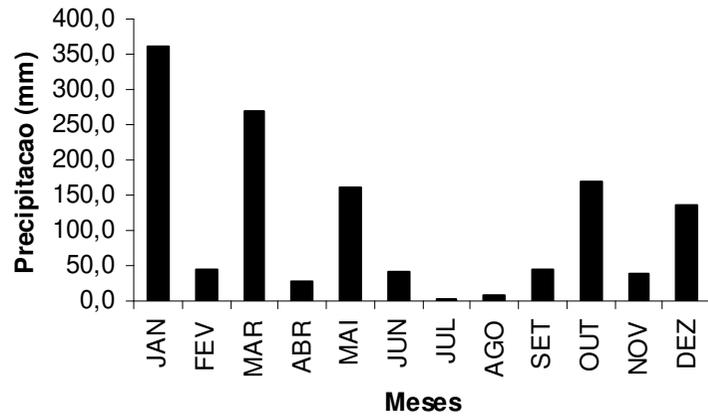


Figura 1. Localização da área experimental da Faculdade de Engenharia Agrícola – Unicamp, com detalhe de vista aérea das parcelas experimentais, destacando-se os seguintes sistemas: Plantio direto (SPD) e Convencional (SC). T1-T4 replicações do SPD; T5-T8 replicações do SC.



1



2
3
4

Figura 2. Precipitação pluvial mensal no Campo Experimental da FEAGRI no período entre 2003 e 2006 (Dados do CEPAGRI).

3.1.1. Uso anterior e atual da área das parcelas experimentais

3.1.1.1. Ensaio Anterior (1985-2003)

Na área do Campo Experimental da Faculdade de Engenharia Agrícola foram implantadas no biênio 85/86 nove parcelas, sendo oito dotadas com sistemas coletores da perda de terra e água e uma sem sistema coletor, que foi mantida como “memória”. A construção da infra-estrutura foi concluída em Agosto de 1986, quando se efetuou toda sistematização e homogeneização do solo das parcelas (com exceção do “memória”), com relação aos aspectos químicos, físicos, biológicos e topográficos. Durante o ano agrícola de 1986/87, todas as parcelas foram subsoladas e plantadas com crotalaria, objetivando à maior uniformidade possível da área experimental. No ano agrícola seguinte (1987/88), realizou-se semeadura de milho em toda a área, precedida de nova subsolagem. No ano subsequente (1988/89), a cultura de soja foi implantada em toda a área, objetivando a prática de rotação de culturas, novamente utilizando a subsolagem. Em 1989/90, cultivou-se à cultura de milho, em toda a área, com nova subsolagem. Em 1990/91, implantaram-se tratamentos diferenciados nas oito parcelas com talhão coletor. Os sistemas de preparo do solo foram: T1- Grade Aradora; T2- Sistema Alternado; T3- Escarificação; T4- Semeadura Direta; T5- Arado de disco em nível; T6- Roçado; T7- Arado de disco morro abaixo; T8- Enxada rotativa. No período de 1991 a 2003, essas parcelas foram mantidas sob os mesmos tratamentos de preparo de solo, somente a cultura do milho foi semeada em sete das oito parcelas, com o objetivo geral de estudar a relação entre métodos de preparo de solo, produtividade do milho e perdas de terra por erosão (LUCARELLI, 1997; MEDEIROS, 2002). A parcela memória durante todos esses anos (desde 1986) foi mantida sem uso agrícola, permitindo assim sua revegetação natural. A condição do solo da parcela memória tem sido usada como uma referência local da qualidade do solo após prolongado período de pousio.

O uso e manejo contínuo das parcelas com distintos sistemas de manejo levaram à diferenciação de atributos físicos, hídricos e químicos do solo, de produtividade e de perdas de terra por erosão entre outros. Resultados obtidos foram descritos com detalhes nos trabalhos e dissertações de DANIEL et al. (1996); LUCARELLI et al. (1996); LUCARELLI (1997); MEDEIROS (2002) e MARQUES (2006).

3.1.1.2. Caracterização do Ensaio Atual (2003-2007)

Em julho de 2003, foi efetuada amostragem para caracterização da condição física e química do solo das parcelas, com a finalidade de conclusão do Ensaio Anterior e início de uma nova fase da pesquisa nas parcelas correspondente ao Ensaio Atual. Após a caracterização do solo, procedeu-se a escarificação de toda a área, a 0,30 m de profundidade, com o objetivo de uniformização da área antes da aplicação dos tratamentos, plantando-se em seguida uma cultura de cobertura (aveia preta). No Apêndice 2 está ilustrada uma linha do tempo, na qual são assinaladas as diversas fases do ensaio atual.

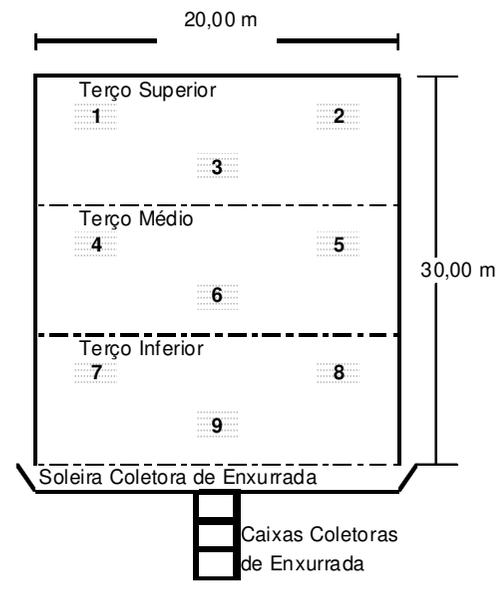
O delineamento experimental do ensaio atual se constitui por dois sistemas de manejo (convencional com grade aradora em nível (SC) e plantio direto (SPD), com 4 replicações. No primeiro ano agrícola, safra (2003/04), implantou-se a cultura do milho (variedade SHS 4050) como cultura de verão, nas oito parcelas experimentais. Foram retiradas amostras de solo na profundidade de 0-0,20 após florescimento para caracterização da fertilidade química (pH, em água e em CaCl₂, matéria orgânica, macronutrientes, acidez potencial e alumínio trocável. Após a colheita, foram extraídas amostras deformadas e indeformadas para caracterização de atributos físico-hídricos do solo em duas profundidades (0-0,20 m e 0,20-0,40 m) (densidade do solo, porosidade total, diâmetro médio ponderado, curva de retenção de água), também foram monitoradas as perdas de terra durante o ciclo da cultura, além da produtividade e de indicadores biométricos das culturas. Na safra 2003/2004 a amostragem do solo foi efetuada em 15 pontos dentro de cada parcela, totalizando 60 para cada tratamento. A localização dos pontos de amostragem é ilustrada na Figura 3a. Nas parcelas sob SPD, foi semeada aveia preta, nabo forrageiro e crotalária como plantas de cobertura, não tendo sido implantada cultura de inverno. A caracterização deste ensaio e parte dos resultados obtidos estão descritos com detalhes na dissertação de MARQUES (2006).

No segundo ano agrícola (2004/05), foi efetuado o plantio no verão com a mesma variedade de milho (SHS 4050) e a cultura do feijoeiro (variedade IAC- Carioca) como cultura de inverno. Na safra de inverno, em duas parcelas, uma sob SPD (T6) e uma sob SC (T4), foi aplicada irrigação por aspersão convencional. Na safra de verão, em todas as parcelas, foram caracterizados atributos físico-hídricos do solo à semelhança do ano anterior, além da resistência do solo à penetração e da condutividade hidráulica durante a fase de maturação fisiológica do

milho. Todos os atributos físicos-hídricos na safra de verão foram determinados em 9 pontos aleatórios dentro de cada parcela, totalizando 36 para cada tratamento (Figura 3b).



(a)



(b)

Fonte: Sebastião Marques (2006)

Figura 3. Esquema de amostragem utilizado nos talhões coletores na cultura de verão (milho): (a) Safra 2003/2004; (b) Safras 2004/2005 e 2005/2006.

Já na cultura de inverno (safra 2004/05) os atributos físico-hídricos (densidade do solo, resistência do solo à penetração, condutividade hidráulica) foram caracterizados em 4 parcelas experimentais, sendo duas sob SPD (T6 e T8) e duas sob SC (T1 e T4). Em duas parcelas, uma sob SPD (T6) e uma sob SC (T4), foi aplicada irrigação por aspersão convencional. Foram amostrados 60 pontos por parcela na profundidade de 0,20 m, nos mesmos locais onde sondas TDR (Time-Domain Reflectometry) foram instaladas para monitoramento da umidade do solo no decorrer do ciclo do feijoeiro(Figura 4).

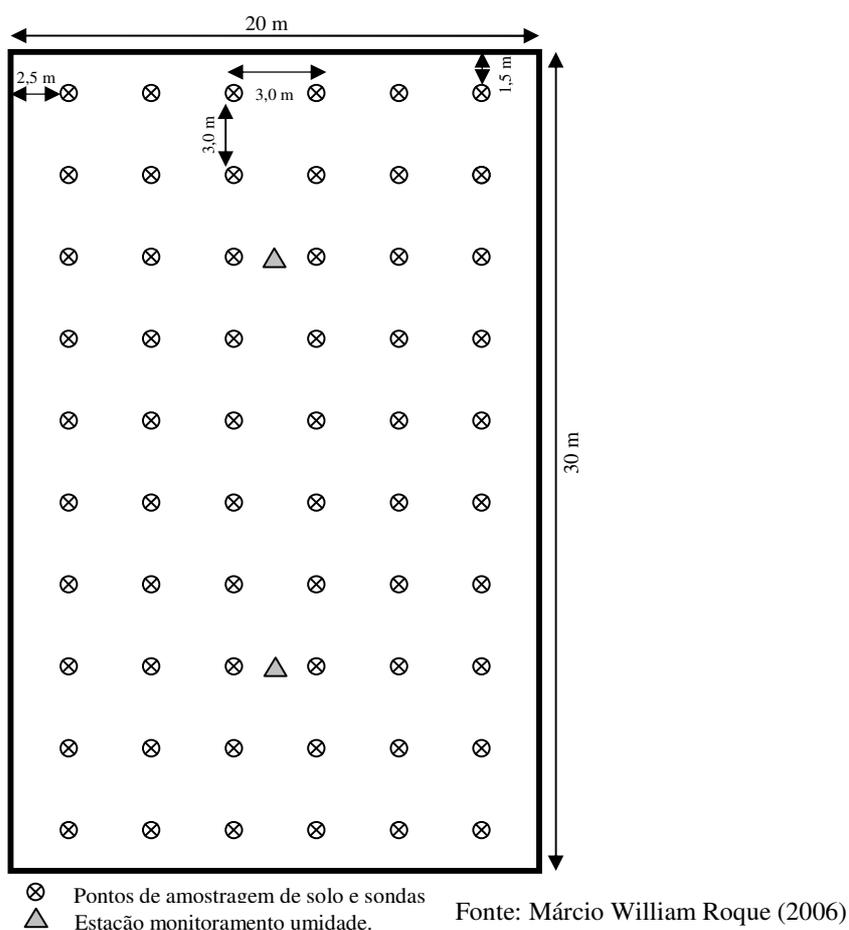


Figura 4. Esquema de amostragem utilizado nas parcelas experimentais na cultura de inverno (feijão), safras 2004/05 e 2005/06.

No terceiro ano agrícola (2005/06), foi cultivado no verão a variedade de milho (SHS 4080), similar à cultivada nas safras anteriores, e como cultura de inverno o feijoeiro (variedade IAC-Carioca Precoce). Os ensaios foram conduzidos de maneira similar aos dos anos anteriores. Nessa safra, as parcelas sob SPD não foram semeadas com plantas de

cobertura, devido ao atraso da colheita da cultura de inverno, ficando apenas com a cobertura do feijoeiro.

Os procedimentos para a coleta de amostras e os métodos analíticos para determinação de pH, em água e em CaCl₂, matéria orgânica, macronutrientes, acidez potencial e alumínio trocável constam de CAMARGO et al. (1986) e EMBRAPA (1997). Já para a densidade do solo, macroporosidade e microporosidade foram utilizados os procedimentos descritos por CAMARGO et al. (1986). A resistência do solo à penetração foi realizada pelo método de STOLF et al. (1983) e a condutividade hidráulica do solo saturado pelo método do permeâmetro de Guelph (ELRICH et al., 1987) segundo modelos matemáticos propostos por VIEIRA et al. (1988). O ajuste da curva de retenção de água no solo foi efetuado empregando o modelo de Van GENUCHTEN (1980), com o uso do programa Soil Water Retention Curve (DOURADO NETO et al., 2000).

Os rendimentos de grãos de milho para as três safras agrícolas foram obtido extrapolando-se a produção de grãos da área útil da parcela (600 m²) para um hectare, corrigidos para a umidade padrão de 14,5% conforme DUARTE e PATERNIANI (2000). Os componentes do rendimento avaliados foram índice de espigas por planta, peso de 1.000 grãos e altura da planta. Obteve-se o número de espigas por planta pela razão dos valores de amostragem de sessenta plantas colhidas na área útil de cada parcela e o número total de espigas colhidas nestas plantas. O peso de 1.000 grãos foi avaliado por meio da determinação da massa de uma amostra de 1000 grãos, separada manualmente, com 9 repetições por parcela, totalizando 36 por tratamento. Para o feijoeiro (safra 2004/2005) o rendimento foi determinado em três plantas localizadas próximo a sonda de TDR, totalizando 180 plantas por tratamento.

3.2. Determinação do Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) para o Latossolo Vermelho Distroférico típico da região de Campinas-SP

3.2.1. Amostragem

Inicialmente foi realizado um ensaio preliminar objetivando caracterizar a variação da densidade do solo sob várias condições de uso e manejo. Selecionaram-se aleatoriamente 5 locais de amostragem nas parcelas experimentais da FEAGRI e em parcelas experimentais do

IAC- Fazenda Santa Elisa sob SPD há mais de 15 anos. Foram retiradas amostras indeformadas em anéis volumétricos do tipo Köpeck com aproximadamente 50 mm de altura por 50 mm de diâmetro interno a 0,10 m e a 0,30 m, com o intuito de determinar o IHO para as profundidades 0- 0,20 m e 0,20-0,40 m. A análise dos resultados obtidos permitiu definir 4 faixas de variação de densidade do solo: 0,9 – 1,0 kg dm⁻³; 1,0 – 1,1 kg dm⁻³; 1,1 – 1,2 kg dm⁻³ e 1,2 – 1,3 kg dm⁻³.

Para determinação do IHO, em cada faixa de densidade do solo anteriormente definida, foram extraídos 10 anéis em cada camada, totalizando 80 amostras. Logo após a coleta, as amostras foram preparadas, retirando-se o excedente de solo dos extremos dos anéis de maneira que o solo amostrado ocupasse somente o volume do anel. Em seguida, o fundo do anel recebeu um disco de tecido fixado com elástico, permeável ao fluxo de água e de ar, mas que impede a perda de solo. As amostras foram então envoltas em papel alumínio, acondicionadas em sacos plásticos e mantidas sob temperatura de aproximadamente 5°C no Laboratório de Solos da Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI/UNICAMP) em Campinas-SP, até a posterior determinação da curva de resistência do solo à penetração (CRS) e de retenção de água no solo.

3.2.2. Obtenção da curva de resistência do solo à penetração e da curva de retenção de água no solo

As curvas de retenção de água no solo e de resistência do solo à penetração foram determinadas no Laboratório de Física do Solo da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ-USP), em Piracicaba- SP. No laboratório, as amostras indeformadas preparadas foram saturadas por meio da elevação gradual de uma lâmina de água numa bandeja, até atingir cerca de 2/3 da altura dos anéis. Para determinação da curva de retenção, foi adotado o procedimento descrito em SILVA et al. (1994).

As amostras foram divididas em oito grupos de dez amostras, sendo quatro grupos relativos à profundidade de 0-0,20m e os outros quatro à profundidade de 0,20-0,40m. Cada grupo de amostras era representativo de uma faixa de variação da densidade do solo. No levantamento das curvas de retenção de água no solo, as amostras foram submetidas às seguintes pressões: 0,002; 0,004; 0,006; 0,008; 0,01; 0,03; 0,05; 0,07; 0,1 e 1,5 MPa. Cada amostra recebeu apenas uma pressão, aplicada em câmaras de Richards, conforme descrito em

KLUTE (1986). Após atingir o equilíbrio em cada potencial, as amostras foram pesadas para determinação da umidade do solo e; em seguida, era feita a determinação da resistência do solo à penetração (RP), utilizando o penetrômetro eletrônico descrito por TORMENA et al. (1998). Em cada amostra ou anel volumétrico, foram realizadas 3 leituras, distribuídas de forma equidistante, totalizando 240 ensaios de RP (80 x 3 repetições) (Figura 5 b,c).

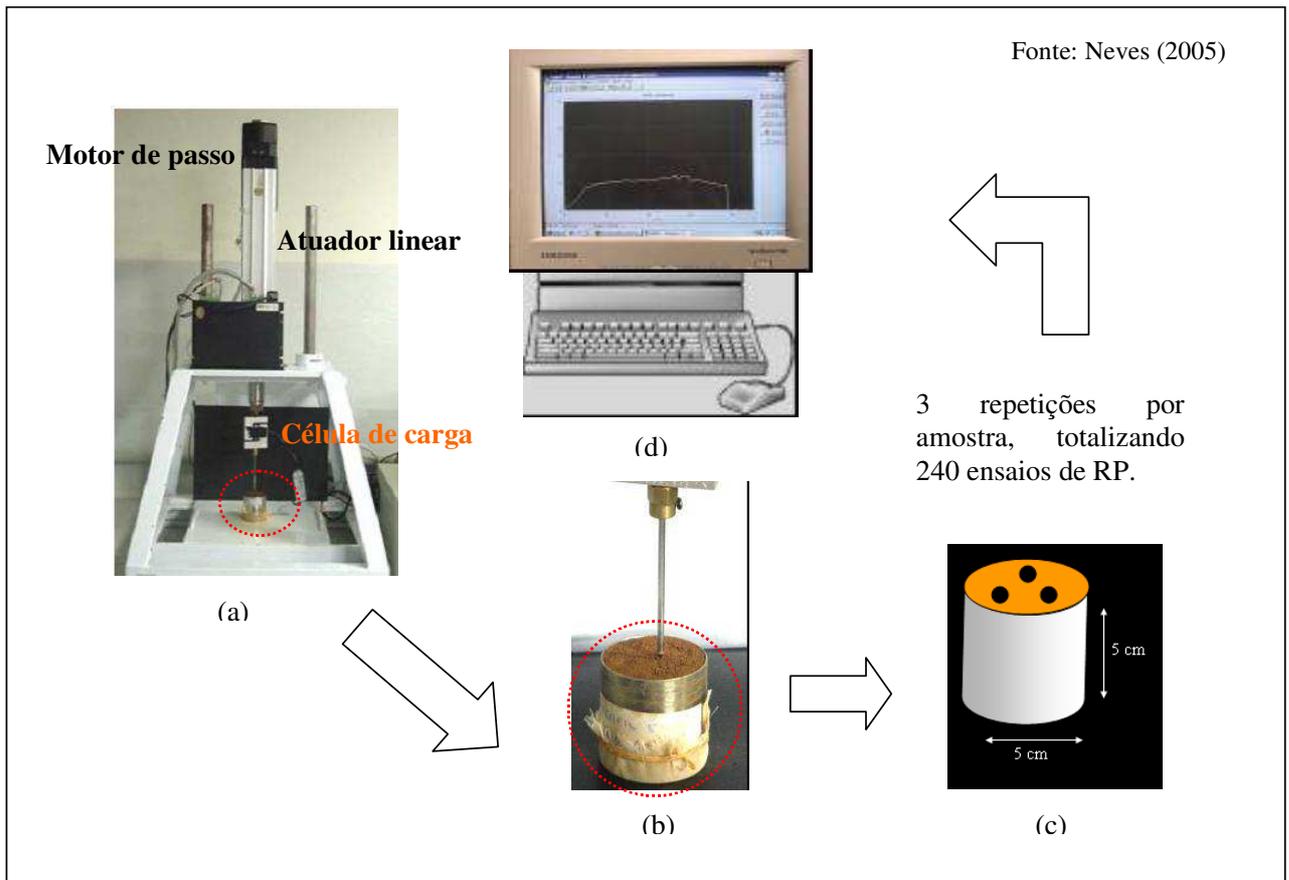


Figura 5. (a) ilustração do equipamento, (b) detalhe da sonda utilizada para realização dos testes de resistência do solo à penetração; (c) distribuição dos pontos de determinação em um anel; (d) ilustração do sistema de aquisição de dados.

O penetrômetro utilizado é composto de um atuador linear elétrico com motor de passo, de um painel para controle da velocidade e direção de deslocamento, de uma base metálica para sustentação do conjunto mecânico e da amostra durante o teste, e de uma célula de carga com capacidade nominal de 20 kg acoplada na extremidade do braço mecânico do atuador (Figura 5a). A haste metálica do penetrômetro possui na sua extremidade um cone com semi-ângulo de 30° e área de base de 0,0266 cm² e velocidade de penetração de 1,0 cm

min⁻¹. As medidas de resistência do solo à penetração são obtidas por meio de um sistema automatizado de aquisição de dados, sendo armazenadas num arquivo de dados do sistema (Figura 5 d).

As medidas obtidas da superfície da amostra até 1,0 cm de profundidade foram descartadas, uma vez que a resistência aumenta até uma determinada profundidade, e depois tende a se tornar-se constante. Segundo BRADFORD (1986), esta profundidade é considerada crítica e na maioria das amostras ocorre entre 0,5 e 1,0 cm de profundidade, sendo desta forma aconselhável selecionar as leituras de resistência à penetração somente nos 3 cm centrais das amostras. A frequência de amostragem correspondeu à coleta de um valor de resistência a cada 0,6767 segundos, obtendo-se um total de aproximadamente 260 leituras, das quais um valor médio foi utilizado. Como foram realizados três ensaios por amostra, a média aritmética dos resultados destes ensaios correspondeu ao valor da resistência à penetração para cada amostra. O sistema de aquisição de dados fornece os valores da resistência do solo a penetração, em kgf. Os valores foram convertidos para MPa, de acordo com a equação 01.

$$RP = \left(\frac{RP_1}{AC} \right) 0,0980665 \quad (01)$$

Sendo que:

RP = Resistência do solo à penetração (MPa),

RP₁ = Resistência do solo à penetração fornecida pelo equipamento (kgf),

AC= área do cone (0,0266 cm²),

Após a determinação da RP, as amostras foram levadas para estufa para secagem a 105° C por 24 horas, determinando-se o conteúdo de água em base gravimétrica (θ_g) e a densidade do solo (D_s), conforme EMBRAPA (1997). A umidade volumétrica (θ_v) foi obtida multiplicando-se a umidade gravimétrica pela densidade relativa do solo, em g cm⁻³ (LIBARDI,2000).

Com a variação de D_s e o gradiente de pressão com que as amostras foram submetidas, obteve-se um gradiente de umidade volumétrica (θ_v), e conseqüentemente, de RP, fundamental para o ajuste das curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração.

Sabe-se que a resistência do solo à penetração varia com o conteúdo de água e com a densidade do solo, e a partir desta relação funcional pode-se determinar a curva de resistência do solo à penetração (CRS). A CRS foi ajustada por meio de um modelo não-linear, proposto por BUSSCHER (1990), e utilizado com êxito por SILVA et al.(1994), BETZ et al.(1998) e LEÃO (2002). O modelo utilizado é descrito na equação 02.

$$RP = a\theta^b D_s^c \quad (02)$$

Sendo:

RP = Resistência do solo à penetração (MPa),

θ = Umidade do solo ($m^3 m^{-3}$);

D_s = Densidade do solo ($kg m^{-3}$);

a, b, c = Coeficientes de ajuste do modelo.

A transformação logarítmica, resulta na equação 03:

$$\ln RP = \ln a + b \ln \theta + c \ln D_s \quad (03)$$

A CRS é utilizada para determinar o conteúdo de água (θ_{RP}) no solo em que a resistência do solo à penetração atinge 2,0 MPa (TAYLOR et al.,1966), valor considerado o limite crítico do IHO (RP). Assumindo-se o valor de RP de 2,0 MPa como limitante ao crescimento de plantas pode-se avaliar a umidade do solo em função da variação da densidade do solo, utilizando a equação 04, obtida a partir da equação 02:

$$\theta_{RP} = (2,0/(aD_s^c))^{1/b} \quad (04)$$

A curva de retenção de água no solo, expressa pela relação entre o potencial mátrico (Ψ) e o conteúdo de água (θ), foi estimada utilizando a função proposta por ROSS et al. (1991) e empregada por SILVA et al. (1994), descrita na equação 05:

$$\theta = (\exp^{(d+e Ds)}) \psi^f \quad (05)$$

Em que:

θ = Conteúdo volumétrico de água ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$),

Ψ = Potencial mátrico (MPa);

Ds = densidade do solo (kg m^{-3});

d, e, f = Coeficientes de ajuste da função.

Através da regressão dos mínimos quadrados são estimados valores para os parâmetros em cada um dos modelos. Os ajustes dos modelos das curvas de retenção de água no solo e de resistência do solo à penetração foram feitos com base na rotina PROC NLIN do sistema SAS/STAT[®] (SAS Institute, 1999) e o gráfico através do sistema SAS/GRAPH[®] (SAS Institute, 2000). Em ambas as curvas, o ajuste foi realizado por regressão não linear, empregando o algoritmo de Leverberg-Marquardt. A curva de resistência do solo à penetração foi determinada empregando a equação (02) e a curva de retenção de água no solo utilizando a equação (05).

A capacidade de campo foi considerada como sendo o conteúdo volumétrico de água retido no solo, depois de submetido à pressão de 0,01 MPa (REICHART, 1988;) e o ponto de murcha permanente em 1,5 MPa (SAVAGE et al., 1996). Para determinação do IHO a variação da umidade na capacidade de campo (θ_{cc}) e no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) em função da variação da Ds pode ser estimada através das equações 06 e 07, respectivamente.

$$\theta_{cc} = (\exp^{(d+e Ds)}) \psi_{cc}^f \quad (06)$$

$$\theta_{PMP} = (\exp^{(d+e Ds)}) \psi_{PMP}^f \quad (07)$$

A porosidade de aeração foi calculada para cada amostra pela equação (08), considerando a variação da D_s e descontando o valor crítico de $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (10%).

$$\theta_{PA} = (1 - D_s / D_p) - 0,1 \quad (08)$$

Em que:

θ_{PA} = porosidade de aeração ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$);

D_p = Densidade de partículas, assumida como 2650 kg dm^{-3} ;

D_s = densidade do solo (kg dm^{-3});

O IHO foi determinado com base nos procedimentos descritos por TORMENA et al. (1998). Sendo este calculado pela diferença entre o limite superior e inferior dos conteúdos de água: o limite superior é o menor valor de θ considerado na capacidade de campo ou na porosidade de aeração de 10 %; o limite inferior é o maior valor de θ considerado, em que a resistência do solo à penetração atinge 2,0 MPa ou o valor de θ no ponto de murchamento permanente ($\theta = -1,5 \text{ MPa}$). São quatro as possibilidades no cálculo do IHO, dependendo dos valores dos quatro parâmetros (WU et al.,2003):

$$(1) \text{ Se } (\theta_{PA} \geq \theta_{CC}) \text{ e } (\theta_{RP} \leq \theta_{PMP}) : \\ (IHO = \theta_{CC} - \theta_{PMP});$$

$$(2) \text{ Se } (\theta_{PA} \geq \theta_{CC}) \text{ e } (\theta_{RP} \geq \theta_{PMP}) : \\ (IHO = \theta_{CC} - \theta_{RP});$$

$$(3) \text{ Se } (\theta_{PA} \leq \theta_{CC}) \text{ e } (\theta_{RP} \leq \theta_{PMP}) : \\ (IHO = \theta_{PA} - \theta_{PMP})$$

$$(4) \text{ Se } (\theta_{PA} \leq \theta_{CC}) e (\theta_{RP} \geq \theta_{PMP}) \\ (IHO = \theta_{PA} - \theta_{RP})$$

Para quantificação do IHO neste trabalho foi utilizado um algoritmo simplificado, desenvolvido no programa SAS (Statistical Analysis System Institute, 1999) por LEÃO et al. (2005). A visualização e interpretação dos resultados do IHO são otimizadas pela parte gráfica gerada no procedimento, pois além da descrição estatística envolvida na construção da rotina, o processo gera um gráfico do IHO e fornece o valor da densidade crítica do solo que é representada por uma linha vertical no gráfico.

3.3. Monitoramento da qualidade e desempenho do solo utilizando o IHO como indicador

A validação do Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) como indicador da qualidade estrutural do LATOSSOLO VERMELHO Distroférico típico da unidade Barão Geraldo foi realizada a partir de dados de densidade do solo, produtividade biológica e indicadores biométricos da cultura do milho (verão) de três safras consecutivas (2003/04; 2004/05; 2005/06), e de dados de densidade do solo, umidade volumétrica e produtividade biológica da cultura de feijão (inverno), irrigado e não irrigado, para a safra 2004/05.

Para as safras de verão, foi analisada a distribuição dos valores de Ds dentro da amplitude de variação do IHO. Assim, sob o gráfico do IHO gerado para cada profundidade (0-0,20 e 0,20-0,40 m), colunas verticais representando os valores mínimo e máximo de densidade do solo determinado em cada tratamento e o histograma de cada conjunto de dados, permitiu visualizar a distribuição e frequência de ocorrência dos valores observados.

Na safra de inverno, o monitoramento contínuo da umidade do solo por meio das sondas TDR, permitiu determinar com base no IHO o número de dias em que o feijoeiro permaneceu fora das condições ideais para seu crescimento e desenvolvimento em cada sistema de manejo.

3.4. Análises Estatísticas dos dados

3.4.1. Densidade do solo

Foi efetuada a análise exploratória dos dados de Ds por tratamento e por camada de solo, e verificada a normalidade dos dados pelo teste de SHAPIRO-WILK (1965). A variabilidade do conjunto de dados expressa pelo coeficiente de variação (CV %), foi classificada conforme os critérios de WARRICK e NIELSEN (1980), indicam: baixa variabilidade $CV < 12\%$, média variabilidade $12 < CV < 60$ e alta variabilidade $CV > 60$.

Os resultados foram submetidos à análise de variância (two-way Anova), utilizando a rotina do PROC ANOVA num delineamento inteiramente casualizado e as médias foram comparadas pelo teste de TUKEY, com ($p < 0,05$). Para realização das análises, foi utilizando o programa computacional SAS (SAS Statistical analysis system Institute, 1999).

3.4.2. Produção da cultura e seus componentes

Os resultados foram submetidos à análise de variância (two-way Anova), utilizando a rotina do PROC ANOVA num delineamento inteiramente casualizado e as médias foram comparadas pelo teste de TUKEY, com ($p < 0,05$). Para realização das análises, foi utilizando o programa computacional SAS (SAS Statistical analysis system Institute, 1999).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Intervalo Hídrico Ótimo (IHO)

As análises descritivas dos atributos físicos do solo empregados no ajuste dos modelos de retenção de água e de resistência do solo à penetração nas duas profundidades amostradas são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Análise descritiva dos atributos físicos do solo utilizados nos ajustes dos modelos, nas duas camadas amostradas.

Parâmetro ⁽¹⁾	N amostras	Profundidade 0-0,20 m				
		Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	CV (%)
RP (MPa)	40	1,524	0,791	0,480	3,560	51,93
Ds (kg dm ⁻³)	40	1,133	0,101	0,980	1,420	8,96
θ (cm ³ cm ⁻³)	40	0,295	0,046	0,210	0,390	15,83
Parâmetro	N amostras	Profundidade 0,20-0,40 m				
		Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	CV (%)
RP (MPa)	40	1,832	1,077	0,490	5,320	58,78
Ds (kg dm ⁻³)	40	1,117	0,109	0,900	1,320	9,74
θ (cm ³ cm ⁻³)	40	0,278	0,047	0,190	0,390	17,0

⁽¹⁾ RP = Resistência do solo à penetração; Ds = Densidade do solo; θ = Umidade volumétrica.

A aplicação do teste de SHAPIRO-WILK (1965) indicou que os referidos atributos em ambas profundidades analisadas apresentam distribuição normal.

A resistência do solo à penetração (RP) apresentou coeficiente de variação entre 51,93% e 58,78%, nas profundidades de 0-0,20 e 0,20-0,40 m respectivamente, indicativo de média variabilidade, segundo WARRICK e NIELSEN (1980). O valor médio de RP na profundidade de 0-0,20 m é de 1,52 MPa, aumentando para 1,83 MPa entre 0,20-0,40 m. Os valores máximos em ambas as profundidades foram de 3,56 MPa e 5,32 MPa respectivamente, muito acima do valor crítico de 2 MPa.

Os valores de RP têm apresentado ampla gama de variabilidade nos diferentes trabalhos pesquisados na literatura. Neste trabalho o elevado CV deve-se a ampla variação de θ e Ds entre as amostras, como já indicados em outros trabalhos.

Para a densidade do solo (Ds), constatou-se baixa variabilidade dos dados nas duas profundidades analisadas, pois o CV (%) variou na faixa de 8,96 a 9,74, e a maior

variabilidade dos dados ocorreu na camada subsuperficial do solo, de 0,20-0,40 m. Os valores máximos da densidade do solo (Ds) nas camadas de 0-0,20 m e 0,20-0,40 m foram de 1,42 kg dm⁻³ e 1,32 kg dm⁻³, respectivamente. A baixa variabilidade da densidade do solo (Ds) e a distribuição normal dos dados têm sido verificadas por diversos autores como SOUZA et al. (2001), CAVALIERI et al (2006) e SILVA et al. (2006).

As amplitudes de variação da umidade volumétrica, entre 0,21 e 0,39 cm³ cm⁻³ na profundidade de 0-0,20 m e entre 0,19 a 0,39 cm³ cm⁻³ na profundidade de 0,20-0,40 m, demonstram que a faixa de potencial matricial utilizada no levantamento das curvas de retenção permitiu uma ampla variação de umidade para a variabilidade natural obtida da densidade do solo. Os coeficientes de variação (CV) do atributo em ambas profundidades analisadas apresentaram média variabilidade, segundo a classificação de WARRICK e NIELSEN (1980).

Na Tabela 3 são apresentados os coeficientes obtidos no ajuste das curvas de resistência do solo à penetração (CRP) para as duas profundidades analisadas. Os coeficientes de ajuste indicaram em ambas as profundidades analisadas que a RP é positivamente correlacionada com a Ds e negativamente com a θ , concordando com outros resultados da literatura (TORMENA et al. 1999; IMHOFF et al. 2000; CAVALIERI et al, 2006). A elevação da RP com a redução de θ e o aumento de Ds pode ser atribuída ao aumento na coesão e fricção entre as partículas, sendo maior no solo cultivado. SOJKA et al., (2001), TORMENA et al.,(1999) relataram que com o secamento do solo, ocorre um aumento na resistência do solo à penetração das raízes, porque diminui a mobilidade das partículas do solo, o que aumenta a força requerida para deslocá-las à medida que o cone metálico penetra, ou, similarmente, que as raízes crescem.

Tabela 3. Coeficientes do ajuste dos dados de resistência à penetração nas duas profundidades estudadas através do modelo proposto por BUSSCHER (1990).

Profundidade 0-0,20 m				
Coeficiente (R ² =0,85)	Valor estimado	Erro Padrão	Intervalo de confiança	
			Inferior	Superior
a	0,3285	0,1564	0,0115	0,6455
b	-1,2394	0,3611	-1,9710	-0,5078
c	0,0894	0,9051	-1,7446	1,9234
Profundidade 0,20-0,40 m				
Coeficiente (R ² =0,83)	Valor estimado	Erro Padrão	Intervalo de confiança	
			Inferior	Superior
a	0,2806	0,1587	-0,0414	0,6025
b	-1,3308	0,4402	-2,2236	-0,4381
c	1,0584	0,8480	-0,6614	2,7781

RP = resistência do solo à penetração (MPa); DS = densidade do solo (kg dm⁻³) e θ = umidade volumétrica (cm³ cm⁻³).

As estimativas dos coeficientes de regressão para a resistência do solo à penetração foram estatisticamente significativas ($p < 0,0001$) para as duas profundidades analisadas e o modelo ajustado aos dados explicou 85% da variabilidade da resistência do solo à penetração na profundidade de 0-0,20 m e 83% para a profundidade de 0,20-0,40 m. As equações 9 e 10, ilustram os ajustes das curvas de RP respectivamente para as profundidades 0-0,20 m (1) e 0,20-0,40 m (2):

$$RP_1 = 0,3285 \theta_1^{-1,2394} Ds_1^{0,0894} \quad (9)$$

(1, prof. 0-0,20 m , F = 68,03, $p < 0,0001$, R² = 0,85)

$$RP_2 = 0,2806 \theta_2^{-1,3308} Ds_2^{1,0584} \quad (10)$$

(2, prof. 0,20-0,40 m , F = 57,93 , $p < 0,0001$, R² = 0,83)

As equações 11 e 12, obtidas a partir do rearranjo das equações 9 e 10 acima, permitem obter o valor de umidade volumétrica no solo, dado um valor conhecido de Ds, em que o RP atinge o valor crítico de 2,0 MPa, respectivamente nas profundidades 0,0-0,20 m (1) e 0,20-0,40 m (2).

$$\theta_{RP1} = (2,0 / (0,3285 Ds_1^{0,0894}))^{1 / -1,2394} \quad (11)$$

$$\theta_{RP_2} = (2,0 / (0,2806 Ds_2^{1,0584}))^{1/-1,3308} \quad (12)$$

Na Tabela 4 são apresentados os coeficientes obtidos do ajuste não linear das curvas de retenção de água no solo (CRA) para as duas profundidades analisadas. Observa-se que os coeficientes em ambas as equações indicam que a umidade do solo variou negativamente com a densidade do solo e com o potencial de água no solo. Estes resultados são concordantes com os resultados obtidos por ARAUJO et al. (2004) em um LATOSSOLO VERMELHO distrófico sob sistema convencional de preparo do solo com aração e gradagem e mata nativa (Floresta estacional semidecidual) na região noroeste do Paraná.

Observa-se na Tabela 3 que o intervalo de confiança dos coeficientes *c* e *e* em ambas as profundidades não incluem valor igual a zero, porém já o coeficiente *d* inclui o valor zero mas pelo teste “t” tal coeficiente não recebe valor zero ao nível de significância de 5%, possibilitando afirmar que todos os coeficientes são estatisticamente significativos e que a resistência à penetração foi significativamente relacionada com ambas variáveis.

Tabela 4. Coeficientes do ajuste não linear das curvas de retenção de água no solo em duas profundidades segundo o modelo proposto por Ross et al. (1991).

Profundidade 0-0,20 m				
Coeficiente (R ² = 0,98)	Valor estimado	Erro Padrão	Intervalo de confiança	
			Inferior	Superior
c	-1,1961	0,3155	-1,8354	-0,5567
d	-0,1914	0,2736	-0,7458	0,3629
e	-0,0585	0,0139	-0,0866	-0,0303
Profundidade 0,20-0,40 m				
Coeficiente (R ² =0,99)	Valor estimado	Erro Padrão	Intervalo de confiança	
			Inferior	Superior
c	-1,3427	0,1571	-1,6614	-1,0240
d	-0,2390	0,1346	-0,5119	0,0340
e	-0,0853	0,0089	-0,1034	-0,0671

As equações 13 e 14 permitem calcular a variação da umidade do solo na capacidade de campo (CC, potencial de -0,01MPa) e no ponto de murcha permanente (PMP, potencial de -1,5 MPa), tendo como variável independente a Ds para as profundidades de 0-0,20 m e 0,20-0,40 m, respectivamente:

$$\theta_1 = \exp(-1,1961 - 0,1914 D_{s_1}) |\psi|^{-0,0585} \quad (13)$$

(1, prof. 0-0,20 m, F = 624,10, p < 0,0001, R² = 0,98)

$$\theta_1 = \exp(-1,3427 - 0,2390 D_{s_1}) |\psi|^{-0,0853} \quad (14)$$

(2, prof. 0,20-0,40 m, F = 1642,68, p < 0,0001, R² = 0,99)

ARCHER e SMITH (1972) mostraram que a densidade do solo tem ação sobre a retenção de água, por sua influência na porosidade total e na distribuição do tamanho dos poros. ARAUJO et al. (2004) também constataram em LATOSSOLO VERMELHO Distrófico (230 g kg⁻¹ de argila) que a densidade do solo influenciou significativamente e de forma negativa a retenção de água. Já CAVALIERI et al. (2006) verificaram um aumento da água disponível (AD) com o aumento da D_s, quando o valor de D_s não excedia a 1,80 kg dm⁻³.

As figuras 6 e 7 representam a variação da umidade do solo em função da densidade do solo (kg dm⁻³), nos limites críticos definidos pelas umidades (θ) na capacidade de campo (θ_{CC} = 0,01MPa); em que a resistência do solo à penetração é igual a 2 MPa (θ_{RP} = 2 MPa); em que a porosidade de aeração é de 10% (θ_{PA} = 0,01 m³ m⁻³); e no ponto de murcha permanente (θ_{PMP} = 1,5 MPa) para as profundidades 0-0,20 m e 0,20-0,40 m, respectivamente. O intervalo hídrico ótimo (IHO) corresponde à área hachurada no gráfico.

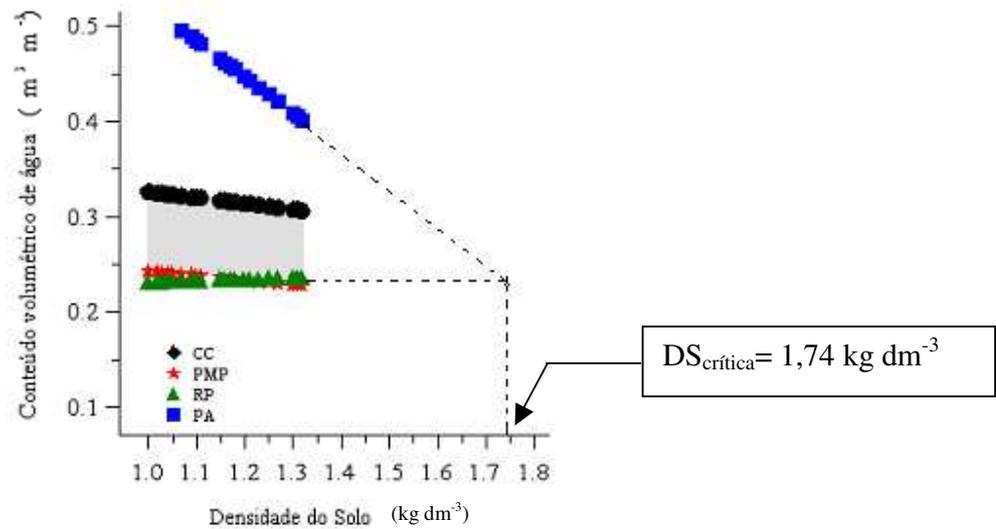


Figura 6. Variação do teor de água (θ) em função da densidade do solo (D_s) nos limites críticos de capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), porosidade de aeração de 10% (PA) e resistência do solo à penetração de 2,0 MPa (RP). A área hachurada representa o Intervalo Hídrico Ótimo do solo (IHO) do solo para a profundidade 0,0-0,2 m.

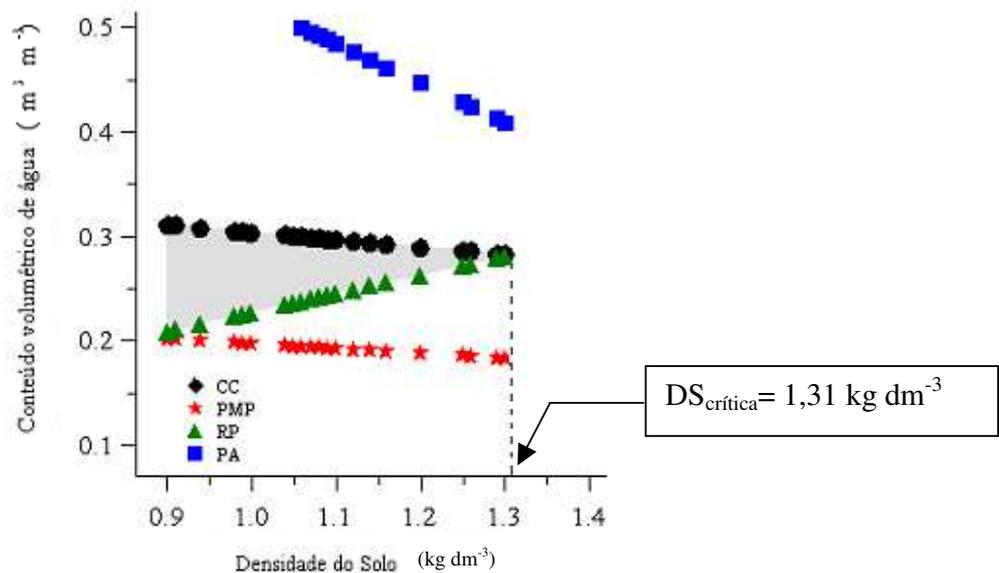


Figura 7. Variação do teor de água (θ) em função da densidade do solo (D_s) nos limites críticos de capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), porosidade de aeração de 10% (PA) e resistência do solo à penetração de 2,0 MPa (RP). A área hachurada representa o Intervalo Hídrico Ótimo do solo (IHO) do solo para a profundidade 0,20-0,40 m.

Observa-se na Figura 6, que a umidade do solo na capacidade de campo (θ_{CC}) na camada 0-0,20m decresceu com o aumento da densidade do solo, assim como ocorreu com a umidade do solo no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), pouco afetando o conteúdo de água disponível no solo ($\theta_{CC} - \theta_{PMP}$) ao longo de toda a faixa de variação da densidade do solo. O mesmo pode ser observado na figura 7, para a profundidade de 0,20 – 0,40m. Em ambas as camadas, (θ_{CC}) e (θ_{PMP}) variaram negativamente com o aumento da densidade do solo. FREDDI et al. (2006) e CAVALIERI et al. (2006) verificaram que o aumento da D_s influenciou positivamente a variação de água disponível do solo ($\theta_{CC} - \theta_{PMP}$), ressaltando que tal comportamento seria justificado pela redução da macroporosidade e pela redistribuição dos tamanhos dos poros. VAN DEN BERG (1997) também verificou o aumento do conteúdo de água retido no ponto de murcha permanente com o aumento da densidade do solo pode ser atribuído ao aumento do número de partículas disponíveis para a retenção de água por unidade de volume de solo, oriundo da compactação do solo.

Com o aumento da D_s , observa-se para a profundidade 0,0-0,20 m que θ_{CC} determinou o limite superior do IHO e que θ_{PMP} o limite inferior do IHO até a D_s de cerca de $1,2 \text{ kg dm}^{-3}$, quando então θ_{RP} é que passou a definir o limite inferior do mesmo. Assim, nessa profundidade somente θ_{PA} não é limitante, em toda faixa de variação de D_s . Tais resultados estão de acordo com os obtidos por TORMENA et al. (1998) e BEUTLER et al. (2004), que constataram para solos tropicais que o IHO é limitado na parte superior pelo conteúdo de água na capacidade de campo e na parte inferior, pela umidade em que a RP atinge o valor crítico definido.

TORMENA et al. (1999) observaram a substituição da θ_{PMP} pela θ_{RP} , como limite inferior do IHO para valores de D_s acima de $1,09 \text{ kg dm}^{-3}$ em um LATOSSOLO, enquanto que ARAUJO et al. (2004) observaram este fato para $D_s \geq 1,55 \text{ kg dm}^{-3}$.

Na profundidade 0,20-0,40 m, o limite inferior do IHO foi determinado pela θ_{RP} em toda faixa de variação da D_s , sendo que θ_{PA} e θ_{PMP} não limitaram o valor do IHO. Tais resultados são indicativos de pior qualidade estrutural do solo nessa camada, em relação à camada superior. SILVA (2003) em um LATOSSOLO VERMELHO Distróferrico típico (600 g kg^{-1} de argila) também constatou que a θ_{RP} limitou o IHO em toda faixa de variação da D_s , indicando que os valores de D_s encontrados neste solo estão restringindo os valores do IHO.

Estes resultados estão de acordo com os obtidos por TOPP et al. (1994), SILVA et al. (1994), TORMENA et al. (1998 e 1999) e IMHOFF et al. (2001) e CAVALIERI et al. (2006), nos quais a RP foi o fator que mais freqüentemente reduziu o IHO.

SILVA et al. (1994) definiram densidade crítica do solo (Dsc) como sendo a interseção dos limites, superior e inferior do IHO ou o ponto onde o mesmo se torna nulo. O presente estudo, valores de densidade crítica do solo correspondem à cerca de 1,74 kg dm⁻³ na camada 0,0-0,20 m e de 1,31 kg dm⁻³ na camada 0,20-0,40 m. O valor de Dsc na camada de 0-0,20 m é superior àqueles encontrados por TORMENA et al. (1998,1999) em um LATOSSOLO de textura muito argilosa que também adotaram o valor de 2MPa como valor limitante de RP. Já na profundidade de 0,20-0,40 m, o valor de Dsc critica obtido neste trabalho encontra-se bem próximo dos valores encontrados na literatura, quando o valor adotado de RP foi de 2 MPa.

KLEIN e CAMARA (2007) obtiveram valores próximos de Dsc critica, independentemente da RP limitante adotada (2MPa e 3 MPa), confirmando que esse limite é inerente ao solo, independentemente do manejo adotado. Tais resultados concordam em parte com a proposta apresentada por REICHERT et al. (2003) de uma classificação da densidade limitante de acordo com o teor de argila do solo, sugerindo para solos muito argilosos (>60% argila) valores entre 1,25 e 1,30 Mg m⁻³, quando se assume RP limitante de 2MPa.

LEÃO et. al. (2004), na avaliação da qualidade física do solo sob sistemas de pastejo contínuo e rotacionado, obtiveram Dsc igual a 1,43 kg dm⁻³ para o LATOSSOLO VERMELHO Distrófico (399 g kg⁻¹ de argila). Já FREDDI et al. (2006) obtiveram Dsc=1,46 kg dm⁻³ para a cultura do milho sob LATOSSOLO VERMELHO de textura média, sendo que e a partir de 1,16 kg dm⁻³ a RP já se tornou fator restritivo para o crescimento de plantas.

PETEAN et al. (2006) observaram em um LATOSSOLO VERMELHO Distroférrico que o IHO sofreu redução com o aumento da densidade até valores de 1,39 kg dm⁻³, a qual foi assumida como a densidade do solo crítica . Para valores de densidade do solo acima do valor crítico de 1,39 kg dm⁻³, os autores concluíram que as condições físicas do solo são altamente restritivas, independentemente da umidade do solo, seja pela reduzida aeração ou pela excessiva resistência do solo à penetração. No caso do presente trabalho, as mesmas considerações são válidas para a profundidade 0,20-0,40 m, a partir da densidade crítica Dsc = 1,31 kg dm⁻³. Já para a profundidade 0-0,20 m, não há restrição importante do IHO em toda faixa de variação da Ds caracterizada na pesquisa.

ARAUJO et al. (2004), trabalhando em um solo sob mata nativa, obtiveram como limite superior e inferior para o IHO os valores de umidade correspondentes à CC e ao PMP. Os mesmos autores citam que o IHO foi menor no solo cultivado (LATOSSOLO VERMELHO Distrófico, 230 g kg⁻¹ de argila), uma vez que nesse caso a resistência do solo à penetração e a porosidade de aeração é que determinaram os limites, inferior e superior, de água disponível, na faixa de variação da densidade. Estes resultados evidenciam que, sob mata nativa, os solos apresentam condições físicas mais adequadas ao crescimento de raízes.

O presente trabalho, para a camada de 0-0,20 m, o valor de D_s de 1,2 kg dm⁻³, no qual a θ_{RP} substitui a θ_{PMP} como limite inferior do IHO (Figura 8), restringindo-o, representa o limite inferior de D_s indicativo de degradação da qualidade estrutural do solo nessa profundidade. Alterações no manejo do solo podem evitar o agravamento do problema de compactação. Já para camada de 0,20-0,40 m, o valor da D_s indicativo de degradação é mais baixo de aproximadamente 1,0 kg dm⁻³. Conforme SILVA e KAY (1997), o valor de D_s em que a θ_{PA} substitui a θ_{CC} como limite superior também deve ser levado em consideração na análise do IHO. No entanto, neste estudo para ambas profundidades analisadas, o limite superior foi representado pela θ_{CC} em todos os valores de D_s abaixo da D_{sc} .

A θ_{PA} não foi o fator limitante no solo em ambas profundidades analisadas, uma vez que a θ_{CC} foi o limite superior do IHO na faixa de variação da densidade do solo. Tal resultado pode ser atribuído à elevada porosidade total em geral presente nos LATOSSOLOS, onde problemas de aeração são observados em casos de compactação severa, excesso de umidade ou elevado conteúdo de argila, em alguns casos. LEAO (2002) avaliou o IHO em diferentes sistemas de pastejo e manejo da pastagem em LATOSSOLO VERMELHO Distrófico de textura argilosa e também constatou que a θ_{PA} não foi o fator limitante.

Conclui-se que o conhecimento do IHO possibilita definir que componente físico está limitando o crescimento das plantas sendo útil para estabelecer estratégias de manejo do solo para aumentar ou restaurar o IHO. Quando o limite superior é a θ_{PA} e o limite inferior é a θ_{RP} , alterações no manejo do solo devem ser implementadas para melhoria da qualidade estrutural do solo e restauração do IHO. Porém, quando o limite superior e o limite inferior do IHO correspondem às curvas de umidade do solo na θ_{CC} e no PMP, pode-se inferir que o manejo possibilita condições físicas satisfatórias, desde que o fornecimento de água não seja limitante.

4.2. Avaliação do efeito do sistema plantio direto (SPD) e do sistema convencional (SC) na qualidade estrutural do Latossolo Vermelho Distroférico típico utilizando como indicador o IHO.

4.2.1. Caracterização da densidade do solo nas safras 2003/04, 2004/05 e 2005/06.

Na Tabela 5, verifica-se a estatística descritiva da densidade do solo para o conjunto de amostras coletadas em três safras agrícolas e em duas profundidades. Observou-se que os valores de densidade do solo compõem uma distribuição cuja média é menos que 1% maior ou menor que a mediana, estando bem próximos um do outro, revelando uma distribuição simétrica para esse atributo.

O coeficiente de variação obtido para os dois sistemas de preparo nas três safras agrícolas e duas profundidades permitem caracterizar este atributo como sendo de baixa variabilidade ($CV < 12\%$), de acordo com o critério de WARRICK e NIELSEN (1980). Os valores de densidade do solo apresentaram normalidade em nível de probabilidade de 1% nas três safras agrícolas e nas duas profundidades analisadas. Baixa variabilidade e distribuição normal dos valores de densidade do solo tem sido verificadas por diversos autores como SOUZA et al. (2001), SILVA et al. (2006).

Na safra 2003/04, na profundidade de 0-0,20 m, o valor médio de D_s foi de 1,35 kg dm^{-3} para o sistema plantio direto (SPD) e de 1,29 kg dm^{-3} para o sistema convencional. Já na profundidade de 0,20-0,40 m os valores observados foram de 1,38 e 1,30 kg dm^{-3} , respectivamente. Os valores máximos e mínimos observados na profundidade de 0-0,20 m foram de 1,54 e 1,18 kg dm^{-3} , para o sistema plantio direto (SPD), e de 1,49 e 1,03 kg dm^{-3} , para o sistema convencional (SC).

Na safra 2004/05, na profundidade de 0-0,20 m, o valor médio de D_s foi de 1,16 kg dm^{-3} para o SPD e de 1,21 kg dm^{-3} para o SC, enquanto na profundidade de 0,20-0,40 m os valores observados foram de 1,13 e 1,20 kg dm^{-3} , respectivamente. Observa-se ainda na Tabela 5 que os valores em ambas as profundidades analisadas para os dois tratamentos foram menores nesta safra que aqueles do primeiro ano agrícola.

Tabela 5. Estatística descritiva da densidade do solo em dois sistemas de manejo, sistema plantio direto (SPD) e sistema convencional (SC) nas duas profundidades (0,00-0,20; 0,20-0,40 m). Campinas-(SP).

SAFRA 2003/04													
Profundidade 0,00-0,20 m													
Atributos	Média		Mediana		s		Min.		Máx.		CV (%)		
	SPD	SC	SPD	SC	SPD	SC	SPD	SC	SPD	SC	SPD	SC	
Ds (kg dm ⁻³)	1,35A	1,29B	1,35	1,30	0,07	0,09	1,18	1,03	1,54	1,49	5,19	7,52	
Profundidade 0,20-0,40 m													
Atributos	Média		Mediana		s		Min.		Máx.		CV (%)		
	SPD	SC	SPD	SC	SPD	SC	SPD	SC	SPD	SC	SPD	SC	
Ds (kg dm ⁻³)	1,38A	1,30B	1,38	1,31	0,07	0,08	1,17	1,05	1,59	1,51	4,96	6,84	
SAFRA 2004/05													
Profundidade 0,00-0,20 m													
Atributos	Média		Mediana		s		Min.		Máx.		CV (%)		
	SPD	SC	SPD	SC	SPD	SC	SPD	SC	SPD	SC	SPD	SC	
Ds (kg dm ⁻³)	1,16A	1,21B	1,18	1,22	0,09	0,07	0,90	1,04	1,30	1,36	7,83	6,19	
Profundidade 0,20-0,40 m													
Atributos	Média		Mediana		s		Min.		Máx.		CV (%)		
	SPD	SC	SPD	SC	SPD	SC	SPD	SC	SPD	SC	SPD	SC	
Ds (kg dm ⁻³)	1,13A	1,20B	1,12	1,20	0,07	0,09	0,98	1,02	1,30	1,39	6,35	7,98	
SAFRA 2005/06													
Profundidade 0,00-0,20 m													
Atributos	Média		Mediana		s		Min.		Máx.		CV (%)		
	SPD	SC	SPD	SC	SPD	SC	SPD	SC	SPD	SC	SPD	SC	
Ds (kg dm ⁻³)	1,22A	1,25B	1,23	1,24	0,08	0,08	1,08	1,12	1,40	1,41	6,51	6,49	
Profundidade 0,20-0,40 m													
Atributos	Média		Mediana		s		Min.		Máx.		CV (%)		
	SPD	SC	SPD	SC	SPD	SC	SPD	SC	SPD	SC	SPD	SC	
Ds (kg dm ⁻³)	1,27A	1,37B	1,29	1,34	0,09	0,13	1,06	1,18	1,43	2,03	7,81	9,55	

s = desvio padrão; CV = coeficiente de variação; Min. = mínimo; Max. = máximo; Ds = densidade do solo; Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade (p < 0,05).

Já na safra 2005/06, os valores de densidade do solo em ambas as profundidades analisadas para os diferentes sistemas de manejo voltam a aumentar, mas sem atingir os valores de 2003/04, sendo que na profundidade de 0-0,20 m, o valor médio foi de 1,22 kg dm⁻³ para o SPD e de 1,25 kg dm⁻³ para o SC. Já na profundidade de 0,20-0,40 m, os valores observados foram de 1,27 e 1,29 kg dm⁻³, respectivamente.

Os resultados da análise de variância da Ds nas profundidades de 0-0,20 m e 0,20-0,40 m para três safras agrícolas estão apresentados na Tabela 5. Observa-se que os sistemas de manejo (SPD e SC) proporcionaram diferenças estatisticamente significativas na Ds ($p < 0,05$), em todas as safras analisadas. Na safra 2003/04, a densidade do solo no SPD foi superior à do SC, para ambas profundidades. Segundo TORMENA et al. (1998), isto pode ser devido ao reduzido revolvimento do solo, à acomodação natural das partículas e ao tráfego contínuo de máquinas e implementos na superfície do solo.

Maiores valores de densidade do solo no SPD, comparado com outros sistemas de manejo, têm sido constatados por outros autores em estudos conduzidos no Brasil e em outros países (CENTURION e DEMATTÊ, 1985; HILL, 1990; STONE e SILVEIRA, 2001; KLEIN e LIBARDI, 2002).

No SC, ao contrário, os menores valores de Ds podem ser atribuídos ao revolvimento do solo e à incorporação dos resíduos culturais. Os resultados obtidos para o primeiro ano agrícola (safra 2003/04) estão de acordo com aqueles relatados por TORMENA et al. (1998); DE MARIA et al. (1999) os quais verificaram que os valores de densidade do solo foram superiores no sistema plantio direto em relação ao sistema convencional.

VIEIRA (1981) e VIEIRA e MUZILLI (1984) citam que o solo sob sistema plantio direto, na camada de 0-0,20 m, tem-se caracterizado por apresentar maior estabilidade estrutural, maior densidade do solo e menores valores de porosidade total e de macroporosidade, em comparação com o solo sob outros sistemas de manejo.

A partir do segundo ano agrícola, safras 2004/05 e 2005/06, houve uma melhoria gradativa das condições do solo no SPD, com a redução do valor da densidade do solo. Tal fato indica que as condições negativas na Ds advindas do plantio direto podem ser revertidas ao longo dos anos com a manutenção do sistema. ASSIS e LANÇAS (2004) verificaram uma diminuição da densidade do solo de acordo com o tempo de adoção no sistema plantio direto, a partir dos 12 anos, sendo que se deve observar que os resultados relacionados com os sistemas de manejo do solo apresentam uma diversidade de respostas a um mesmo sistema, por causa de características do solo, da planta, do clima e outros. Os maiores valores de densidade do solo nos primeiros anos de implantação do sistema plantio direto se devem ao não revolvimento do solo e com o passar dos anos o efeito nocivo dessa compactação desaparece, à medida que o plantio direto se estabelece adequadamente.

FERNANDES et al. (1983) complementam ainda que a diminuição da densidade do solo e a melhoria da estrutura da camada superficial do solo sob plantio direto, com o passar dos anos, ocorreu em parte, pelo aumento do conteúdo de matéria orgânica. Isto mostra que o adequado manejo do solo pode minimizar ou mesmo eliminar os efeitos da compactação advindos do tráfego de máquinas e implementos na lavoura.

Já o principal motivo do aumento da densidade do solo ao longo do tempo no sistema convencional pode estar associado com sucessivas operações de preparo, com a acomodação do solo após sucessivos ciclos de molhamento e secagem, com o impacto das gotas de chuva e com a desagregação do solo.

Atribui-se o aumento em termos absolutos dos valores de densidade do solo na safra 2005/06, em ambas profundidades e nos dois sistemas de manejo, à introdução de colheitadeira mecânica na área nesta safra, o que não ocorreu nos anos anteriores, quando a colheita foi realizada manualmente. Porém, observa-se que os valores estão abaixo dos valores determinados no primeiro ano agrícola (safra 2003/04).

COSTA et al. (2003) relataram que o solo sob plantio direto apresentou melhores condições estruturais, evidenciadas principalmente pela redução da densidade do solo em subsuperfície e pelo aumento da estabilidade de agregados na camada superficial.

A condição física do solo para o crescimento de plantas em cada um dos tratamentos foi analisada em função da distribuição dos valores de D_s dentro da amplitude de variação do IHO em três safras agrícolas e duas profundidades, conforme pode ser observado nas Figuras 8 a 11.

Para a profundidade 0-0,20 m, na condição do experimento, não tendo sido atingida a D_{sc} de $1,73 \text{ kg dm}^{-3}$, as limitações decorrentes da variação da D_s se relacionam com o aumento da RP. TORMENA et al. (2007) concluíram em seu estudo que a resistência do solo à penetração determinou o limite inferior do IHO em toda variação de densidade observada sob sistema plantio direto com sucessão de culturas, plantio direto com rotação de culturas e plantio direto com rotação de culturas e escarificação em um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico.

Na safra agrícola 2003/04, observa-se que o SPD apresentou a pior condição física do solo para o crescimento de plantas, pois 90% dos valores de D_s configuraram limitações quanto à resistência do solo à penetração (D_s superior a $1,2 \text{ kg dm}^{-3}$) (Figura 8a). Para a

mesma safra e profundidade, a condição do solo sob SC esteve melhor, uma vez que menos de 75% dos valores configuravam limitações à RP (Figura 9a).

Já para as safras seguintes (safra 2004/05 e 2005/06), observa-se que a condição física do solo sob SPD nessa profundidade esteve melhor, pois apenas 41%, em 2004/05, e 30% (2005/06) dos valores de Ds estiveram acima cerca de $1,2 \text{ kg dm}^{-3}$, ou seja, a maioria dos valores estiveram dentro na faixa de valores de Ds em que o IHO é máximo (Figura 8b,c). Nas duas safras, a condição do solo sob SC foi pior em relação ao SPD, uma vez que 58% e 73% dos valores de Ds, respectivamente em 2004/05 e 2005/06, configuraram limitações relacionadas com a RP (Figura 9b,c). Porém, observa-se que tais valores em ambos os sistemas de manejo nas três safras agrícolas para esta profundidade (0-0,20 m) estão abaixo da Dsc, indicando que os dois sistemas não induziram à degradação física severa.

Para a profundidade 0,20-0,40m, a distribuição de valores de Ds revela maiores limitações ao crescimento de planta, uma vez que em toda a faixa de variação avaliada da densidade do solo a curva da RP foi o limite inferior do IHO. No primeiro ano agrícola (safra 2003/04), cerca de 80% dos valores de Ds sob SPD configuram limitações ao crescimento de plantas por serem superior à Dsc ($1,31 \text{ kg dm}^{-3}$) (Figura 10a). A condição do solo sob SC foi melhor, pois apenas 50 % dos valores de Ds estiveram superiores a Dsc (Figura 11a).

Porém, nas duas safras seguintes, 2004/05 e 2005/06, a situação se inverteu, observando-se que o SC é que apresentou a maior proporção de valores superiores de Ds em relação ao SPD, de cerca de 20% (contra 0% do SPD) safra 2004/05, e de 80% contra 50% do SPD, safra 2005/06 (Figura 10b,c; Figura 11b, c). Para valores de densidade do solo acima do valor crítico de $1,31 \text{ kg dm}^{-3}$, as condições físicas do solo são altamente restritivas, independentemente da umidade do solo.

Observa-se de um modo geral, que o solo sob SPD a partir do segundo ano nas duas profundidades estudadas passa a ter melhor condição física para o crescimento de plantas em relação ao solo sob SC, com distribuição da maior parte dos valores de densidade do solo dentro do IHO.

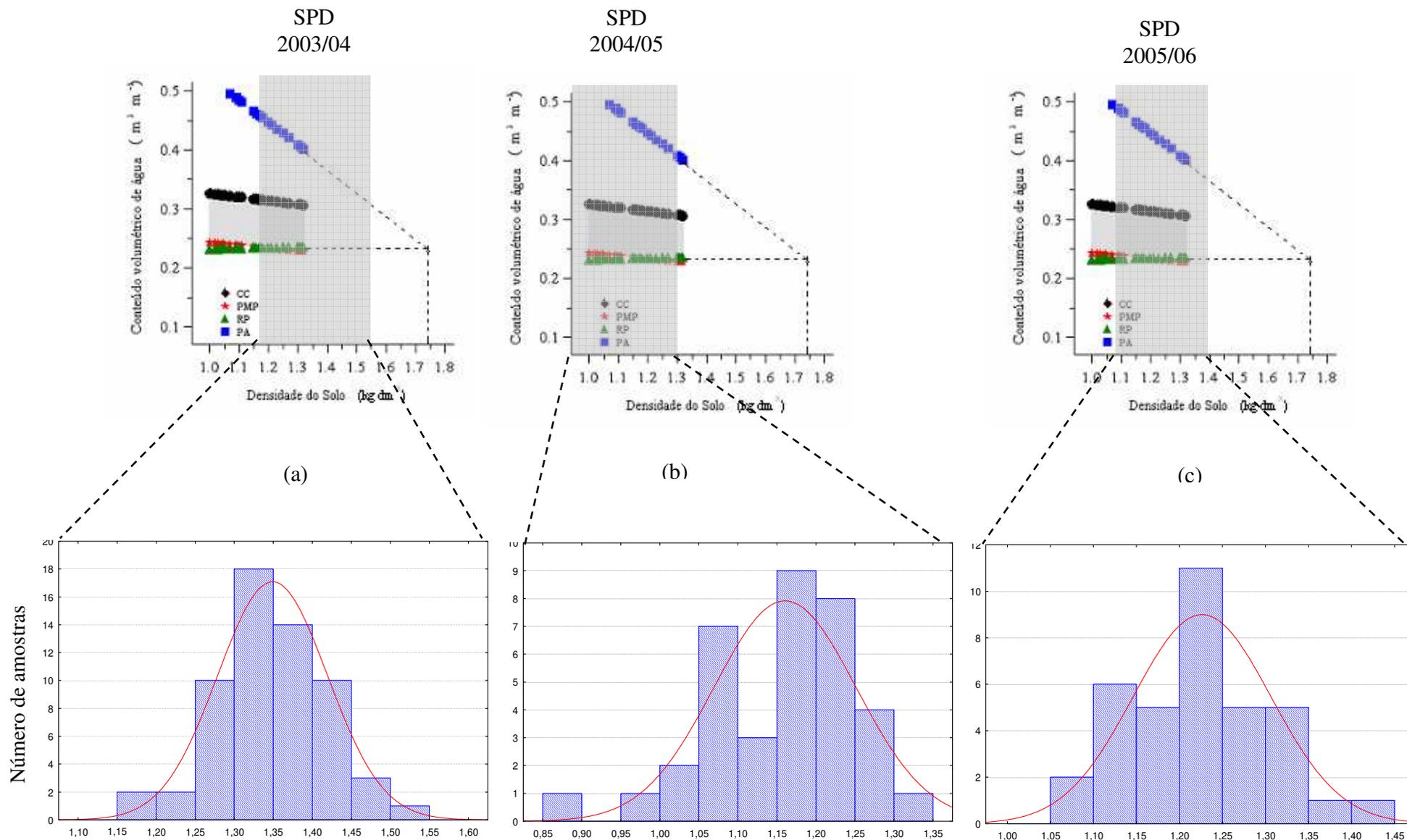


Figura 8. Representação gráfica dos valores de densidade do solo no sistema plantio direto (SPD) ao longo de três anos agrícolas na profundidade de 0-0,20 m. A área hachurada corresponde ao intervalo Hídrico Ótimo (IHO) e as colunas correspondem ao valor mínimo e máximo da densidade do solo obtidos em cada safra: (a) safra 2003/04; (b) safra 2004/05; (c) safra 2005/06.

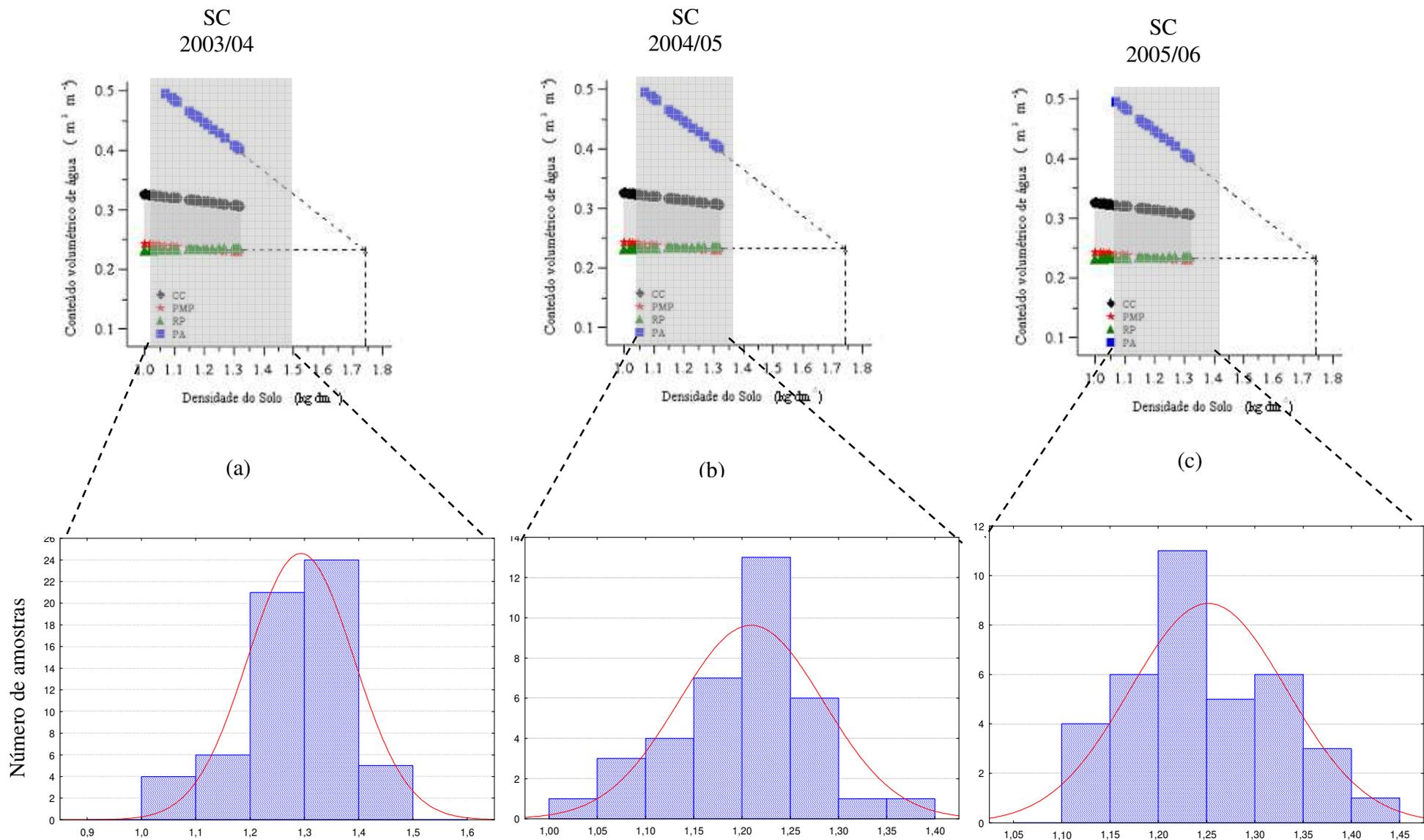


Figura 9. Representação gráfica dos valores de densidade do solo no sistema convencional (SC) ao longo de três anos agrícolas na profundidade de 0-0,20 m. A área hachurada corresponde ao intervalo Hídrico Ótimo (IHO) e as colunas correspondem ao valor mínimo e máximo da densidade do solo obtidos em cada safra: (a) safra 2003/04; (b) safra 2004/05; (c) safra 2005/06.

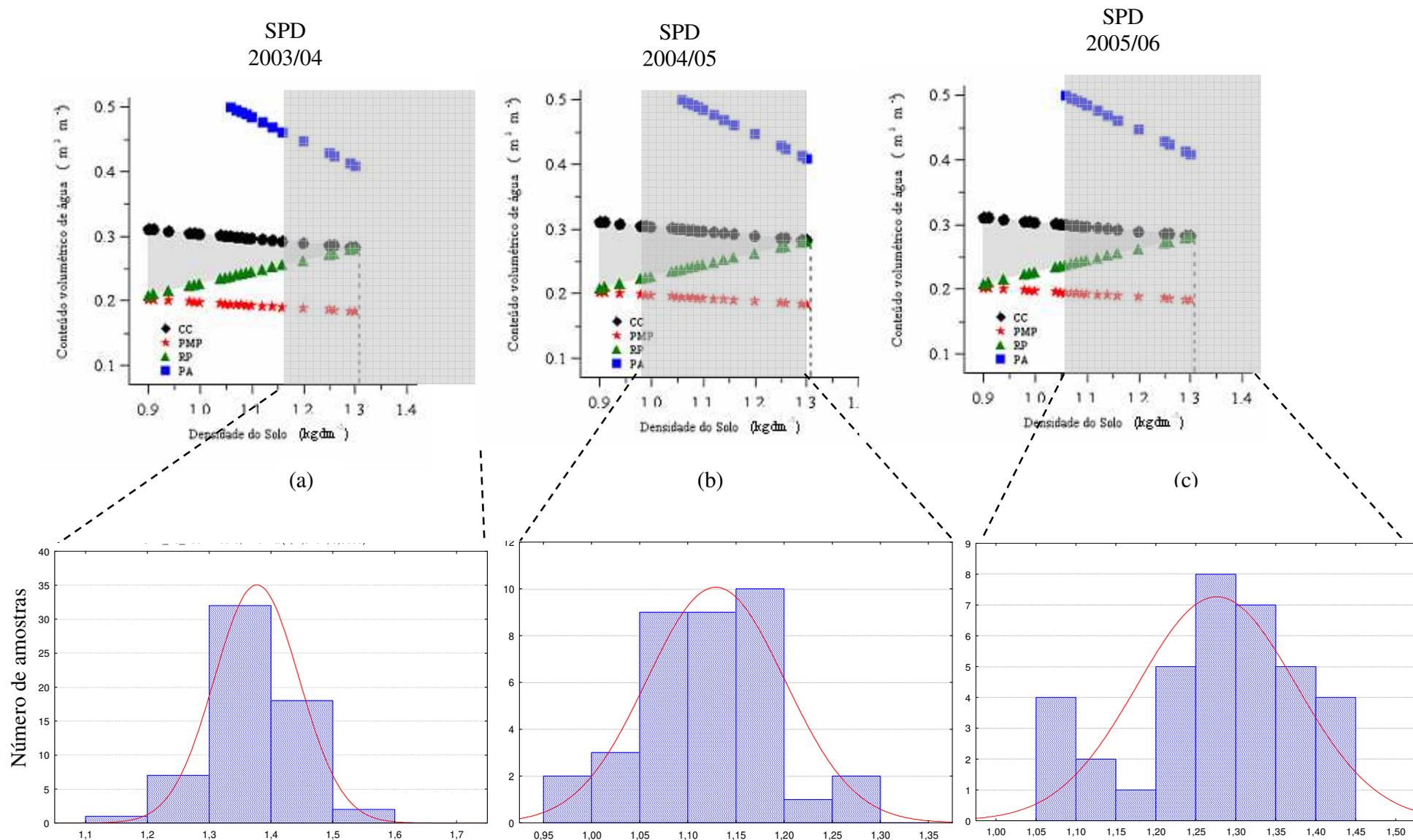


Figura 10. Representação gráfica dos valores de densidade do solo no sistema plantio direto (SPD) ao longo de três anos agrícolas na profundidade de 0,20-0,40 m. A área hachurada corresponde ao intervalo Hídrico Ótimo (IHO) e as colunas correspondem ao valor mínimo e máximo da densidade do solo obtidos em cada safra: (a) safra 2003/04; (b) safra 2004/05; (c) safra 2005/06.

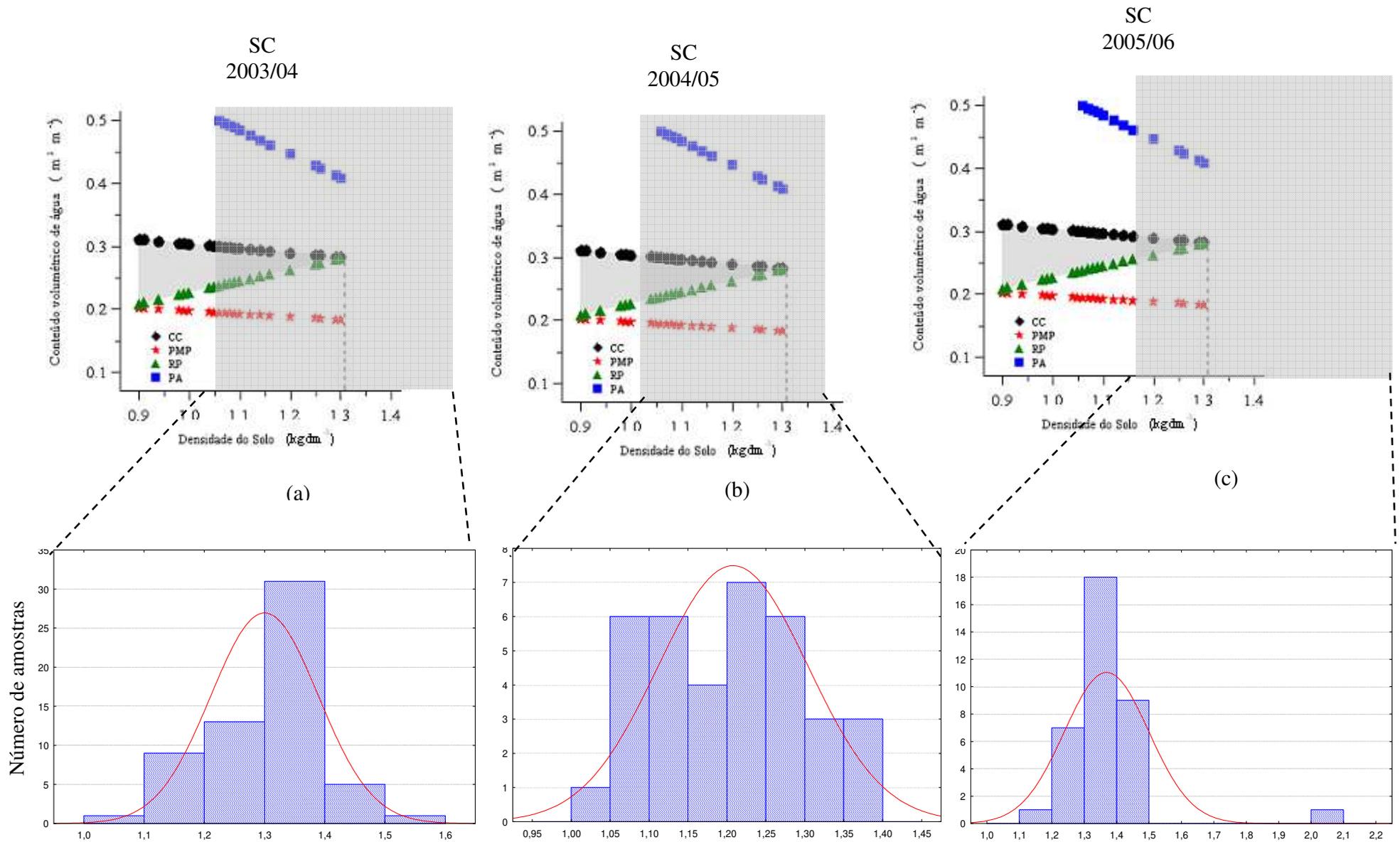


Figura 11. Representação gráfica dos valores de densidade do solo no sistema convencional (SC) ao longo de três anos agrícolas na profundidade de 0,20-0,40 m. A área hachurada corresponde ao intervalo Hídrico Ótimo (IHO) e as colunas correspondem ao valor mínimo e máximo da densidade do solo obtidos em cada safra: (a) safra 2003/04; (b) safra 2004/05; (c) safra 2005/06.

Na profundidade de 0-0,20 m não foram observados valores de densidade do solo iguais ou maiores que a Dsc, nos dois sistemas de manejo estudados (SPD e SC) nas três safras agrícolas. Isto indica que nesta profundidade o manejo adotado ao longo dos três anos não induziu à degradação severa da qualidade física do solo, não havendo restrições ao crescimento das raízes.

Na camada de 0,20-0,40 m, no primeiro ano agrícola (safra 2003/04), o SPD apresentou condições físicas mais limitantes ao crescimento das plantas em relação ao SC, tendo em vista que cerca de 80% das amostras do SPD apresentaram $D_s > D_{sc}$ contra 50% do SC (Figura 12).

Segundo IMHOFF et al.(2001), valores de densidade do solo maiores que a Dsc indicam condições físicas severamente restritivas para o desenvolvimento das raízes e, conseqüentemente, para a produtividade das culturas. Quanto maior a frequência de valores de $D_s > D_{sc}$, maior indicação de reduzida qualidade estrutural do solo, maiores riscos de as culturas serem expostas a situações de estresses físicos por reduzida oxigenação do solo ou por elevados valores de resistência do solo à penetração.

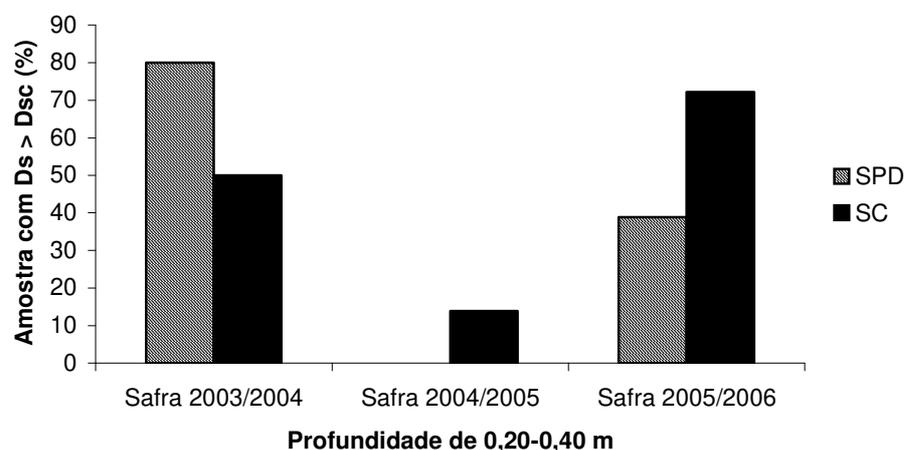


Figura 12. Percentagem de amostras com D_s acima da densidade crítica ($D_{sc} = 1,31 \text{ kg dm}^{-3}$) na profundidade de 0,20-0,40 m, para cada sistema de preparo em três safras agrícolas. SPD= sistema plantio direto; SC= sistema convencional.

Porém, nas duas safras seguintes, 2004/05 e 2005/06, a situação se inverteu, observando-se que o SC é que apresentou a maior proporção de valores de D_s superiores à D_{sc}

em relação ao SPD, de cerca de 14 % (contra 0% do SPD) e de 72% contra 39% do SPD, respectivamente.

Concluindo, a densidade crítica do solo estimada a partir do IHO e a distribuição da densidade do solo de cada sistema de manejo dentro da amplitude do IHO, mostraram-se ferramentas úteis no monitoramento da qualidade física do solo para o crescimento das culturas.

4.2.2. Produção e atributos biométricos da cultura do milho em três safras agrícolas e sua relação com a qualidade estrutural do solo

O IHO é uma ferramenta útil para avaliar a qualidade estrutural do solo e o impacto das práticas de manejo sobre a produtividade sustentável, com a vantagem de relacionar as limitações do solo diretamente com os fatores de resposta das culturas. Em virtude disso, neste trabalho tanto a produção e como variáveis biométricas da cultura foram empregadas com variáveis-resposta para avaliar a performance dos dois sistemas de manejo. Uma melhor ou pior performance poderá ser, então, relacionada com a condição física do solo, caracterizado pelo IHO e pelo monitoramento da Ds.

Os dados de produção da cultura analisados apresentaram normalidade, com valores de probabilidade de SHAPIRO-WILK maiores que 1%, sendo que a Tabela 6 apresenta as estatísticas descritivas. Observando-se os coeficientes de variação, constata-se que a maioria dos valores de produtividade de todas as safras analisadas apresenta baixa variabilidade ($CV < 12\%$). Exceções incluem a produtividade do SPD na safra agrícola 2003/04 e a produtividade do SC na safra agrícola 2004/05, que apresentaram média variabilidade ($12\% < CV < 60\%$), segundo o critério apresentado por WARRICK e NIELSEN (1980).

Tabela 6. Estatística descritiva da produtividade da cultura do milho (Mg ha^{-1}) nas três safras agrícolas sob dois sistemas de preparo. Campinas-(SP).

Safra 2003/04					
Produtividade (Mg ha^{-1})					
Preparo	Média	Min.	Max.	s	CV (%)
SPD	8,91A	8,07	10,94	1,36	15,28
SC	7,83A	7,55	8,16	0,26	3,30
Safra 2004/05					
Produtividade (Mg ha^{-1})					
Preparo	Média	Min.	Max.	s	CV (%)
SPD	7,12A	6,73	7,44	0,29	4,21
SC	7,18A	5,99	8,88	1,27	17,76
Safra 2005/06					
Produtividade (Mg ha^{-1})					
Preparo	Média	Min.	Max.	s	CV (%)
SPD	7,02A	6,85	7,22	0,16	2,27
SC	5,67B	5,31	6,58	0,61	10,72

s = desvio padrão; CV = coeficiente de variação; Min. = mínimo; Max. = máximo. Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade ($p < 0,05$).

Os resultados da análise de variância (Tabela 6) mostram haver diferenças significativas de produtividade do milho somente na safra agrícola 2005/06, com as maiores produtividades no SPD. As análises das safras anteriores (2003/04 e 2004/05) mostraram que os valores de produtividade não diferem entre tratamentos, embora no primeiro ano agrícola (safra 2003/04) a cultura do milho no SPD produziu cerca de 12,1% (1.083 Mg ha^{-1}) a mais que no SC. A ausência de diferenças estatísticas deve-se ao elevado coeficiente de variação (CV).

MULLER et al. (2001) ressaltam que avaliações de produtividade da cultura da soja indicaram maior produtividade no sistema plantio direto, ainda que o solo apresentasse maiores valores de densidade do solo e de resistência do solo à penetração na camada de 0-0,20 m. Tais autores relatam que tal fato pode ser atribuído à presença das plantas de cobertura no sistema plantio direto, no caso aveia preta e nabo forrageiro, que influenciou positivamente a qualidade física do solo, pelo fato das raízes crescerem em profundidade e em camadas de maior compactação do solo.

No entanto, como já caracterizado, a qualidade estrutural do solo, no SPD esteve pior neste ano agrícola (safra 2003/04) em relação ao SC, com base nos maiores valores de Ds.

Nesta safra, não foi observado déficit hídrico durante a fase de crescimento e desenvolvimento da cultura de milho (Anexo 1/Apêndice 3), indicando que sob condição de umidade mais favorável a parcela compactada (SPD) não teve seu rendimento reduzido.

No segundo ano agrícola (safra 2004/05), as produtividades dos dois sistemas não diferiram significativamente ($p < 0,05$), com ligeira vantagem para o SC, que produziu cerca de 0,77% ($0,055 \text{ Mg ha}^{-1}$) a mais. Nessa safra ocorreu à inversão da condição física do solo, ou seja, maiores valores de Ds ocorreram na camada superficial e subsuperficial (Tabela 5) no SC. De certa maneira, a compactação do solo determina as relações entre ar, água e temperatura que influenciam a germinação, a emergência das plântulas, o crescimento radicular e, praticamente todas as fases do desenvolvimento.

Nessa safra (2004/05), diferente do ano anterior, ocorreu um déficit hídrico durante o ciclo da cultura (cerca de 25 dias), na fase de pendoamento e granação do milho (Anexo 2/Apêndice 3), que pode explicar a redução da produtividade nos dois sistemas de manejo.

De acordo com BERGAMASCHI (1992), o déficit hídrico afeta praticamente todos os aspectos relacionados ao desenvolvimento das plantas, reduzindo a área foliar, diminuindo a fotossíntese e afetando vários outros processos, além de alterar o ambiente físico das culturas, por modificar o balanço de energia do sistema. TOMMASSELLI e VILLA NOVA (1994) complementam ainda que apesar do milho ser uma cultura com boa resistência às adversidades climáticas, a produtividade pode ser bastante reduzida devido à deficiência hídrica, principalmente quando ocorre em torno do período de florescimento. Ainda, segundo os mesmos autores, as maiores exigências de umidade (ou chuva) da planta de milho ocorrem nas épocas de germinação, florescimento e enchimento de grãos. A falta de água na ocasião do pendoamento pode provocar uma perda de produção ao redor de 50-60% ,ao passo que depois da polinização (até 15-20 dias) pode ocorrer queda aproximada de 30%.

RADFORD et al. (2001), trabalhando com diferentes níveis de compactação em um VERTISSOLO na Austrália, verificaram que o rendimento do milho e do trigo foi reduzido, devido à redução do armazenamento de água e/ou eficiência no uso da água. Contudo tais autores constataram que, sob condições de baixa umidade do solo, o rendimento do milho nas parcelas compactadas foi maior do que nas que não receberam compactação adicional, enquanto que em condição de umidade mais favorável a parcela compactada obteve o menor rendimento. Isto poderia explicar a maior produção no sistema convencional (SC) obtida neste

trabalho, visto que na safra 2004/05 tal sistema apresentou condições físicas inadequadas que foram somadas a um déficit hídrico durante o ciclo da cultura.

Porém, na safra agrícola (2005/06) a boa condição física do solo (maior proporção de valores de D_s dentro do IHO), e possivelmente biológica, contribuiu para a maior produtividade do milho no SPD, significativamente superior à do sistema convencional (SC) (Tabela 6). Nesta safra, não foi observado déficit hídrico durante a fase de crescimento e desenvolvimento da cultura de milho (Anexo 3/ Apêndice 3), indicando que sob condição de umidade mais favorável o sistema de manejo com valores de D_s menores (SPD) não teve seu rendimento reduzido.

Em relação aos atributos biométricos da cultura, observou-se que os dados analisados apresentaram normalidade, com valores de probabilidade de SHAPIRO-WILK maiores que 1%, sendo que a Tabela 7 apresenta as estatísticas descritivas dos mesmos. Observando-se os coeficientes de variação em todas as safras, constata-se que a maioria dos atributos biométricos analisados apresenta baixa variabilidade ($CV < 12\%$). Exceção inclui o índice de espiga no SPD na safra agrícola 2004/05, que apresenta média variabilidade ($12\% < CV < 60\%$), segundo o critério apresentado por WARRICK e NIELSEN (1980).

No que diz respeito às avaliações dos parâmetros biométricos da cultura (altura de planta, massa de 1000 grãos e índice de espigas), observa-se que ocorrem diferenças significativas entre tratamentos para todos os parâmetros avaliados (Tabela 7). Para o atributo “altura das plantas”, observa-se diferença estatística ao nível de 5% de probabilidade nas três safras agrícolas analisadas (Tabela 7), sendo que o sistema plantio direto (SPD) apresentou maiores valores quando comparado ao sistema convencional (SC). MOODY et al. (1961) também verificam que a taxa de crescimento do milho em sistema plantio direto foi mais alta do que no preparo convencional. TRIPPLET e VAN DOREN (1977) informam que a cultura do milho é uma das que mais vigorosamente crescem sob condições de sistema plantio direto.

Para o atributo “índice de espigas” somente as safras (2004/05 e 2005/06) apresentaram diferenças significativas ao nível de 5% de probabilidade (Tabela 7). O índice de espiga por planta no sistema plantio direto (SPD) na safra (2004/05) variou de 1,00 a 1,33, com valor médio de 1,12, no sistema convencional (SC) variou de 1,06 a 1,46, com valor médio de 1,22, o que acabou acarretando rendimento ligeiramente superior no sistema convencional (SC). Porém, observa-se que no ano seguinte na safra agrícola (2005/06) o maior

rendimento ocorreu no sistema plantio direto (SPD), que obteve um índice médio de espiga superior ao do sistema convencional. Em relação ao atributo “massa de 1000 grãos”, observa-se que ocorreram diferenças estatísticas entre os tratamentos nas safras agrícolas 2003/04 e 2005/06 (Tabela 7), sendo que o sistema plantio direto (SPD) apresentou cerca de 12,20% e 9,20% a mais em relação ao sistema convencional, respectivamente. A safra 2004/05 mostrou que os valores não diferem significativamente entre tratamentos, sugerindo, no entanto, certa vantagem do sistema plantio direto (SPD), que produziu cerca de 2,8% a mais que o sistema convencional (SC).

Os resultados evidenciam que os parâmetros biométricos conseguiram diferenciar os tratamentos avaliados desde o primeiro ano do ensaio, mostrando-se sensíveis às variações da qualidade física do solo.

Tabela 7. Estatística descritiva dos atributos biométricos da cultura do milho nas três safras agrícolas sob dois sistemas de preparo. Campinas-(SP).

Safra 2003/2004					
Altura das plantas (cm)					
Preparo	Média	Min.	Max.	S	CV (%)
SPD	244,47 A	154	318	23,23	9,50
SC	238,72 B	163	293	24,57	10,29
Massa de 1000 grãos (g)					
Preparo	Média	Min.	Max.	s	CV (%)
SPD	396,64A	351,00	473,00	36,29	9,15
SC	348,25B	304,00	369,00	20,37	5,85
Índice de Espigas					
Preparo	Média	Min.	Max.	s	CV (%)
SPD	1,07A	0,95	1,20	0,08	7,83
SC	1,07A	1,00	1,25	0,07	6,74
Safra 2004/2005					
Altura das plantas (cm)					
Preparo	Média	Min.	Max.	S	CV (%)
SPD	283,24A	233,00	342,00	20,76	7,33
SC	263,54B	153,00	300,00	22,10	8,38
Massa de 1000 grãos (g)					
Preparo	Média	Min.	Max.	s	CV (%)
SPD	333,23A	302,50	370,60	20,01	6,61
SC	323,97A	291,00	350,34	20,90	6,45
Índice de Espigas					
Preparo	Média	Min.	Max.	s	CV (%)
SPD	1,12A	1,00	1,33	0,10	9,07
SC	1,22A	1,06	1,46	0,12	10,22
Safra 2005/2006					
Altura das plantas (cm)					
Preparo	Média	Min.	Max.	S	CV (%)
SPD	251,08A	127,00	305,00	22,62	9,01
SC	228,74B	147,00	323,00	22,18	9,69
Massa de 1000 grãos (g)					
Preparo	Média	Min.	Max.	s	CV (%)
SPD	330,81A	311,96	356,12	12,80	3,87
SC	300,40B	270,81	332,04	15,98	5,32
Índice de Espigas					
Preparo	Média	Min.	Max.	s	CV (%)
SPD	1,18A	1,00	1,45	0,15	12,71
SC	1,04B	1,00	1,20	0,06	6,21

s = desvio padrão; CV = coeficiente de variação; Min. = mínimo; Max. = máximo. Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade ($p < 0,05$).

4.3. Avaliação e quantificação da variação de umidade do solo sob sistema plantio direto (SPD) e sob sistema convencional (SC), irrigado e não irrigado de um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico típico utilizando o IHO.

4.3.1. Caracterização da densidade do solo na safra 2005/06 na cultura de inverno (feijão)

Na Tabela 8, mostra-se a estatística descritiva para a densidade do solo para o conjunto de valores obtido na safra agrícola 2005/06 na profundidade de 0-0,20 m, em dois sistemas de manejo (SPD e SC), com e sem irrigação (I e NI). Os coeficientes de variação obtidos permitem caracterizar este atributo como de baixa variabilidade ($CV < 12\%$), de acordo com o critério de WARRICK e NIELSEN (1980). A baixa variabilidade e tendência de uma distribuição normal dos dados de densidade do solo tem sido verificadas por diversos autores (SILVA et al., 2006; CAVALIERI et al., 2006), como já comentada.

Os valores de Ds variaram de 1,04 a 1,63 kg dm^{-3} no sistema plantio direto não irrigado (SPDNI); de 1,17 a 1,64 kg dm^{-3} no sistema plantio direto irrigado (SPDI); de 1,00 a 1,57 kg dm^{-3} no sistema convencional não irrigado (SCNI) e de 1,05 a 1,46 kg dm^{-3} no sistema convencional irrigado (SCI.), revelando uma ampla variação de condições estruturais e de dinâmica da água no solo.

Tabela 8. Estatística descritiva para os dados de densidade do solo (kg dm^{-3}) sob SPD e SC, com (I) e sem (NI) irrigação na profundidade de 0,00-0,20 m.

SAFRA 2005/2006						
Profundidade 0,00-0,20 m						
Tratamentos	Média	Mediana	s	Min.	Máx.	CV (%)
SPDNI	1,29A	1,29	0,091	1,04	1,63	7,02
SPDI	1,33B	1,33	0,082	1,17	1,64	6,16
SCNI	1,24C	1,25	0,103	1,00	1,57	8,33
SCI	1,25C	1,28	0,092	1,05	1,46	7,38

s = desvio padrão; CV = coeficiente de variação; Min. = mínimo; Max. = máximo; Ds = densidade do solo;

Os resultados da análise de variância da Ds mostram que a Ds foi significativamente superior ($p < 0,05$) no solo sob SPD irrigado (SPDI) em relação ao SPD não irrigado (SPDNI). E que as Ds em ambos os casos foram significativamente superiores em relação às do SC, com (I) e sem (NI) irrigação, que não diferiram entre si (Tabela 8). Diversos outros trabalhos

relataram que a densidade na camada de 0-0,20 m de profundidade no sistema plantio direto é maior que o sistema convencional (BEUTLER et al., 2001; DE MARIA et al., 1999).

Para valores de densidade do solo acima do valor crítico de $1,74 \text{ kg dm}^{-3}$ obtido para a camada de 0-0,20 m de profundidade no IHO, as condições físicas do solo são altamente restritivas, independentemente da umidade do solo, seja pela reduzida aeração ou pela excessiva resistência do solo a penetração. No entanto, no presente trabalho, os valores máximos obtidos foram inferiores ao valor crítico definido pelo IHO, sendo $1,63 \text{ kg dm}^{-3}$ no sistema plantio direto não irrigado (SPDNI); $1,64 \text{ kg dm}^{-3}$ no sistema plantio direto irrigado (SPDI); $1,57 \text{ kg dm}^{-3}$ no sistema convencional não irrigado (SCNI) e $1,46 \text{ kg dm}^{-3}$ no sistema convencional irrigado (SCI).

Para a profundidade 0-0,20 m, na condição do experimento, não tendo sido atingida a Dsc de $1,73 \text{ kg dm}^{-3}$, as limitações decorrentes da variação da Ds se relacionam com o aumento da RP (Ds superior a $1,2 \text{ kg dm}^{-3}$). Neste sentido para a avaliação e quantificação da condição física do solo para o crescimento de plantas nos dois sistemas de manejo (SPD e SC), com e sem irrigação (I e NI) optou-se em analisar a distribuição dos valores de Ds dentro da amplitude de variação do IHO conforme pode ser observado nas Figuras 13 e 14.

Observa-se que o SPDNI e o SPDI apresentaram a pior condição física do solo para o crescimento de plantas, pois cerca de 90% e 97% dos valores de Ds configuraram limitações quanto à resistência do solo à penetração (Ds superior a $1,2 \text{ kg dm}^{-3}$), respectivamente (Figura 13a,b). Já a condição do solo sob SCNI e SCI esteve melhor, uma vez que cerca de 75% e 72% dos valores ,configuravam limitações à RP, respectivamente (Figura 14a,b).

Para a avaliação e quantificação da variação de umidade do solo sob sistema plantio direto (SPD) e sob sistema convencional (SC), irrigado e não irrigado, optou-se neste trabalho por selecionar os valores de umidade no limite superior e inferior determinado do IHO definidos pelo teor de água na capacidade de campo (θ_{CC}) e pelo teor de água onde a resistência à penetração foi superior a 2MPa, respectivamente.

SILVA e KAY (1996) verificaram que o crescimento de milho foi correlacionado positivamente com o IHO e negativamente com a frequência de dias que o teor de água no solo ficou fora dos limites do IHO.

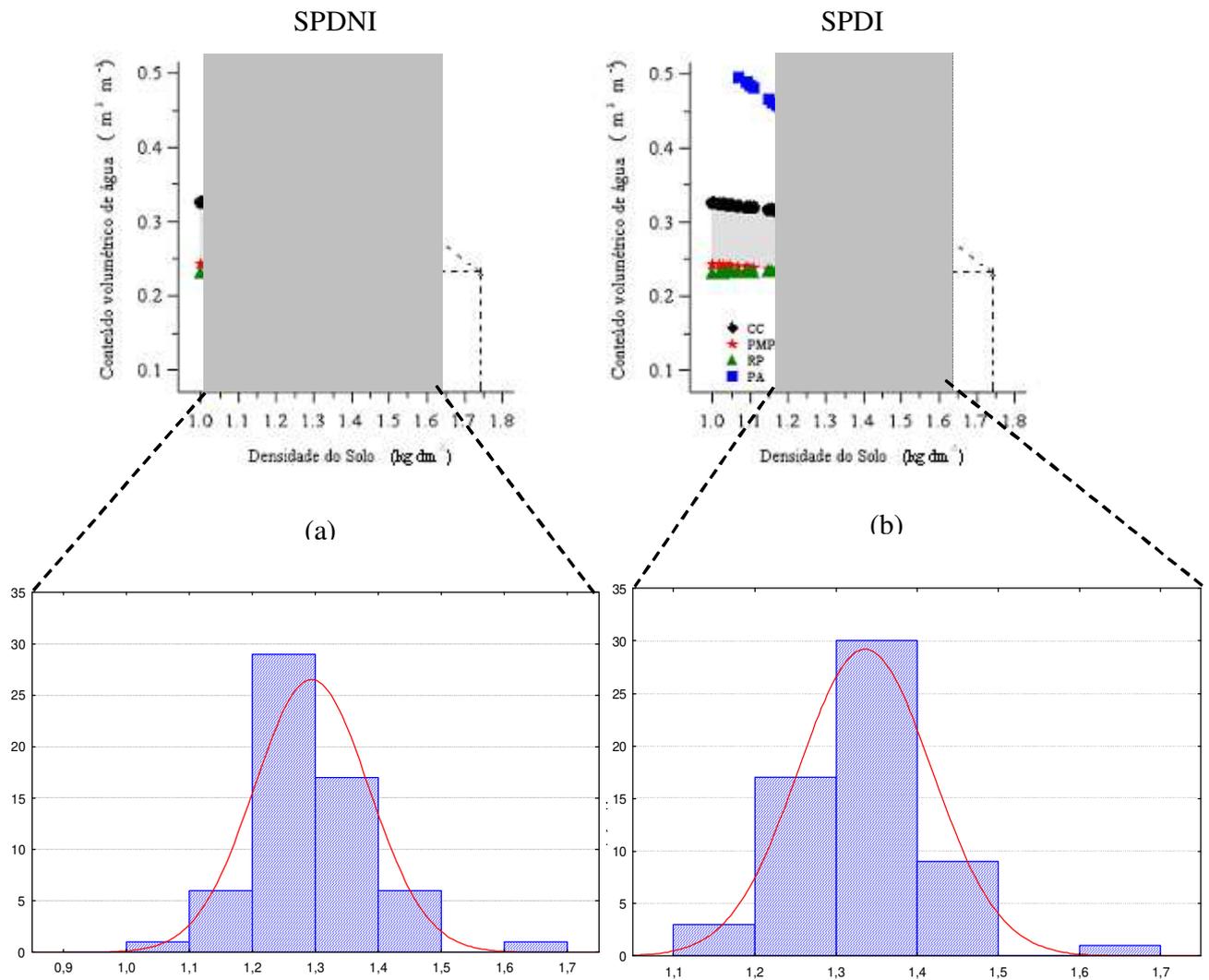


Figura 13. Representação gráfica dos valores de densidade do solo no sistema plantio direto não irrigado (SPDNI) ao longo de três anos agrícolas na profundidade de 0-0,20 m. A área hachurada representa a faixa de variação da densidade do solo e as colunas correspondem à distribuição dos valores de densidade do solo.

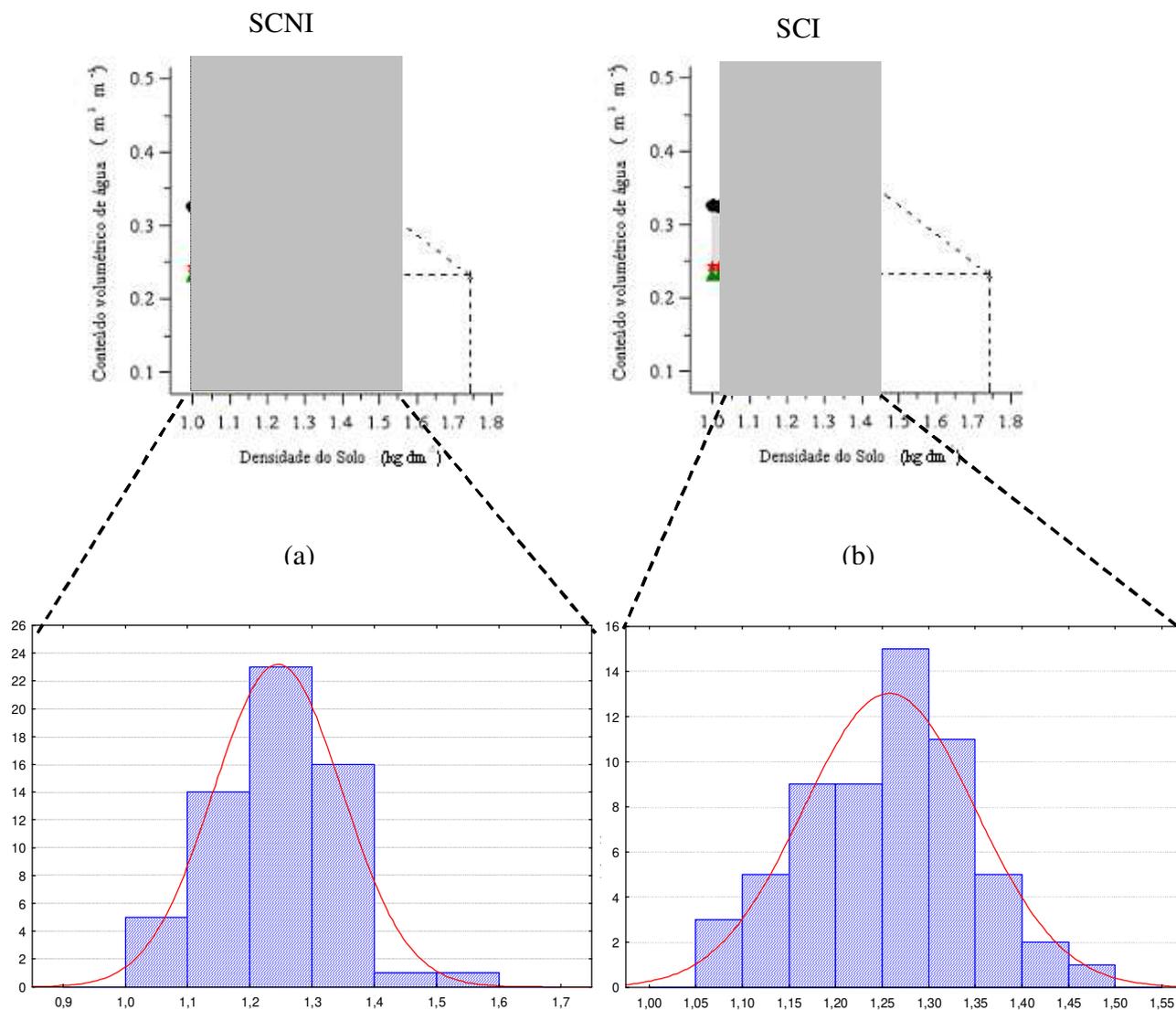


Figura 14. Representação gráfica dos valores de densidade do solo no sistema plantio direto não irrigado (SPDNI) ao longo de três anos agrícolas na profundidade de 0-0,20 m. A área hachurada representa a faixa de variação da densidade do solo e as colunas correspondem à distribuição dos valores de densidade do solo.

Na Figura 15, pode-se observar o limite superior “linha tracejada azul” e inferior “linha tracejada vermelha” do IHO, nos dois sistemas de manejo (SPD e SC), com e sem irrigação (I e NI). A partir do monitoramento da umidade do solo foi calculado o número de dias em que a umidade esteve abaixo do limite inferior do intervalo, quando o feijoeiro ficou submetido a restrições em seu crescimento e desenvolvimento. Observa-se inicialmente que para as duas

parcelas irrigadas (SPDI e SCI) ocorreram problemas quanto à aeração, em virtude de teores de água muito elevados. No entanto, ao longo do ciclo não foram observados valores de restrição por excessiva RP, ficando a maior parte dos valores de umidade dentro dos limites do IHO. Durante cerca de 49 dias, do ciclo do feijoeiro, a umidade do solo permaneceu dentro dos limites do IHO para o tratamento SCI, enquanto que o SPDI obteve cerca de 38 dias dentro dos limites do IHO. Observa-se de modo geral que o sistema plantio direto irrigado (SPDI) apresentou maior conteúdo de água em relação ao sistema convencional (SCI) praticamente durante todo o ciclo da cultura (Figura 15). Isto deve ser função da presença da palhada na superfície do solo, que previne as perdas de água por evapotranspiração, e melhora as características de retenção de água no solo. Este fato contribuiu para que tal sistema apresentasse maior produtividade nominal (Figura 16), sem, no entanto diferir estatisticamente da produtividade do SCI, que apresentou cerca de 9,65% a menos quando comparado ao sistema plantio direto irrigado (SPDI).

Com relação à densidade do solo, o SPDI apresentou valor médio de densidade de 1,33 kg dm⁻³, enquanto o SCI obteve 1,25 kg dm⁻³, tais valores poderiam reduzir a produtividade da cultura, porém como a umidade do solo na maior parte do ciclo esteve dentro dos limites de umidade definidos pelo IHO, ou seja, em condições de umidade ótima, aparentemente a densidade do solo não foi restritiva ao desenvolvimento das plantas.

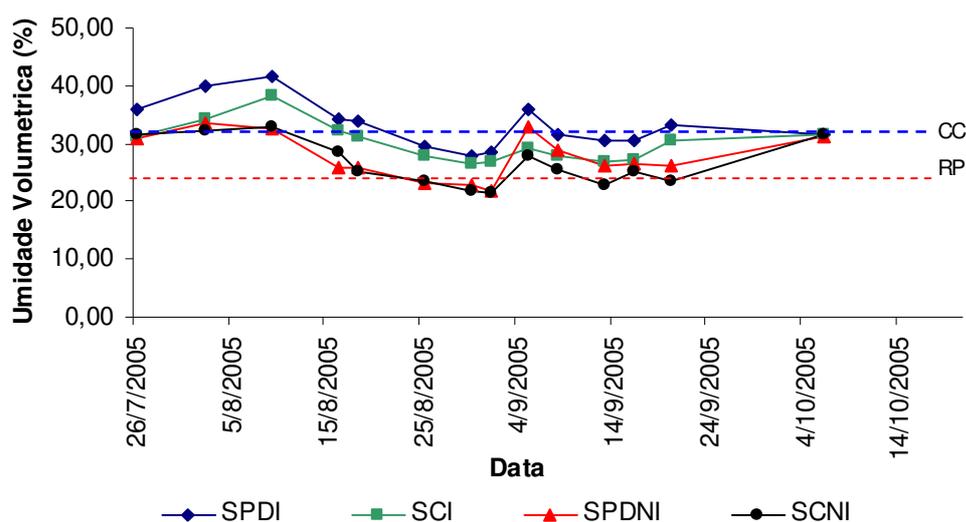


Figura 15. Variação temporal do teor de água no solo ($\theta \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) para cada um dos tratamentos analisados: sistema plantio direto não irrigado (SPDNI); sistema plantio direto irrigado (SPDI); sistema convencional não irrigado (SCNI) e sistema convencional irrigado (SCI).

Em relação aos sistemas não irrigados, observa-se que o sistema plantio direto (SPDNI) esteve cerca de 27 dias fora do IHO, enquanto que o sistema convencional (SCNI) esteve cerca de 39 dias, configurando limitações em ambos o sistema devido a condições de RP elevado (Figura 15). Observa-se que no período avaliado, foi verificado secamento do solo suficiente para que ocorressem valores de umidade abaixo do limite correspondente a RP crítica (25/8 a 4/9).

Entretanto, o SPDNI apresentou um maior conteúdo de água e menor número de dias fora do IHO em relação ao sistema convencional (SCNI) praticamente durante todo o ciclo da cultura (Figura 15), provavelmente em função da presença da palhada na superfície do solo. Este fato contribuiu para a maior produção em relação ao sistema convencional não irrigado (Figura 16). Os resultados obtidos indicam que o período de dias em que o solo permaneceu fora das condições ideais foi suficiente para afetar diferencialmente a produtividade do feijoeiro.

Fica claro que a diferença não significativa da produtividade entre o SPDI e SCI pode ser atribuída à manutenção da umidade do solo nos limites do IHO, possibilitando desse modo adequadas produtividades e evitando que ocorressem valores de umidade abaixo do limite correspondente a RP crítica. O SPD consegue conservar maior umidade no solo, favorecendo a cultura em sistema não irrigado.

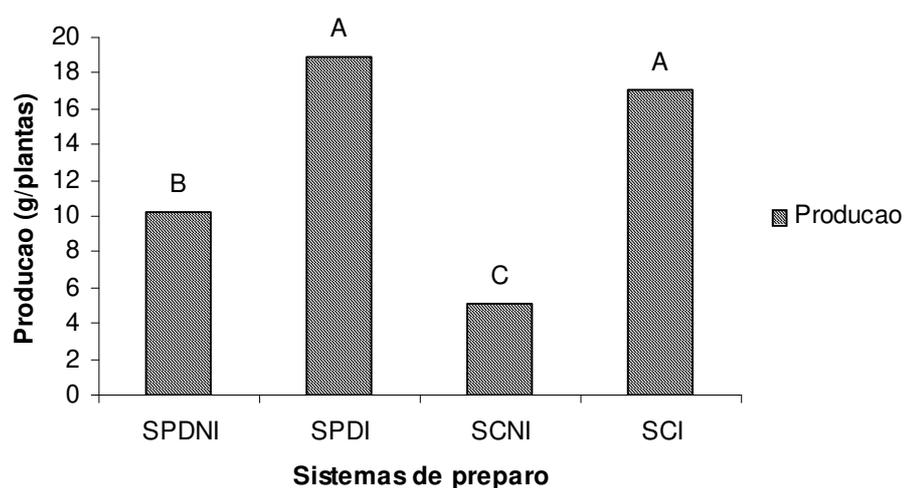


Figura 16. Rendimento da cultura do feijoeiro obtido nos tratamentos em estudo na safra agrícola 2005/06. Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade ($p < 0,05$).

O monitoramento da θ é fundamental para futuras pesquisas envolvendo o IHO e sistemas de manejo, visto que a frequência de ocorrência de θ dentro dos limites do IHO depende do manejo do solo (SILVA e KAY,1997) e tem relação com o crescimento das plantas, como foi constatado neste trabalho.

5. CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo confirmam as hipóteses de que:

- O Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) determinado para uma dada classe taxonômica de solo se constitui um indicador aplicável na avaliação da qualidade estrutural do solo quando submetido a diferentes sistemas de manejo.
- A determinação do IHO para duas profundidades do solo permitiu maior compreensão dos efeitos do manejo agrícola na qualidade do solo e na produtividade dos sistemas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBOT,J.; GUIJT,I. Novas visões sobre mudanças ambiental: abordagens participativas de monitoramento. Rio de Janeiro: AS-PTA,1999,96p.
- ACEVEDO, E; HSIAO, T.C; HENDERSON, D.W. Immediate and subsequent growth response of maize leaves to changes in water status. **Plant Physiology**, Rockville, v. 48, p. 631-636, 1971.
- ALEGRE,J.C. et al. Tillage systems and soil properties in Latin america. **Soil Tillage Research**,v.20,p.147-163,1991.
- ALVARENGA,R.C; COSTA,L.M; MOURA FILHO,W., REGAZZI,A.J. Crescimento de raízes de leguminosas em camadas de solo compactadas artificialmente. **R. Bras. Ci. Solo**, v.20,p.319-326,1996.
- ARAUJO, M.A; TORMENA, C. A; SILVA, A.P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. **Pesq. Agropec. bras.**, v.28, 2004.
- ARCHER,J.R.;SMITH,M.P.D. The relation between bulk density, available water capacity and air capacity of soils. **J. Soil Sci.**, n.23,p.475-480,1972.
- ASSIS, R.L. de; LANÇAS, K.P. Efeito do tempo de adoção do sistema plantio direto na densidade do solo máxima e umidade ótima de compactação de um nitossolo vermelho distroférrico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 2, p. 337-345, 2004.
- BEAUDOUX,E. etal. De la intensificación a la evaluación. Guia Metodológico de apoyo a proyectos y adones para el desarrollo. La Paz. Bolívia: Huellas,1993.197p.
- BENGHOUGH, A.G; MULLINS, C.E. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. **Journal of Soil Science**, v.41, p.341-358, 1990.
- BENGOUGH, A.G; MULLINS, C.E. Penetrometer resistance, root penetration resistance and root elongation rate in two sandy loam soils. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.131, p.59-66, 1991.
- BENNIE, A.T.P. Growth and mechanical impedance. In: WAISEL, Y.; ESHEL, A.; KAFKAFI, U. (Ed.) **Plant roots: the hidden half**. 2.ed. New York: Marcel Dekker, 1996. p.453-470.
- BERGAMASCHI,H. Desenvolvimento de déficit hídrico em culturas. In: BERGAMASCHI,H. (Coord.). Agrometeorologia Aplicada à irrigação. Porto Alegre. Editora da Universidade/UFRGS. P. 25-32, 1992.
- BERTOL, I; BEUTLER, J.F; LEITE, D., BATISTELA, O. Propriedades físicas de um Cambissolo Húmico afetadas pelo tipo de manejo do solo. **Sci. Agric.**, v.58,p.555-560, 2001.

BERTOL, I; COGO, N.P., LEVIEN, R. Erosão hídrica em diferentes preparos do solo logo após a colheita de milho e trigo, na presença e ausência de resíduos culturais. **R. Bras. Ci. Solo**, v.21,p.409-418, 1997.

BERTOL, I; SCHICK, J; MASSARIOL, J.M; REIS, E.F., DILLY, L. Propriedades físicas de um Cambissolo Húmico álico afetadas pelo manejo do solo. **Ci. Rural**, v.30,p.91-95, 2000.

BETZ, C.L.; ALLMARAS, R.R., COPELAND, S.M. Least limiting water range: traffic and long-term tillage influences in a Webster soil. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, n.63, p. 1384-1393, 1998.

BEUTLER,A.N; CENTURION,J.F.;SOUZA,Z.M.;SILVA,L.M. Utilização dos penetrômetros de impacto e de anel dinamométrico em Latossolos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal,v.22,p.191-1999,2002.

BOONE, F.R. Wheater and other enviromental factors influencing crop responses to tillage and traffic. **Soil Till. Res.**, 11:283-324, 1988.

BOONE, F.R.; van der WERF, H.M.G.; KROESBERGEN, B.; TEN HAAG, B.A. & BOERS, A. The effect of compaction of the arable layer in sandy soils on the growth of maize for silage. II. Soil conditions and plant growth. Neth. **J. Agric. Res.**, 35:113-128, 1987.

BORGES, A. L.; KIEHL, J. C.; SOUZA, L. S. Alteração de Propriedades Físicas e Atividade Microbiana de um Latossolo Álico Após o Cultivo com Fruteiras Perenes e Mandioca. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 23: 1019 – 1025, 1999.

BRADFORD,AJ.M. Penetrability. In: KLUTE, A. (Ed.). *Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods*. 2 ed. Madison: American Society of Agronomy, cap. 11, p. 463-478, 1986.

BRADY,N.C.; WEIL,R.R. **The nature and properties of soils**. 12 ed. New Jersey: Prentice Hall,1999. 881p.

BRAUNACK, M.V., DEXTER, A.R. Soil aggregation in the seedbed: a review. I - Properties of aggregates and beds of aggregates. **Soil Tillage Res.**, v.14p.259-279, 1989.

BRENBROOK, CM; GROUTH III, E. Indicators of the sustainabilty and impacts of pest management systems, 1996. Disponível em: <http://www.pmac.net/aaas.htm> (Acesso em 22/11/05)

BRUGGEN,A.H.C; SEMENOV,A.M. In search of biological indicators for soil health and disease suppression. **Applied soil Ecology**, Amsterdam,v.15,n.1,p.13-24, 2000.

CAMARGO, O. A. de; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. **Métodos de Análise, Química, Mineralógica e Física de Solos do Instituto Agronômico de Campinas**. Instituto Agronômico, Campinas, SP, 1986, 94P. (Boletim Técnico Instituto Agronômico, 106).

CAMPOS,B.C; REINERT,D.J; NICOLODI,R; RUEDELL,J; PETRERE,C. Estabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho Escuro distrófico após sete anos de rotação de culturas e sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Campinas, v.19,n.1,p.121-126,jan/abr.1995.

CARPENEDO, V., MIELNICZUK, J. Estado de agregação e qualidade de agregados de Latossolos Roxos, submetidos a diferentes sistemas de manejo. **R. Bras. Ci. Solo**, v.14,p.99-105, 1990.

CASTRO FILHO, C; MUZILLI, O., PADANOSCHI, A.L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo Roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. **R. Bras.Ci. Solo**, v.22,p.527-538, 1998.

CAVALIERI, K.M.V., TORMENA, C.A., FILHO,P.S.V., GONCALVES,A.C.A., COSTA, A.C.S. Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico. **Revista Brasileira Ci. Solo**, n.30, p. 137-147, 2006.

CENTURION, J.F.; DEMATTÊ, J.L.I. Efeito de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um solo sob cerrado cultivado com soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.9, p.263-266, 1985.

CINTRA,F.L.D; MIELNICZUK,J. Potencial de algumas espécies vegetais para a recuperação de solos com propriedades físicas degradadas. **R. Bras. Ci. Solo**, v.7,p.197-201,1983.

COOTE, D.R, RAMSEY, J.F. Quantification of the effects of over 35 years of intensive cultivation on four soils. **Can. J. Soil Sci.**,v.63. p. 1-14, 1983.

COSTA, F.S; ALBUQUERQUE, J.A; BAYER, C.; FONTOURA, S.M.V., WOBETO, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas de plantio direto e preparo convencional. **R. Bras. Ci. Solo**, v.27,p.527-535, 2003.

CURTIS, R.O, POST, B.W. Estimating bulk density from organic matter content in some Vermont forest soils. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, v.28. p. 285-286, 1964.

D'ANDRÉA, A.F; SILVA, M.L.N; CURI, N., FERREIRA, M.M. Atributos de agregação indicadores da qualidade do solo em sistemas de manejo na região dos cerrados no sul do estado de Goiás. **R. Bras. Ci. Solo**, v.26:1047-1054, 2002.

DANIEL, L.A., SVERZUT, C.B., LUCARELLI, J.R.F. Effects of different agricultural mechanization systems on compacted soil layer formation. In: AgEng96, International Conference on Agricultural Engineering. **Anais...** Madrid, 23 a 26 de setembro de 1996, v.1, p.134-35.

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

DEXTER, A.R. Advances in characterization of soil structure. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.11, n.1, p.199-238, 1988.

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. Revisão de Literatura. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, n. 2, p.175-182, maio/ago. 1996.

DORAN, J.W., PARKIN, T.B. Defining and assessing quality. In: Doran, J.W. et al. (Ed.), **Defining soil quality for a sustainable environment**. Baltimore: SSSA, 1994. p. 3-21. (Spec. Publ. 35).

DOURADO NETO, D.; JONG VAN LIER, O de; BOTRL, T. A.; LIBARDI, P. L. Programa para confecção de água no solo utilizando o modelo de Genutchen. **Engenharia Rural**, 1: 92-102, 1990.

DUARTE, A.P.; PATERNIANI, M.E.A.(Coordenador). **Fatores bióticos e abióticos em cultivares de milho e estratificação ambiental: avaliação IAC/CATI/EMPRESAS – 1999/2000**. Campinas-SP, Instituto Agrônomo de Campinas - IAC, 2000. 150 p. (Boletim científico 05).

EHLERS, W.W; KOPKE, F; HESSE, F., BOHM, W. Penetration resistance and growth root of oats in tilled and untilled loess soil. **Soil Till. Res.**, v.3:261-275, 1983.

ELRICK, D.E. et al. In-situ measurements of hydraulic properties of soils using the Guelph Permeameter and the Guelph Infiltrimeter, Ohio, 1987. In: INT. WORKSHOP ON LAND DRAINAGE, 3., 1987, Ohio. **Anais...** Ohio : Ohio State Univ, 1987. p.13-23.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA - CNPS. **Manual de métodos de análise do solo**. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura e do abastecimento, 1997. 212p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUARIA. Sistema Brasileiro de Classificação de solos. Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 412p., 1999.

ERICKSON, A.E. Tillage effects on soil aeration. In. **Predicting Tillage Effects On Soil Physical Properties And Processes**, 1982., Madison. Proceedings. American Society of Agronomy, 1982. p.91-104.

FERNANDES, B; GALLOWAY; H.M; BRONSON, R.D., MANNERING, J.V. Efeito de três sistemas de preparo do solo na densidade aparente, na porosidade total e na distribuição dos poros, em dois solos (Typic Argiaquoll e Typic Hapludaf). **R. Bras. Ci. Solo**, v.7, p.329-333, 1983.

FREDDI, O.S.; CENTURION, J.F.; ARATANI, R.G.; LEONEL, C.L.; BEUTLER, A.N. Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo na produtividade da cultura do milho. **XVI Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água**. Aracaju-SE. Jul. 2006, CD-Rom.

GLOVER, J.D.; REGANOLD, J.P. & ANDREWS, P.K. Systematic method for rating soil quality of conventional, organic, and integrated apple orchards in Washington State. *Agric. Ecosys. Environ.*, v.80, 29-45, 2000.

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

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

GUIMARÃES, C.M.; STONE, L.F.; MOREIRA, J.A A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro. II. Efeito sobre o desenvolvimento radicular e da parte aérea. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.**, Campina Grande, v.6, n.2, p.213-218, 2002.

HAISSÉ, H.R.; HASS, 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 Science Society of america Proceedings*, v.34, p.20-25, 1995.

HAJABBASI, M.A; JALALIAN, A., KARIMZADEH, H.R. Deforestation effects on soil physical and chemical properties, Lordegan, Iran. **Plant Soil**, v.190, p.301-308, 1997.

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. **Advances in Agronomy**, v.38, p.95-158, 1985.

HILL, R.L. Long-term conventional and no-tillage effects on selected soil physical properties. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v.54, p.161-166, 1990.

HUSSAIN, I; OLSON, K.R.; WANDER, M.M. & KARLEN, D.L. Adaptation of soil quality indices and application to three tillage systems in southern Illinois. **Soil Tillage Res.** v.50, 237-249, 1999.

IJIMA, M; KONO, Y. Interspecific differences of the root system structures of four cereal species as affected by soil compaction. **Japanese Journal of Crop Science**, v.60, p.130-138, 1991.

IMHOFF, S., SILVA, A.P., TORMENA, C.A. Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.7, p.1493-1500, 2000.

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

ISLAM, K.R., WEIL, R.R. Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh. **Agric. Ecosys. Environ.**, v.79:9-19, 2000.

JENSEN CR, MOGENSEN VO, POULSEN HH, HENSON IE, AAGOT S, HANSEN E, Ali M, WOLLENWEBER B. 1998. Soil matric potential rather than soil water content determines drought responses in field-grown lupin (*Lupinus angustifolius*). *Australian Journal of Plant Physiology* 25, 353–363.

KARLEN,D.L; MAUSBACH,M.J; DORAN, J.W; CLINE,R.G; HARRIS,R.F; SCHUMAN,G.E. Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation. **Soil. Sci. Soc. Am. J.** v.61:4-10, 1997.

KARLEN,D.L. & STOTT,D.E. A framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality. In: Doran, J.W.; Coleman,D.C.; Bzedicek,D.F.; Stewart,B.A. Defining soil quality for a sustainable environment. Madison,WI,**Soil Science Society of America**,1994,p. 53-72, (Special Publication,35).

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

KLEIN, V. A.; CAMARA, R. K. Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em latossolo vermelho sob plantio direto escarificado. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v.31, no.2, p.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. **R. Bras. Ci. Solo**, 26p.857-867, 2002.

KLUTE, A. Tillage effects on the hydraulic properties of soil: a review. In: VAN DOREN, D.M.; ALLMARAS, R.R.; LINDEN, D.R.; WHISLER, F.D. (Ed.) **Predicting tillage effects on soil physical properties and processes**. Madison: ASA, 1982. cap.3, p.29-43.

LAL, R., GREENLAND, B.J. **Soil physical properties and crop production in tropics**. Chischester, John Willey, 1979. p.7-85.

LAL,R. Métodos para a avaliação do uso sustentável dos recursos solo e água nos trópicos; tradução e adaptação de Cláudia Conti Medugno e José Flávio Dynia. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente,1999.97p. (Embrapa Meio Ambiente-Documentos,03).

LEÃO, T. P.; SILVA, A.P; MACEDO, M.C.M; IMHOFF S; EUCLIDES V.P.B. Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v.28, p. 415-423, 2004.

LEÃO, T.P.; SILVA, A.P.; PERFECT, E.; TORMENA, C.A. Na algorithm for caculating the least limiting water range of soils using a statistical analysis system. **Agronomy Journal**, Madison, v. 97, p. 1210-1215, 2005.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Adv Soil Sci.**, v. 1, p. 227-294, 1985.

LIBARDI, P.L. Dinâmica da água no solo. 2 ed. Piracicaba: ESALQ, Departamento de Ciências Exatas, 2000. 509p.

LUCARELLI, J.R.F. **Alterações em características de um Latossolo Roxo submetido a diferentes sistemas de manejo**. 135 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia de Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.

LUCARELLI, J.R.F., DANIEL, L.A., GUIMARÃES, E.C., SVERZUT, C.B. Different soil tillage systems influence in soil loss by erosion. In: AgEng96, International Conference on Agricultural Engineering. **Anais...** Madrid, 23 a 26 de setembro de 1996, v.2, p.757-58.

MARQUES, S. R. **Sistemas de manejo agrícola, qualidade do solo e o controle da erosão em parcelas experimentais**. 122 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia de Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

MASLE, J; FARQUHAR, G.D. Effects of soil strength on the relation of water-use-efficiency and growth to carbon isotope discrimination in wheat seedlings. **Plant Physiology**, v.86, p.32-38, 1988.

MASLE, J; PASSIOURA, J.B. The effect of soil strength on the growth of young wheat plants. **Australian Journal of Plant Physiology**, v.14, p.643-656, 1987.

MATERECHERA, S.A; DEXTER, A.R., ALSON, A.M. Penetration of very strong soils by seedling of different plant species. **Plant Soil**, v.135, p.31-41, 1991.

MEDEIROS, G.A. **Influência do manejo de um Latossolo Vermelho sobre a eficiência do uso da água e produção do feijoeiro irrigado**. 2001p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia de Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

MEREDITH, H.L.; PATRICK Jr., W.H. Effects of soil compaction on subsoil root penetration and physical properties of three soils in Louisiana. **Agronomy Journal**, Madison, v.53, p.163-167, 1961.

MEROTTO, A; MUNDSTOCK, C.M. Wheat root growth as affected by soil strength. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.197-202, 1999.

MITCHELL, G. **Problems and Fundamentals of Sustainable Development Indicators** [1996?]. Disponível em: <http://www..lec.leeds.ac.uk/people/gordon.html> (Acesso em 13/10/05)

MOODY,E; SKEAR,G.M.; JONES,J.N. Growing corn without tillage. Proc. **Soil Sci. Soc. Am.**, Madison, 25,p.516-517,1961.

MULLER, M.M.L.; CECCON, G.; ROSOLEM, C.A. Influência da compactação do solo em subsuperfície sobre o crescimento aéreo e radicular de plantas de adubação verde de inverno. **R. Bras. Ci. Solo**, 25,p.531-538, 2001.

OLIVEIRA, J.B.;ROTTA, C.L. **Levantamento pedológico semidetalhado dos solos** do Estado de São Paulo. **Quadrícula de Campinas**. Rio de Janeiro, IBGE, 169p. 1979.

ORELLANA, J. A, 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.

PALMEIRA,P.R.T; PAULETTO,E.A; TEIXEIRA,C.F.A; GOMES,A.S. & SILVA,J.B. agregação de um Planossolo submetido a diferentes sistemas de manejo. **R. Bras. Ci. Solo**, v.23,p.189-195,1999.

PETEAN,L.P.;TORMENA,C.A.;BLAINSKI,E.;GONCALVES,A.C.;MACHADO,J.L.Compactação do solo e restrições físicas ao crescimento das plantas num solo sob plantio direto. **XVI Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água**. Aracaju-SE. Jul. 2006, CD-Rom.

RADFORD,B.J.; YULE,D.F.; McGARRY,D.;PLAYFORD,C. Crop responses to applied soil compaction and to compaction repair treatments. *Soil & Tillage Research*,v.61,p.157-166,2001.

REICHART, K. Capacidade de campo. **Revista Bras. Ci. Solo**, n. 12, p. 211-216, 1988.

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

RICHARDS,L.A; WEAVER,L.R. Fifteen atmosphere percentage as related to the permanent wilting point. **Soil Science**, v.56,p.331-339,1994.

SANCHES, A.C.; SILVA, A.P.; TORMENA, C.A., RIGOLIN A.T. Impacto do cultivo de citros em propriedades químicas, densidade do solo e atividade microbiana de um Podzólico Vermelho-Amarelo. **R. Bras. Ci. Solo**, v.23,p.91-99, 1999.

SANCHEZ,P. **Properties and management of soil in the tropics**. New York: John Wiley,1976. 618p.

SAS INSTITUTE INCORPORATION. SAS/GRAPH Software: Reference, version 8. Cary. N.C: SAS Institute, 2000. 2v. 1272p.

SAS INSTITUTE. SAS/STAT. User's guide, Version 8. Cary,NC, p. 25-50, 1999.

SAVAGE, M.J.; RITCHIE, J.T.; BLAND, W.L; DUGAS, W.A. Lower limit of soil availability. **Agron. J.**, n. 88, p. 844-851, 1996.

SECCO, D. **Estados de compactação de dois Latossolos e suas implicações no comportamento mecânico e na produtividade de culturas.** 2003.110p.(Tese de Doutorado)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

SECCO, D., REINERT, D. J., REICHERT, J. M. et al. Produtividade de soja e propriedades físicas de um Latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**,v.28,p. 797-804,2004.

SEYBOLD,C.A; HERRICK,J.E; BREJDA,J.J. Soil resilience: a fundamental component of soil quality. **Soil science**, Baltimore,v.164,p.224-234,1999.

SHAPIRO, S.S.; WILK, M.B. An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika**, n.52, p. 591-611, 1965.

SILVA, A. P; KAY, B. D. Effect of soil water content variation on the least limiting water range. **Soil Sci. Soc. Am J.**, v.61:884-888, 1997

SILVA, A. P; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v.58, p.1775-1781, 1994.

SILVA, L.F.; WEILL, M.DE.A.M.; MARQUES, S.R.; LUCARELLI, J.R.F.;MATSURA, E.E. Efeitos do sistema de manejo na qualidade física do solo e na produtividade do milho em Latossolo Vermelho distroférico **XVI Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água.** Aracaju-SE. Jul. 2006, CD-Rom.

SILVA, M.L.N., CURI, N., BLANCANEUX, P. Sistemas de manejo e qualidade estrutural de Latossolo Roxo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.12, p. 2485-92, dez. 2000.

SILVA, M.S.L., RIBEIRO, M.R. Influência do cultivo contínuo da cana-de-açúcar em propriedades morfológicas e físicas de solos argilosos de tabuleiro no estado de Alagoas. **R. Bras. Ci. Solo**, v.16,p.397-402, 1992.

SILVA, V.R. **Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação.** 192p.Tese (Doutorado em agronomia, Área de concentração em Biodinâmica do solo) – Faculdade de Engenharia de Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM,RS) Santa Maria, 2003.

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

SINGER,M.J.; SOJKA,R.E. Soil quality. In: McGraw-Hill. **Yearbook of science and technology.** New York, 2001. p. 312-314.. McGraw-Hill.

SOJKA,R.E.; BUSSCHER,W.J.; LEHRSCHE, G.A. In situ strength, bulky density, and water content relations of a Durinodic xeric haplocalcid soil. *Soil Sci.*, n.166, p. 520-529,2001.

SOUTHORN,N; CATTLE. Monitoring soil quality for Central Tablelands grazing systems. *Commun. Soil Sci. Plant anal.* V.31: 2211-2229, 2000.

SOUZA,L.S.;SOUZA,L.D. & SOUZA,L.F. S. Indicadores físicos e químicos de qualidade do solo sob o enfoque de produção vegetal: estudo de caso para citros em solos coesos de tabuleiros costeiros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29, Ribeirão Preto, 2003. UNESP, Sociedade Brasileira de Ciência do solo. CD-ROM.

SOUZA, Z.M., SILVA, M.L.S., GUIMARÃES, G.L., CAMPOS, D.T.S., CARVALHO, M.P., PEREIRA, G.T. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo vermelho distrófico sob semeadura direta em Selvíria (MS). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.25, p.699-707, 2001.

SPOSITO,G; ZABEL,A. The assessment of soil quality. *Geoderma*, Amsterdam,v. 114,n. 3/4, p. 143-144, 2003.

STOLF, R.; FERNANDES, J.; FURLANI NETO, V.L. Penetrômetro de impacto IAA/PLANALSUCARStolf: recomendação para seu uso. *STAB*, Piracicaba, v.1, n.3, p.18-23, 1983.

STONE, L.F.;SILVEIRA, P.M. Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 25,p.395-401, 2001.

STONE,L.F; GUIMARÃES,C.M; MOREIRA,J.A.A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro. I: efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.6,n.2,p.207-212,2002.

TARDIEU, F. Growth and functioning of roots and of root systems subjected to soil compaction: Towards a system with multiple signaling. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v.30, n.2/4, p.217-243, 1994.

TAVARES FILHO, J., BARBOSA, G.M.C., GUIMARÃES, M.F., FONSECA, I.C.B. Resistência do solo à penetração e desenvolvimento radicular do milho (*Zea mays*) sob diferentes sistemas de manejo em um latossolo roxo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.25, p.725-730, 2001.

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

TAYLOR,H.M., GARDNER,H.R. Penetration of cotton seedling taproots as influenced by bulk density, moisture content, and strength of soil. *Soil Sci.*, n.96,p.153-156,1963.

THOMASSON, A.J. Towards an objective classification of soil structure. *Journal of Soil Science*, v.29, p.38-46, 1978.

TOMMASELLI, J. T. G., VILLA NOVA, N. A. Deficiências hídricas no solo e épocas de semeadura de milho (*Zea Mays*) e seus efeitos sobre a produção em Londrina-PR. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 2, p. 69-76, 1994.

TOPP, G.C.; GALGANOV, Y.T.; WIRES, K.C.; CULLEY, J.L.B. **Non limiting water range (NLWR): an approach for assessing soil structure**. Technical report no 2 - Soil Quality Evaluation Program. Agriculture and Agri-Food Canada. 36p, 1994.

TORMENA, C. A, SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um latossolo roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa (MG), v.22, n.4, p. 573-581, 1998.

TORMENA, C. A., ARAUJO, M. A., FIDALSKI, J. *et al.* Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um latossolo vermelho distroférico sob sistemas de plantio direto. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Mar./Apr. , v.31, no.2, p.211-219, 2007.

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 and Tillage Research**, v.52, p.223-232,1999.

TRIPPLET,G.B.; VAN DOREN JR,D.M. Agriculture without tillage. **Sci. Am.**, Washington, 236,p.28-33,1977.

VEEN,B.W.,BOONE,F.R. The influence of mechanical resistance and soil water on the growth of seminal roots of maize. **Soil Till. Res.**, 16:219-226,1990.

VIEIRA, M.J. Propriedades físicas do solo. In: IAPAR (Londrina, PR). **Plantio direto no Estado do Paraná**. Londrina, 1981. p.19-32. (IAPAR. Circular, 23).

VIEIRA, M.J.; MUZILLI, O. Características físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.19, n.7, p.873-882, jul. 1984.

VIEIRA,M.J.; MUZILLI,O. Características físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília,v.19,n.7,p.873-882, jul.1995.

WARRICK,A.W.; NIELSEN,D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL,D. (ed). Applications of soil physics. New York: Academia Press,1980.

WEBB,K.T; WANG,C; ASTATKIE,T; LANGILLE,D.R. Spatial and temporal trends in soil properties at a soil quality benchmark site in Central Nova-Scotia. **Can J. Soil Sci.** v.80:567-575, 2000.

WILLIAMS, M.J., KALMBACHER, R.S. Renovation effects on bahiagrass productivity. **Agron. J.**,v. 88,p.191-198, 1996.

WU,L.; FENG, G.; LETEY, J.; FERGUNSON,F.; MITCHELL, J.; McCULLOUGH-SANDEN, B.; MARKEGARD, G. Non limiting water range (NLWR) as index of soil quality as related to physical properties. **Geoderma**, Amsterdam, v. 114, p. 401-414, 2003.

XU, X.; NIEBER, J.L., GUPTA, S.C. Compaction effects on the gas diffusion coefficients in soil. **Soil Sci. Soc., Am. J.**, v.56,p.1743-1750, 1992.

ANEXOS/ APÊNDICES

APÊNDICE 1

Granulometria do LATOSSOLO VERMELHO Distroférico típico do Campo Experimental da FEAGRI/UNICAMP.

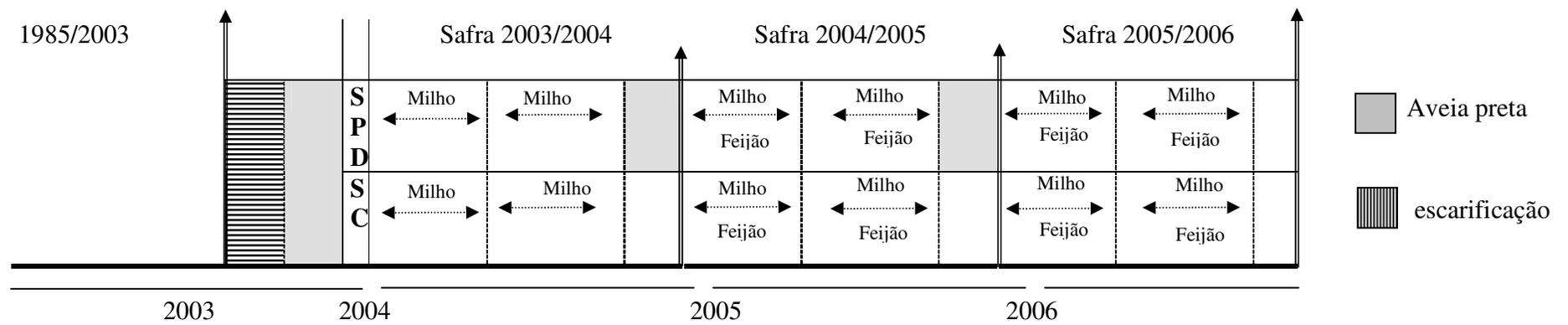
Tratamento	Parcela	Profundidade	Areia Total	Argila	Silte	Nº Pontos
		cm		g Kg^{-1}		
Sistema Plantio Direto	1	10	253	573	174	15
		20	228	606	166	15
		30	218	638	144	15
	2	10	262	555	183	15
		20	244	588	168	15
		30	214	633	153	15
	3	10	268	559	172	15
		20	247	596	158	15
		30	224	627	149	15
	4	10	286	527	187	15
		20	256	569	175	15
		30	244	593	163	15
Média	10	267	554	179	60	
	20	244	590	167	60	
	30	225	623	152	60	
Sistema Convencional	5	10	264	538	198	15
		20	250	594	156	15
		30	235	622	143	15
	6	10	260	553	187	15
		20	246	597	157	15
		30	231	629	139	15
	7	10	248	575	177	15
		20	233	608	158	15
		30	224	633	143	15
	8	10	254	560	186	15
		20	225	620	155	15
		30	219	633	148	15
Média	10	256	557	187	60	
	20	239	605	156	60	
	30	227	629	143	60	

APÊNDICE 2

ENSAIO ANTERIOR

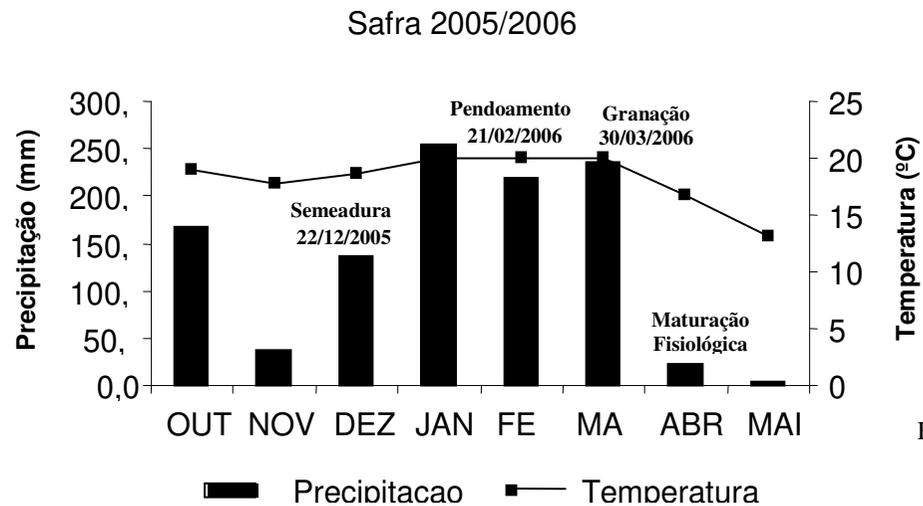
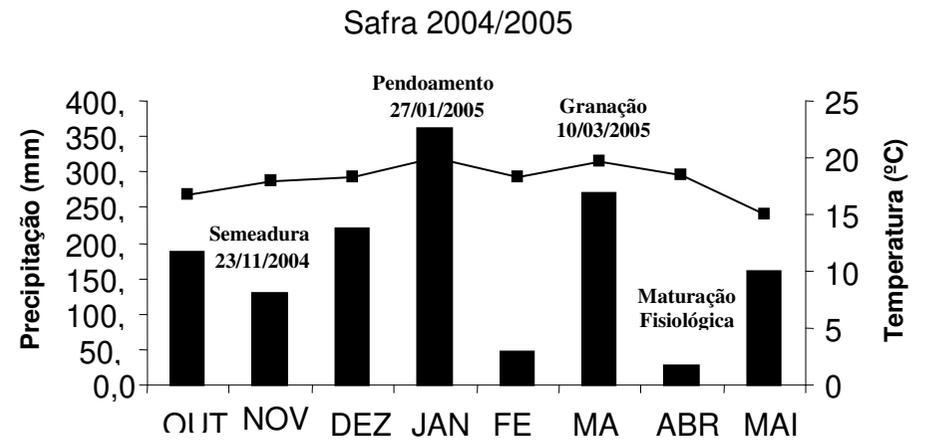
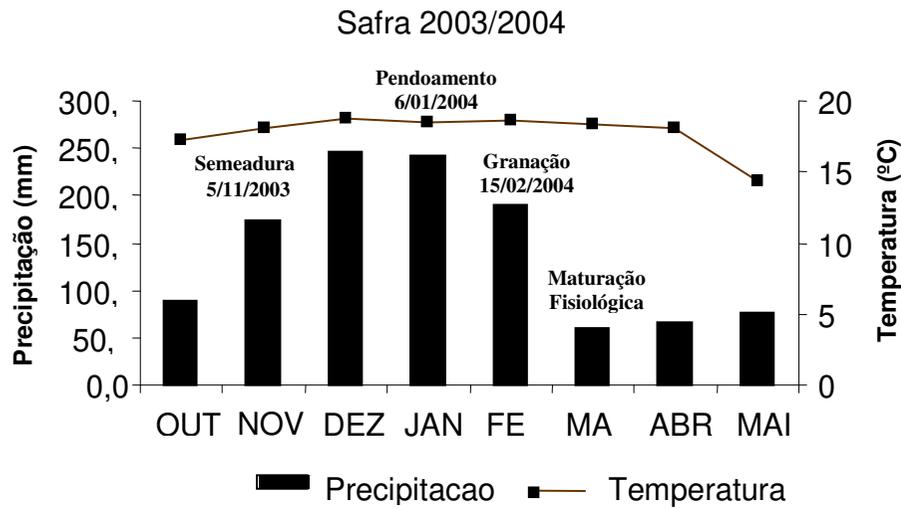
ENSAIO ATUAL

Legenda:



Histórico de ocupação da área, com destaque para as áreas de estudo do ensaio atual.

Apêndice 3



Fonte:CEPAGRI/UNICAMP.

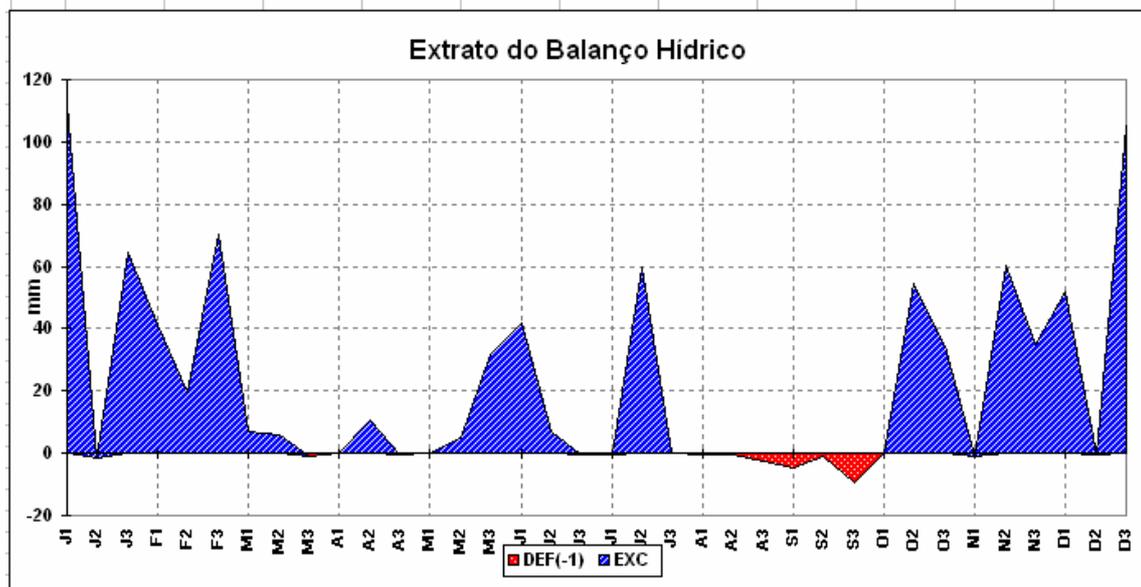
1 Dados climáticos de temperatura média (°c) e precipitação (mm) nos estádios de desenvolvimento da cultura de milho nas safras agrícolas 2003/04, 2004/05 e 2005/06 em campinas-(sp).

Anexo 1- Ano 2003/2004

(Ano 2003)

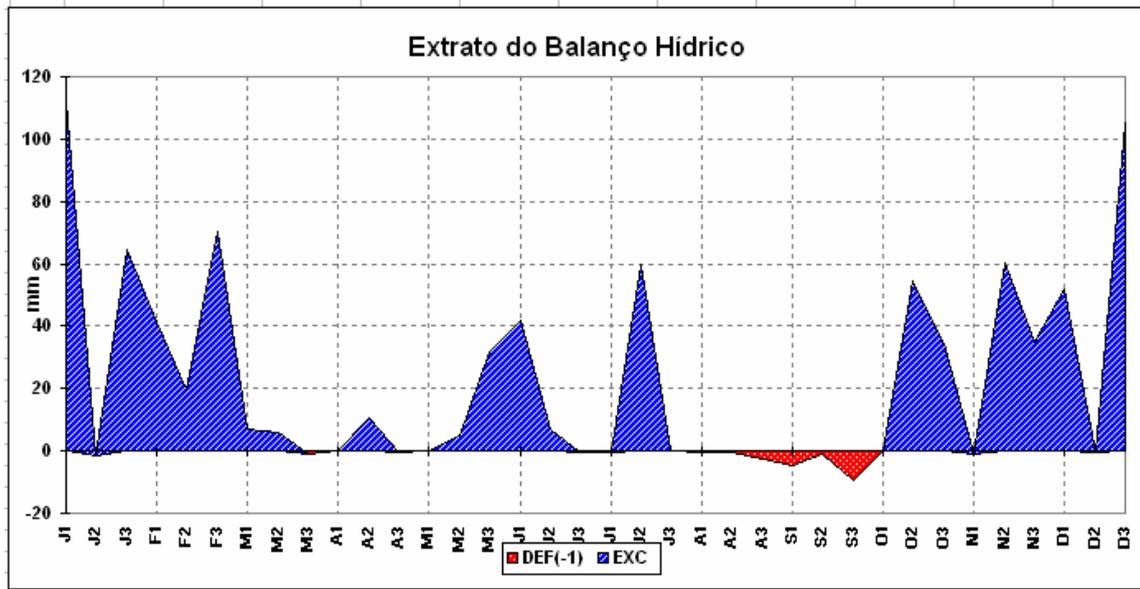


(Ano 2004)

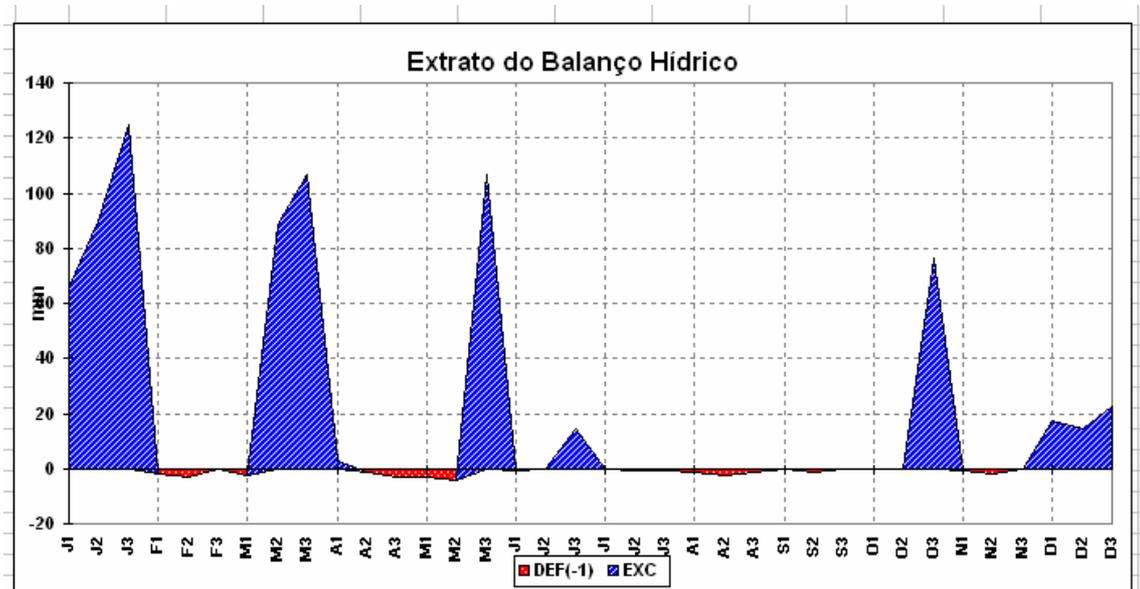


Anexo 2 Ano 2004/2005

(Ano 2004)

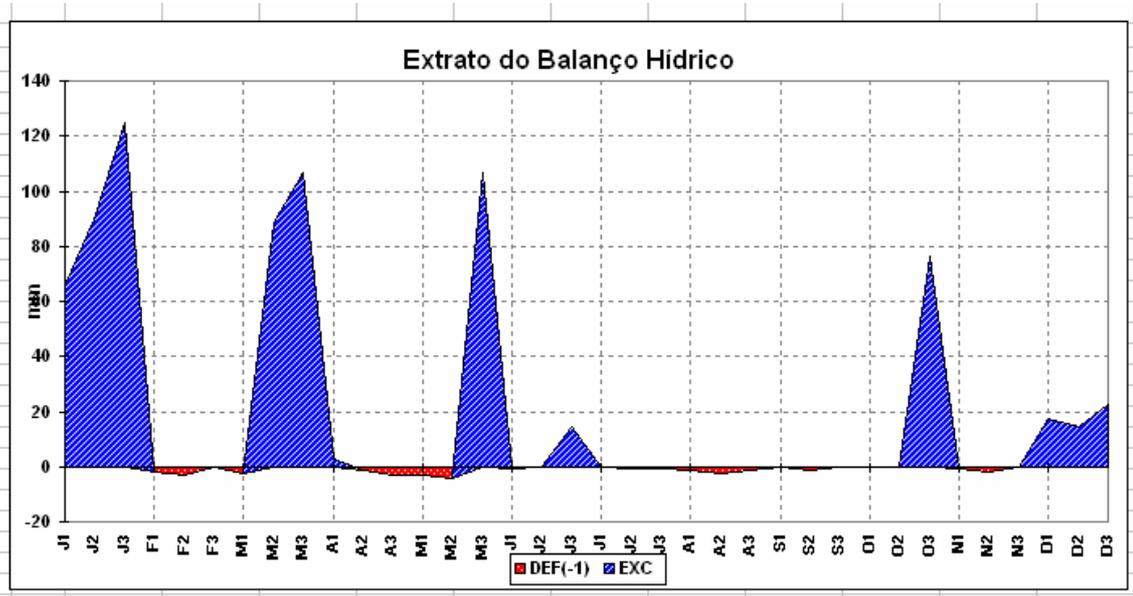


(Ano 2005)



Anexo 3 Ano 2005/2006

(Ano 2005)



(Ano 2006)

